

BASE DE DATOS NACIONAL DEL CARBONO EN CRONOSECUENCIAS

NATIONAL DATA BASE OF CARBON IN CHRONOSEQUENCES

Marcos Casiano Domínguez^{1‡}, Fernando Paz Pellat², Marlen Rojo Martínez¹, Sara Covalada Ocón³ y Deb Raj Aryal⁴

¹Programa Mexicano del Carbono. Chiconautla No. 8, Col. Lomas de Cristo, CP 56230, Texcoco, Estado de México.

²GRENASER, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 Carretera México-Texcoco, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

³Kibeltik Clima y Medio Ambiente, A. C. Calle Ejército Nacional 31, Col. Guadalupe, San Cristóbal de las Casas, Chiapas.

⁴Facultad de Ciencias Agronómicas, CONACYT-Universidad Autónoma de Chiapas. CP 30470, Villaflores, Chiapas,

[‡]Autor para correspondencia: cadox77@gmail.com

RESUMEN

Para tener una perspectiva más allá de una visión estática de los almacenes de carbono en ecosistemas terrestres, es necesario el conocimiento de su dinámica asociada a perturbaciones antropógenicas o naturales. La opción es realizar mediciones de largo plazo en sitios representativos de los diferentes ecosistemas de México, pero esto implica tiempos largos y altos costos. Una alternativa es el uso de cronosecuencias (cambio de espacio por tiempo), bajo una configuración correcta de supuestos, puede ser una fuente de información valiosa para caracterizar la dinámica del carbono. En este trabajo se realizó una compilación de documentos en literatura convencional y gris asociada a cronosecuencias en los diferentes ecosistemas de México, lo que permitió caracterizar en forma temporal las variaciones de carbono en sus almacenes. Se presentan los resultados de este esfuerzo y se plantean recomendaciones para su seguimiento y mejoras.

Palabras clave: *ecosistemas terrestres; dinámica del carbono, REDD+; MDL, mitigación.*

ABSTRACT

In order to have a perspective beyond a static view of the carbon stores in terrestrial ecosystems, it is necessary to know their dynamics associated with anthropogenic or natural disturbances. The option is to make long-term measurements in representative sites of the different ecosystems of Mexico, but this implies times and high costs. An alternative is the use of chronosequences (change of space by time), under a correct definition of assumptions, can be a source of valuable information to characterize carbon dynamics. In this work, a compilation of documents was made in the conventional literature, in which the chronosequences in the different ecosystems of Mexico, which temporarily characterize the carbon variations in their stores. The results of this effort are presented and recommendations for its follow-up and improvements are presented.

Index words: *terrestrial ecosystems; carbon dynamics; REDD +; CDM; mitigation.*

INTRODUCCIÓN

En el análisis y síntesis del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México se ha enfatizado información de tipo estático para caracterizar los diferentes almacenes de los ecosistemas terrestres,

principalmente los forestales. El conocimiento de la dinámica del carbono (C) permite analizar cambios asociados a perturbaciones antropogénicas y eventos naturales, accediendo a proyectar ganancias o pérdidas de carbono. Esto es particularmente importante en los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) asociados al

Protocolo de Kioto (1997) o para REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada más conservación, incremento de los compartimientos de carbono y manejo forestal sustentable).

El impacto de los proyectos de secuestro o captura de carbono y la evaluación de recursos financieros invertidos en medidas de reducción de emisiones por degradación y deforestación bajo cualquier esquema (MDL o REDD+) requieren informes rápidos, robustos y costo-efectivos y, espacialmente explícitos de ganancias (remociones) o pérdidas (emisiones) de carbono estimadas a partir de la diferencia entre los contenidos almacenados de sitios con proyecto y sin él (línea base) en un tiempo determinado (Powell, 1998), sin embargo, la cuestión que prevalece es cuál es la capacidad o en qué medida los compartimientos de los ecosistemas terrestres (biomasa aérea, material leñoso en pie, hojarasca-mantillo, material leñoso caído, biomasa subterránea y suelo) pueden contribuir como sumideros de CO₂ (Vesterdal *et al.*, 2002).

Una forma de abordar estas preguntas es a través de un enfoque de estudio de largo plazo que permita

entender, el desarrollo natural de la vegetación en ambientes perturbados por actividades antropógenicas y causas naturales. Los procesos de sucesión ecológica de la vegetación pueden tomar décadas o cientos de años y el uso de cronosecuencias permite la evaluación de estos períodos largos de desarrollo, reemplazando el tiempo por el espacio (Walker *et al.*, 2010).

Las cronosecuencias son apropiadas para el estudio sucesional de la vegetación cuando existe evidencia de que los sitios con diferentes edades siguen la misma trayectoria, es decir, existe un supuesto importante que cumplir, el cual establece que todos los sitios que conforman la cronosecuencia deben diferir solamente en la edad (Figura 1); esto es, que todos los sitios deben compartir la misma historia de desarrollo y tener las mismas circunstancias bióticas y abióticas (Johnson y Miyanishi, 2008). La violación a los supuestos implícitos en el uso de cronosecuencias limita su correcta aplicación y conducen a falsas conclusiones sobre los patrones ecológicos (Walker *et al.*, 2010); sin embargo, la mayoría de los estudios han pasado por alto dicha restricción (Chazdon *et al.*, 2007; Johnson y Miyanishi, 2008).

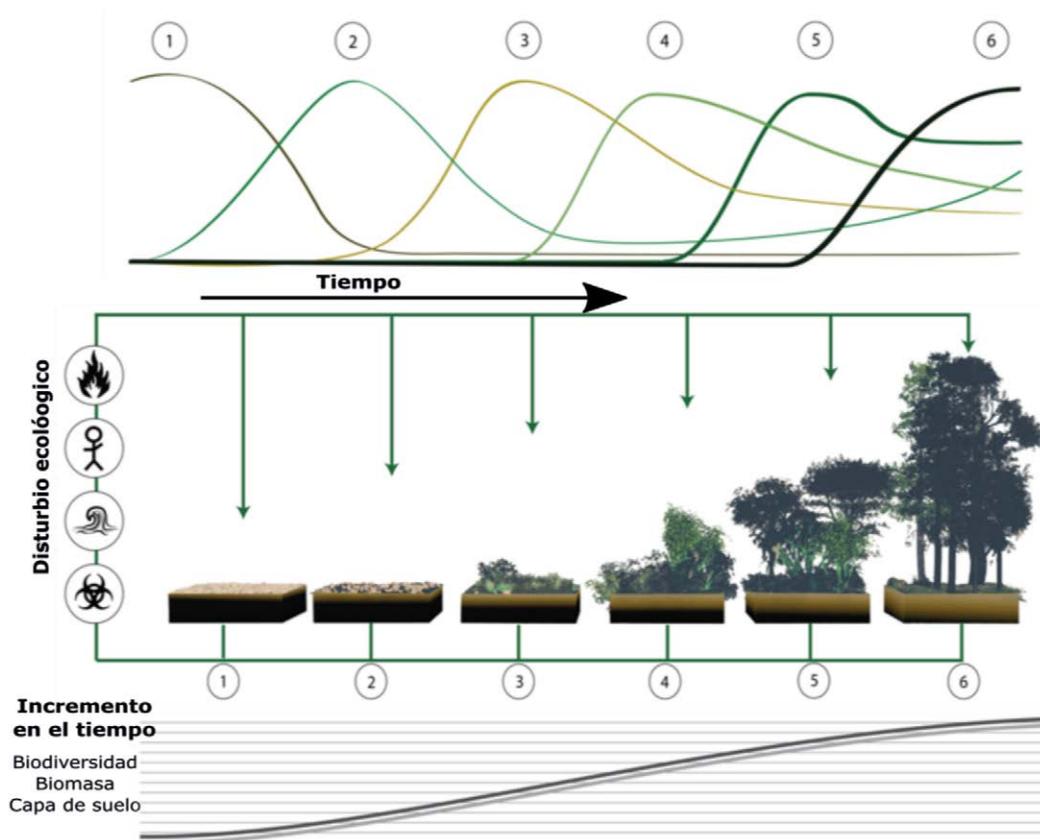


Figura 1. Sucesión de la vegetación en seis etapas cronológicas: (1) Roca intemperizada, (2) Musgo y hierbas anuales, (3) Pastos perennes, (4) Arbustivas leñosas, (5) Árboles de rápido crecimiento, (6) Bosque clímax. Fuente: adaptado de Luca Martin Frey [CC BY 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>)].

Las cronosecuencias, en los bosques tropicales secundarios (húmedos y secos), predicen un aumento en la riqueza de especies, cobertura, estructura, densidad de las plantas, biomasa a través del tiempo (Chazdon *et al.*, 2007), así como, los contenidos de carbono en el suelo dada la relación suelo-vegetación (Walker *et al.*, 2010; Ahirwal *et al.*, 2017).

Si bien las cronosecuencias pueden llevar a plantear hipótesis sobre la forma de las trayectorias sucesionales y las tasas de cambio de los atributos estructurales de la comunidad, como el contenido de carbono (Johnson y Miyaniishi, 2008; van Breugel *et al.*, 2006), actualmente se desconoce la cantidad de trabajos de investigación que se han realizado en México. El tema requiere especial atención en el marco de proyectos de mitigación al cambio climático global (Ahirwal *et al.*, 2017) y el pago por servicios ambientales por secuestro de carbono.

El objetivo del presente trabajo fue integrar una base de datos de los contenidos de carbono que se reportan en la secuencia de sucesión de comunidades de plantas que ocupan un lugar a través del tiempo bajo el concepto de cronosecuencias, ya sea por abandono de tierras cultivadas o aprovechadas (manejo forestal) y por degradación de la vegetación natural. Específicamente: identificar los datos de carbono de los diferentes compartimentos por rangos de edad y tipo de vegetación; sintetizar los datos de análisis físicos, químicos y mineralógicos adicionales al contenido de carbono e integrar los datos nacionales de carbono en hojas de Excel^{MR}.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, en primera instancia se realizó una búsqueda de artículos de carácter oficial o científico, que hicieran alusión a una cronosecuencia forestal o en su caso a una etapa de sucesión y en los cuales se mencionarían datos de biomasa o carbono de los diferentes compartimentos.

Los compartimentos de almacenaje de carbono que se tomaron en cuenta para el estudio fueron (IPCC, 2003), Figura 2:

- Biomasa aérea: biomasa viva por encima del suelo, como fuste, ramas, corteza, semillas y hojas.
- Biomasa subterránea: biomasa de raíces vivas excluyendo raíces finas de menos de 2 mm de diámetro.
- Mantillo: hojarasca, capa de fermentación y el material leñoso caído fino con diámetro menor de 7 cm.
- Madera muerta o necromasa: árboles muertos en pie y tocones ≥ 7.5 cm de diámetro.
- Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades.
- Adicional a los compartimentos anteriores y, en función al análisis de la información de los artículos, se incluyó la categoría de carbono microbiano.

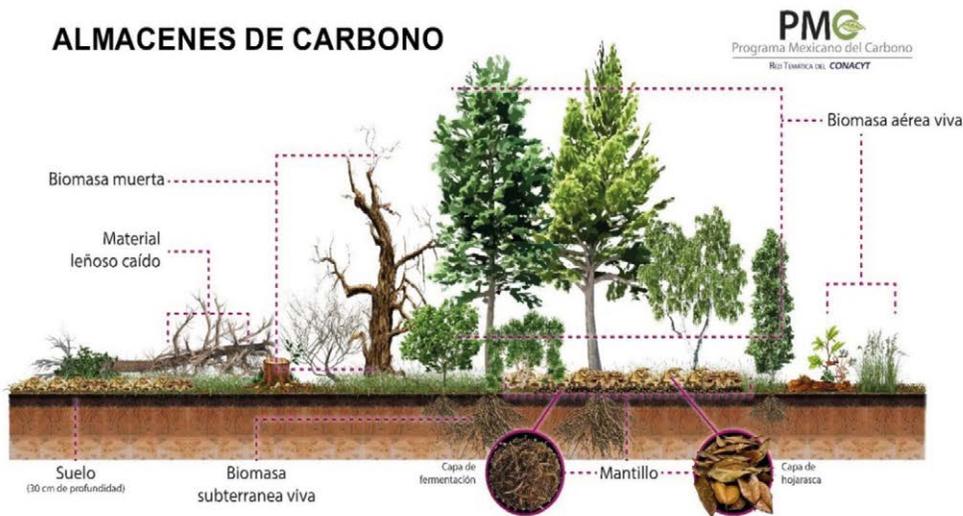


Figura 2. Almacenes de carbono en las comunidades vegetales (1) Biomasa viva sobre el suelo, (2) Biomasa subterránea [raíces], (3) Biomasa muerta en pie, (4) Biomasa muerta en piso y mantillo y (5) Suelo. Fuente: Adaptada de IPCC (2003) por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).

Se efectuó una revisión de literatura para localizar publicaciones en internet con información relacionada con los cinco almacenes (más el de carbono microbiano) y flujos de C en ecosistemas terrestres de México. Se utilizaron motores de búsqueda públicos disponibles como *Science Direct*, *Google Académico*, *Redalyc*, *Researchgate* y *Scopus*. Los documentos encontrados se clasificaron en publicaciones convencionales y de literatura gris. Las publicaciones convencionales se refieren a los artículos científicos y a los libros indexados revisados por pares. La literatura gris son investigaciones reportadas en tesis, informes y resúmenes extensos publicados como resultado de reuniones científicas.

La búsqueda se realizó mediante el uso de una serie de palabras clave con operadores lógicos para seleccionar la literatura relevante: cronosecuencias, índices de sitio, caracterización de la vegetación, etapas de sucesión, estimación de biomasa o carbono de los diferentes compartimentos contenidos de carbono orgánico, materia orgánica, densidad aparente, propiedades físicas y químicas del suelo, fertilidad, caracterización de suelos, entre otros. La búsqueda se enfocó a nivel nacional y sin restricción del periodo de publicación.

Integración de la base de datos

Los documentos resultantes fueron depurados y se elaboraron dos archivos de Microsoft Excel^{MR} para sintetizar y sistematizar la información de cada documento. En el primer archivo se realizó un breve resumen de las diferentes publicaciones bajo el siguiente orden: identificador numérico secuencial del documento, tipo de documento (artículo, libro, capítulo de libro, tesis, tesina, informe técnico de proyecto, memoria de reunión científica, folleto o borrador), cita bibliográfica completa, título del artículo, autor (es), año de publicación, revista o editorial, resumen, coordenadas geográficas de los sitios, entidad federativa donde se realizó el trabajo, clima predominante, tipo de vegetación de acuerdo a Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y tipo de almacén que contiene datos (Figura 3).

El segundo archivo se integró con información a mayor detalle para cada uno de los almacenes:

- Código de autor (es): código de identificación del documento (en relación al archivo Catálogo de desglose de publicaciones de cronosecuencias.xlsx).

- Estado: entidad (es) federativa (s) donde se desarrolló el estudio,
- Lugar: nombre del lugar (es) donde se desarrolló el estudio (*i.e.* municipio, ejido, localidad, paraje, etc.).
- Clima del lugar donde se realizó el estudio.
- Nombre del sitio donde se midieron los datos de biomasa y/o carbono.
- Clave INEGI y descripción del tipo de vegetación en el sitio de medición.
- Listado de especies o cultivos en el sitio de medición.
- Estado sucesional: etiquetas nominales de Estado original 1 (de referencia) o al Estado sucesional 2 (inicial) de la vegetación en cada sitio.
- Edad del sitio en años.
- Año de Medición/Remediación: año en que se llevó a cabo la medición o la remediación de los sitios.
- Contenido de biomasa/carbono.
- Unidad del contenido de biomasa/carbono: se estandarizó a ton ha⁻¹.
- Dato de dispersión de la unidad del contenido de biomasa/carbono.
- Unidad del dato de dispersión de la unidad del contenido de biomasa/carbono (desviación estándar, coeficiente de variación, error estándar, entre otros).
- Unidad del contenido de biomasa: se uniformizó a Mg ha⁻¹.
- Dato estandarizado de carbono a ton ha⁻¹.
- Dato de dispersión de los datos de carbono (desviación estándar, coeficiente de variación, error estándar, entre otros).

La captura de los datos a partir de los documentos localizados se realizó de forma manual; sin embargo, en algunos documentos (*e.g.* Galicia *et al.*, 2015) los datos se presentaron en modo de gráficos por lo que se recurrió al software libre *GetData Graph Digitizer* para obtener datos aproximados mediante digitalización.

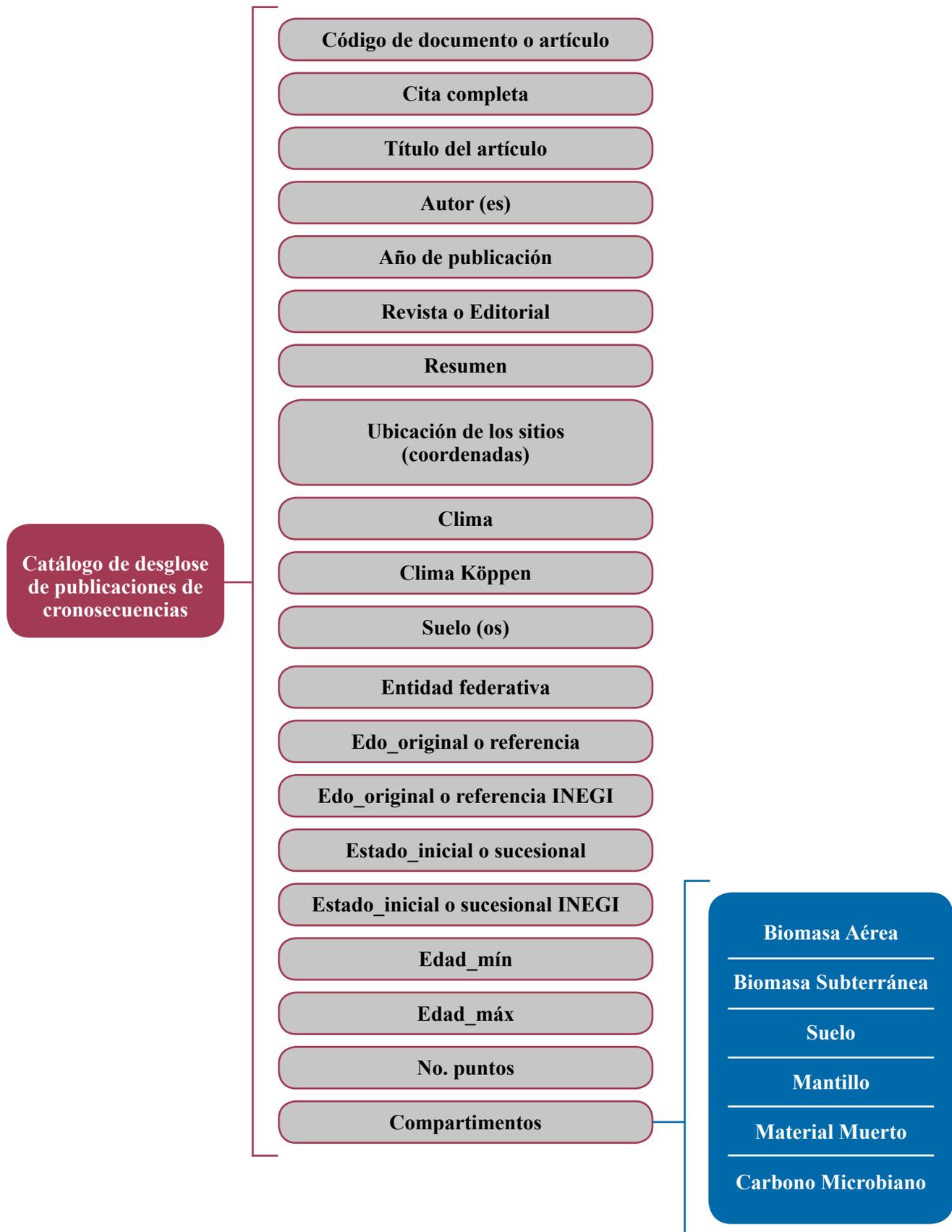


Figura 3. Catálogo de desglose de publicaciones de cronosecuencias.

Finalmente, los datos se agruparon conforme a los siete grandes grupos de vegetación propuestos por Challenger y Soberón (2008): los bosques tropicales perennifolios (selvas altas y medianas perennifolias y subperennifolias del trópico húmedo); los bosques tropicales caducifolios (selvas bajas y medianas caducifolias y subcaducifolias y las selvas espinosas); los bosques mesófilos de montaña (comunidades de gran diversidad en su estructura y composición, que comparten ambientes templados muy húmedos); los bosques templados de coníferas y latifoliadas (bosques de pino, oyamel, ayarín, cedro, táscate, de encinos y mixtos de pino y encino, en distintas proporciones); los matorrales xerófilos (diversas comunidades vegetales dominantes en los climas áridos y semiáridos, *i.e.* matorrales rosetófilos, desérticos, crasicaulos, submontanos y subtropicales, mezquiales y vegetación gipsófila y halófila); los pastizales (pastizal natural, pradera de alta montaña, sabana y pastizales gipsófilos y halófilos) y, los humedales (manglar, bosque y selva de galería).

Consideraciones técnicas

La base de datos de cronosecuencias sigue una numeración ascendente para su acceso y consulta rápida. Algunos casos de problemas asociados a la base de datos se discuten a continuación. En: Acosta, M., F. Carrillo, D. Delgado y E. Velasco. 2013. Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Izta-Popo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(26):6-29, solo se mencionó información del compartimento de biomasa aérea; sin embargo, en las pestañas (archivo Excel de la base de datos) siguientes a la fila referente a este artículo se colocó -999, haciendo alusión a que no se cuenta con esa información, debido, a que no fue parte del estudio.

Otro ejemplo de lo anterior es el trabajo de Contreras, M. J. 2014. Almacenes de carbono edáfico en sistemas productivos en la comunidad de Cevatí, San José del Rincón, Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México. 88 p., en el que solo se tiene información de carbono en el suelo.

Un ejemplo en donde sí se menciona una cronosecuencia definida por bosque maduro y bosque secundario es el artículo de Vargas, R., M. F. Allen and E. B. Allen. 2008. Biomass and carbon accumulation

in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology* 14:109–124.

Otro caso es el trabajo de Aguirre, C. A., J. R. Valdez, G. Ángeles, H. M. de los Santos, R. Haapanen y A. I. Aguirre. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43:209-220, en donde solo mencionan datos para los estados sucesionales.

Algunos artículos considerados solo hacían referencia al estado de sucesión, sin referirse a la edad, por ejemplo, el de Becerril, R., E. González, C. A. Mastachi, C. Díaz y N. M. Ramos. 2014. Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 1(1):9-18), se menciona la degradación del área sin mencionar la edad.

Conforme a las premisas, un bosque bajo manejo forestal puede considerarse como ejemplo de cronosecuencia, debido a que los tratamientos silvícolas son en sí una perturbación. Se ocuparon algunos documentos que hacían referencia a esta condición; ejemplo de ello es el de Chávez, G., G. Ángeles, M. Pérez, M. A. López, E. García y C. Wayson. 2016. Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 22 (3):23-36).

Algunos documentos hacían referencia a una edad específica; por ejemplo, el de Pacheco, F. C., A. Aldrete, A. Gómez, A. M. Fierros, V. M. Cetina y H. Vaquera 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30 (3):251-254, en cuyo estudio calcularon la biomasa y el carbono de una plantación de *Pinus greggii* a la edad de seis años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo se identificaron 90 estudios de investigación en México relacionados con los contenidos de carbono bajo cronosecuencias (Figura 4). Geográficamente, el 59% de los estudios se ubicaron en sur del país (incluido Veracruz), 22% de las investigaciones se localizaron en las entidades de la zona centro y 19% en los estados del norte de la república mexicana. El 93% de los trabajos, se circunscriben a alguna entidad federativa, mientras que seis trabajos reportan datos a nivel regional (Mejía, 2006; Urquiza *et al.*, 2007; Eaton y Lawrence, 2008; Nívar, 2008; Yereña *et al.*, 2014; Kauffman *et al.*, 2015).

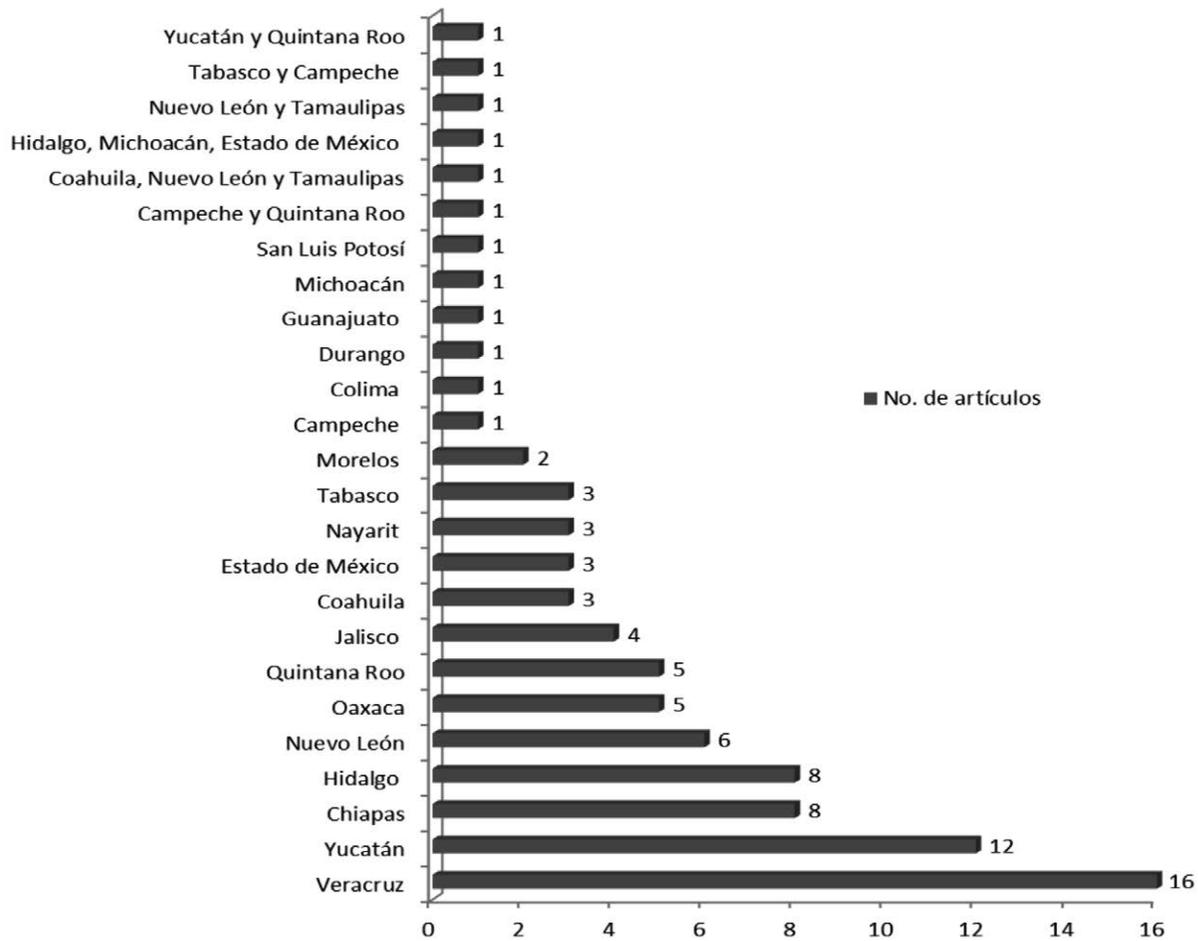


Figura 4. Número de investigaciones relacionadas a contenidos a de carbono bajo la metodología de cronosecuencias en México.

La revisión incluyó literatura convencional y gris. De acuerdo con la distribución que se presenta en el Cuadro 1; la mayor producción científica se concentra en los trabajos de artículos científicos, en esta revisión se incluyeron revistas indizadas o revisadas por pares (72); seguida de trabajos de tesis que incluye los niveles de licenciatura, maestría y doctorado (16), en

tanto que se identificaron dos informes (literatura gris). Las revistas Madera y Bosques, Revista Mexicana de Ciencias Forestales, Agrociencia y Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, son las editoriales con mayor número de artículos dedicados a la investigación de carbono en cronosecuencias (Cuadro 1).

Cuadro 1. Trabajos de investigación de contenidos de carbono en cronosecuencias por casa editorial.

Editorial	Artículo	Informe	Tesis
Acta Agronómica	1		
Acta Botánica Mexicana	1		
Agriculture, Ecosystems and Environment	2		
Agrociencia	5		
Agroforest Systems (Agroforest Syst.)	1		

Editorial	Artículo	Informe	Tesis
American Geophysical Union	1		
Applied Soil Ecology	2		
Aquatic Botany	1		
Avances en Investigación Agropecuaria	1		
Biotropica	2		
Boletín de la Sociedad Botánica de México (Bol. Soc. Bot. Méx.)	1		
Botanical Sciences	1		
BUAP			1
CP, SEMARNAT, CONAFOR, Fortalecimiento REDD+ y Cooperación Sur-Sur, Norwegian Ministry of Foreign Affairs, PNUD y FAO		1	
Carbon Balance and Management	1		
CICY			2
Ciencia e Investigación Forestal-Instituto Forestal/Chile	1		
CIENCIA UANL	1		
COLPOS			2
CONANP, Cinvestav, FMCN, USFS y USAID		1	
Ecological Applications	2		
Ecology	1		
Ecosistemas y recursos agropecuarios	1		
ECOSUR			2
Ecosystems	2		
Fire Ecology	1		
Forest Ecology and Management	2		
Foresta Veracruzana	1		
Forestry	1		
Global Change Biology	1		
Interciencia	2		
Journal of Agricultural Science	1		

Continuación Cuadro 1...

Editorial	Artículo	Informe	Tesis
Journal of Tropical Ecology	1		
Madera y Bosques	6		
New Phytologist	1		
Nutrient Cycling in Agroecosystems (Nutr. Cycl. Agroecosyst.)	1		
PMC, COLPOS, UACH e ITESM	1		
Polibótanica	1		
Restoration Ecology	1		
Revista de Biología Tropical-International Journal of Tropical Biology and Conservation- (Rev. Biol. Trop. -Int. J. Trop. Biol.-)	1		
Revista Fitotecnia	1		
Revista Mexicana de Ciencias Forestales (Rev. Mexicana Cien. For.)	6		
Revista Amazónica Ciencia y Tecnología	1		
Revista Bio Ciencias	1		
Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente	4		
Revista Fitotecnia Mexicana	1		
Revista Forestal Venezolana	1		
Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales	1		
Soil & Tillage Research	1		
Terra Latinoamericana	1		
Tropical and Subtropical Agroecosystems	2		
UAAAN			2
UACH			1
UAEM			2
UANL			2
UNACAR TECNOCENCIA	1		
UNAM			2
Wetlands Ecology and Management (Wetlands Ecol. Manage.)	1		

Los contenidos de carbono en cronosecuencias se reportan por compartimento como sugiere el IPCC (2003), Figura 5. El compartimento más investigado es el de biomasa viva sobre el suelo (56 estudios), seguido de la biomasa muerta en piso

y mantillo (40). La revisión permitió conocer que solo seis investigaciones incluyen datos de los cinco compartimentos (Jaramillo *et al.*, 2003a y b; Roncal *et al.*, 2008; Orihuela *et al.*, 2013; Aryal *et al.*, 2014; Masuhara *et al.*, 2015).

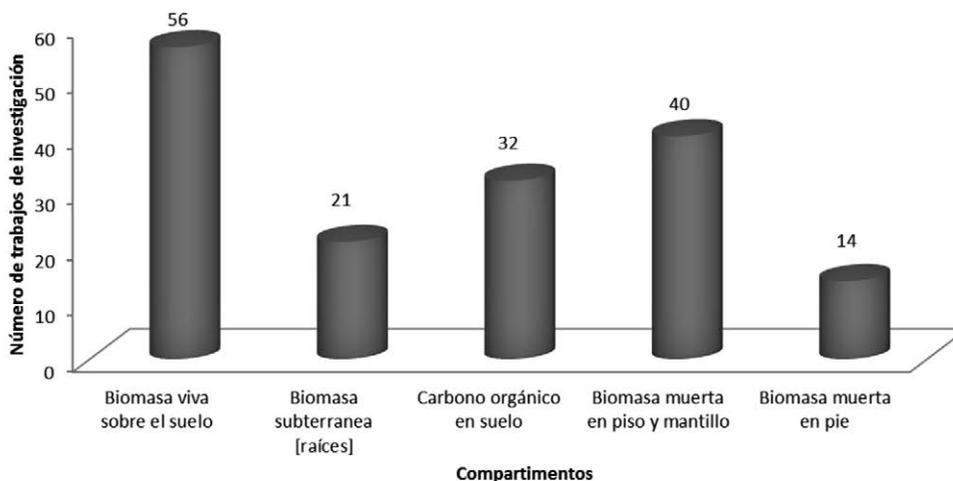


Figura 5. Número de investigaciones relacionadas a contenidos de carbono en cronosecuencias en México por tipo de compartimento IPCC.

En México, históricamente se ha hecho un esfuerzo creciente por investigar los contenidos de carbono en los cinco almacenes de los ecosistemas terrestres (Figura 6). Resulta importante señalar la variabilidad de enfoques con los que se han investigado los contenidos

de carbono en cronosecuencias. A partir del año 2008, se realizaron trabajos de investigación con enfoques diversos y la mayoría de los estudios realizaron mediciones en más de un almacén de carbono.

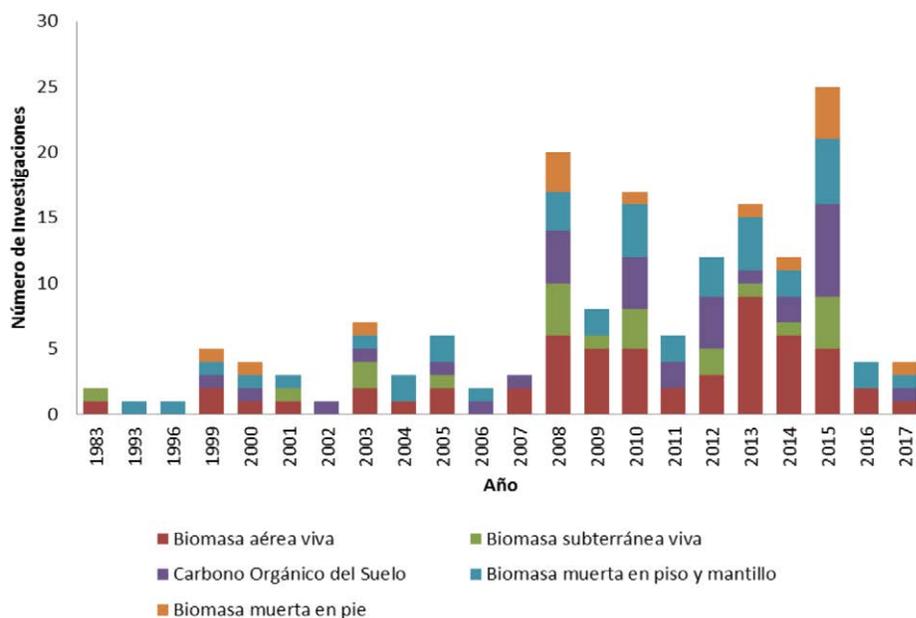


Figura 6. Histórico de investigaciones relacionadas a contenidos de carbono en cronosecuencias en México por tipo de compartimento IPCC.

El enfoque dado en las primeras investigaciones se perfiló en medir la producción de biomasa y su relación con los nutrientes del suelo (Williams, 1983; Martínez *et al.*, 1993; Day *et al.*, 1996; Hughes *et al.*, 1999). A partir de 1999, se mantuvo la idea de mediciones de producción de biomasa, pero bajo el método de ecuaciones alométricas. Los estudios desde el año 2004 sugieren temas de investigación diversos tales como medición de flujos de emisión y captura de CO₂ (Návar, 2008), captura de carbono en suelo y vegetación (Vargas *et al.*, 2009a y b; Casanova *et al.*, 2010; Figueroa *et al.*, 2010; Gamboa *et al.*, 2010; Mendoza *et al.*, 2010; López *et al.*, 2013; Reyes *et al.*, 2013; Rivas, 2013; Rivera, 2013; Ramírez, 2015; Chávez *et al.*, 2016; Huechacón, 2016; Mendoza *et al.*, 2016; Chávez *et al.*, 2017). A partir del año 2010 los estudios se dirigen hacia las estimaciones de contenidos de carbono para pagos por servicios ambientales a los poseedores de los recursos naturales (Moreno *et al.*, 2010; Soto *et al.*, 2010; Aguirre *et al.*, 2011; Castañeda *et al.*, 2012; Espinoza *et al.*, 2012; Gómez *et al.*, 2012; Gutiérrez *et al.*, 2012; Murray *et al.*, 2012; Puc-Kauil *et al.*, 2013; Razo *et al.*, 2013; López *et al.*, 2016; Salvador *et al.*, 2017), otros hacia evaluaciones de impacto y mitigación al cambio climático (Pavón *et al.*, 2012; Anguiano *et al.*, 2013; Douterlungne, 2013; Soto y Armijo, 2014; Yerena *et al.*, 2014) y, finalmente se han orientado las investigaciones sobre la dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación por deforestación y degradación forestal (Lawrence *et al.*, 2013; Salazar *et al.*, 2013; Aquino, 2014; Aryal *et al.*, 2014; Puc, 2014; Romo *et al.*, 2014; Anaya y Huber, 2015; Arévalo, 2015; Aryal *et al.*, 2015; Galicia *et al.*, 2015; Kauffman *et al.*, 2015; Quintero *et al.*, 2015; Yerena *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de las bases de datos generadas asociadas a cronosecuencias, de los diferentes almacenes de carbono de los ecosistemas terrestres de México, permitirá el estudio de su dinámica; aunque por el momento solo se tenga información de 21 de los 50 tipos de vegetación del sistema de clasificación del INEGI. Por lo anterior, se recomienda la búsqueda de nuevas bases de datos para cubrir las deficiencias detectadas.

De los análisis realizados destaca la urgencia de uniformizar metodologías de muestreo en campo, así como de análisis de laboratorio, para hacer interoperables los esfuerzos de investigación y

caracterización de la dinámica del carbono en los ecosistemas terrestres de México.

Como parte de la política del Programa Mexicano del Carbono de datos abiertos y de interoperabilidad, la base de datos generada es pública y se encuentra disponible en: http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/cronosecuencias.php.

LITERATURA CONVENCIONAL CITADA

- Acosta, M., F. Carrillo, D. Delgado y E. Velasco. 2013. Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Izta-Popo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(26):6-29.
- Aguirre, C. O. A. y P. J. Jiménez. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6):73-84.
- Aguirre, C. A., J. R. Valdez, G. Ángeles, H. M. de los Santos, R. Haapanen y A. I. Aguirre. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43:209-220.
- Ahirwal, J. y S. Maiti K. 2017. Assessment of carbon sequestration potential of revegetated coal mine overburden dumps: A chronosequence study from dry tropical climate. *Journal of Environmental Management* 201:369-377.
- Anaya, C. A. y E. Huber S. 2015. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East Mexico. *Soil and Tillage Research* 147:20-29.
- Anguiano, J. M., J. Aguirre y M. Palma J. 2013. Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria* 17(1):149-160.
- Aryal, D., B. de Jong, S. Ochoa, L. Esparza and J. Mendoza. 2014. Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 195:220-230.
- Aryal, D., B. de Jong, S. Ochoa, J. Mendoza and L. Esparza O. 2015. Successional and seasonal variation in litterfall and associated nutrient transfer in semi-evergreen tropical forests of SE México. 103(1):45-60.
- Becerril, R., E. González, C. A. Mastachi, C. Díaz y N. M. Ramos. 2014. Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 1(1):9-18.
- Casanova, L., J. Caamal, J. Petit, F. Solorio y J. Castillo. 2010. Acumulación de carbono en la biomasa de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* asociadas y en monocultivo. *Revista Forestal Venezolana* 54(1):45-50.



- Castañeda, M., J. J. Vargas and A. Gómez. 2012. Components of net aerial primary production in a *Bambusa oldhamii* plantation. *Agrociencia* 46:63-74.
- Challenger, A. y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres, en *Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México. pp. 87-108.
- Chávez, G., G. Ángeles, M. Pérez, M. A. López, E. García y C. Wayson. 2016. Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 22(3):23-36.
- Chávez, E. Y., G. Rodríguez, R. Enríquez del V., V. A. Velasco y M. Gómez. 2017. Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques* 23
- Chazdon, R. L., S. G. Letcher, M. van Breugel, M. Martínez, F. Bongers and B. Finegan. 2007. Rates of change in tree communities of secondary neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 326:273-289.
- Day, J. W., C. Coronado, F. R. Vera, R. Twilley, V. H. Rivera, H. Alvarez, R. Day and W. Conner. 1996. A 7-year record of above-ground net primary production in a southeastern mexican mangrove forest. *Aquatic Botany* 55(1):39-60.
- Eaton, J. M. and D. Lawrence. 2008. Loss of carbon sequestration potential after several decades of shifting cultivation in the southern Yucatan. *Forest Ecology and Management* 258:949-958.
- Espinoza, D. W., L. Krishnamurthy, A. Vázquez y A. Torres. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(1):57-70.
- Figueroa, C. M., G. Ángeles, A. Velázquez y H. M. de los Santos. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1):105-112.
- Galicia, L., V. Saynes y J. Campo. 2015. Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences* 93(3):473-484.
- Gamboa, A. M., C. Hidalgo, F. de León, J. Etchevers, J. F. Gallardo and J. Campo. 2010. Nutrient addition differentially affects soil carbon sequestration in secondary tropical dry forests: early-*versus* late-succession stages. *Restoration Ecology* 18(2):252-260.
- Gómez, J. D., A. I. Monterroso, J. A. Tinoco y J. D. Etchevers. 2012. Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamericana* 30(2):177-187.
- Gutiérrez, M. H., J. Méndez, C. Flores, J. A. Ramírez y B. N. Gutiérrez. 2012. Caída de hojarasca en plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus cembroides* Zucc., en Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35(2):123-133.
- Hughes, R. F., B. Kauffman and V. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology* 80(6):1892-1907.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 2003. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS). Organización Meteorológica Mundial. Génova, Suiza. 633 p.
- Jaramillo, V., R. Ahedo and B. Kauffman. 2003a. Root biomass and carbon in a tropical evergreen forest of Mexico: changes with secondary succession and forest conversion to pasture. *Journal of Tropical Ecology* 19(04):457-464.
- Jaramillo, V., B. Kauffman, L. Rentería, L. Cummings and J. Ellingson. 2003b. Biomass, carbon, and nitrogen pools in mexican tropical dry forest landscapes. *Ecosystems* 6:609-629.
- Johnson, E. A. and K. Miyanishi. 2008. Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology Letters* 11(5):419-431.
- Kauffman, J. B., H. Hernández T., M. C. Jesus, C. Heider and M. Contreras W. 2015. Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, México. *Wetlands Ecology and Management* 24(2): 203-216.
- Lawrence, D., F. M. Vester H., D. Pérez S., R. Eastman J., L. Turner B. and J. Geoghegan. 2013. Integrated analysis of ecosystem interactions with land-use change: the southern Yucatán peninsular region. pp. 277-292. *In: Defries, R. S., G. P. Asner and R. A. Houghton (eds.). Ecosystem and Land Use Change. Geophysical Monograph Series 153. American Geophysical Union.*
- López, H. J. M., H. González R., R. G. Ramírez L., I. Cantú S., M. V. Gómez M., M. Pando M. y A. E. Estrada C. 2013. Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del Estado de Nuevo León, México. *Polibotánica* 35:41-64.
- López, R. L. Y., M. Domínguez D., P. Martínez Z., J. Zavala C., A. Gómez G. y S. Posada C. 2016. Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y Bosques* 22(3):49-60.
- Martínez, Y. A. y J. Sarukhán. 1993. Cambios estacionales del mantillo en el suelo de un bosque tropical caducifolio y un subcaducifolio en Chamela, Jalisco, México. *Acta Botánica Mexicana* 21:1-6.
- Masuhara, A., E. Valdés, J. Pérez, D. Gutiérrez, J. Cutberto V., E. Salcedo P., M. J. Juárez H. y A. Merino G. 2015. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología* 4(1):66-93.
- Mendoza, M. A. J., G. González S. y C. Aguilar B. 2016. Producción espacial y temporal de hojarasca del manglar en la laguna Barra de Navidad, Jalisco, México. *Revista de Biología Tropical (International Journal of Tropical Biology and Conservation)* 64(1):259-273.

- Mendoza, P. A. y L. Galicia. 2010. Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83(5):497-506.
- Moreno, M. G. J., J. G. Cerón B., R. M. Cerón B., J. J. Guerra S., L.E. Amador A. y E. Endañú H. 2010. Estimación del potencial de captura de carbono en suelos de manglar de Isla del Carmen. *UNACAR TECNOCENCIA* 4(1):23-39.
- Murray, N. R. M., J. I. Bojórquez S., A. Hernández J., J. D. García P., A. Madueño M., R. Bugarín M. y M. G. Orozco B. 2012. Pérdidas de carbono en suelos de la llanura costera de Nayarit, México. *Revista Bio Ciencias* 1(4):38-46.
- Návar, C. J. J. 2008. Carbon fluxes resulting from land-use changes in the tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance and Management* 3:6.
- Orihuela, B. D. E., B. de Jong, J. Mendoza V., J. Van der W., F. Paz P., L. Soto P. and A. Flamenco S. 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 171:72-84.
- Pacheco, F. C., A. Aldrete, A. Gómez, A. M. Fierros, V. M. Cetina y H. Vaquera 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(3):251-254.
- Pavón, N. P., E. Moreno C. y A. Ramírez B. 2012. Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(3):303-312.
- Powell, M. H. D. 1998. Carbon sequestration and sustainable coffee in Guatemala (No. 633.73 P885). Winrock International, Arkansas AR, USA.
- Puc-Kauil, R., G. Ángeles P., F. O. Plascencia E. y X. García C. 2013. Potencial de acumulación de biomasa y carbono aéreo en bosques tropicales del sur de Quintana Roo, México. pp. 144-148. En: Paz, F., J. Wong, M. Bazán y V. Saynes (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013*. PMC, COLPOS, UACH. e ITESM. Texcoco, México. 696 p.
- Quintero, G. S. D., F. García O., R. Cuevas G., E. J. Jardel P. and A. Martínez Y. 2015. Soil carbon and nutrient recovery after high-severity wildfire in Mexico. *Fire Ecology* 11(3) 45-61.
- Razo, Z. R., A. J. Gordillo M., R. Rodríguez L., C. C. Maycotte M. y O. A. Acevedo S. 2013. Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 19(2):73-86.
- Reyes, C. S. A., J. Méndez G., J. A. Nájera L. y J. Cerano P. 2013. Producción de hojarasca en un rodal de *Pinus cembroides* Zucc. en Arteaga, Coahuila, México y su relación con las variables climáticas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(1):147-155.
- Rivera, V. R., L. Soto P., C. A. Núñez C., B. de Jong, M. G. Hernández R. y A. B. Ordóñez D. J. 2013. Producción y tasa de descomposición de hojarasca en acahuales de selva caducifolia en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(20):20-30.
- Romo, G. D., H. Navarro G., H. M. de los Santos P., O. Hernández R. y J. López U. 2014. Crecimiento maderable y biomasa aérea en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* schiede ex Schltdl. Et cham. en Zacualpan, Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(23):78-91.
- Roncal, G. S., L. Soto P., J. Castellanos A., N. Ramírez M. y B. de Jong. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia* 33(3):200-206.
- Salvador, M. P., R. Sánchez H., D. Sánchez G., U. López N., G. Alejo S., E. Valdés V. and J. F. Gallardo L. 2017. Evolution of soil organic carbon during a chronosequence of transformation from cacao (*Theobroma cacao* L.) plantation to grassland. *Acta Agronómica* 66(4):525-530.
- Soto, P. L. and C. Armijo F. 2014. Changes in agroecosystem structure and function along a chronosequence of taungya system in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science* 6(11):43-57.
- Soto, P. L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jiménez F. and B. de Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 78:39-51.
- Urquiza, H. T., M. Dolman P. and A. Pérez C. 2007. Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: effects of forest disturbance. *Forest Ecology and Management* 247:80-90.
- van Breugel, M., M. Martínez R. and F. Bongers. 2006. Community dynamics during early secondary forest succession in Mexican tropical rain forests. *Journal of Tropical Ecology* 22:663-674.
- Vargas, R., B. Allen E. and F. Allen M. 2009a. Effects of vegetation thinning on above- and belowground carbon in a seasonally Dry Tropical Forest in Mexico. *Biotropica* 41(3):302-311.
- Vargas, R., M. F. Allen and E. B. Allen 2008. Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology* 14:109-124.
- Vargas, R., E. Trumbore S. and F. Allen M. 2009b. Evidence of old carbon used to grow new fine roots in a tropical forest. *New Phytologist* 182:710-718.
- Vesterdal, L., E. Ritter and P. Gundersen. 2002. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management* 169(1):137-147.
- Walker, L. R., A. Wardle D., D. Bardgett R. and D. Clarkson B. 2010. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development. *Journal of Ecology* 98(4):725-736.

- Williams, L. G. 1983. Biomass and nutrient content in two successional stages of tropical wet forest in Uxpanapa, Mexico. *Biotropica* 15(4):275-284.
- Yerena, Y. J. I., J. Jiménez P., E. Alanís R., O. A. Aguirre C., M. A. González T. y E. J. Treviño G. 2014. Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 17:113-121.
- Yerena, Y. J. I., J. Jiménez P., E. Alanís R., M. Pompa G., O. A. Aguirre C. y E. J. Treviño G. 2015. Contenido de carbono en la biomasa aérea del mezquital con historial agrícola, en México. *Interciencia* 40(10):722-726.
- Nuevo León. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 61 p.
- Salazar, de la C. C. G. 2013. Análisis de sucesión vegetal y captura de carbono en áreas perturbadas del matorral espinoso tamaulipeco, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. 47 p.

LITERATURA GRIS CITADA

- Aquino, A. A. 2014. Caída de hojarasca en tres ambientes contrastantes del trópico seco de Veracruz: selva mediana subcaducifolia, acahual y matorral sobre dunas costeras. Tesis Profesional. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. 112 p.
- Arévalo, M. R. M. 2015. Estimación de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo, entre rodales, en un bosque de *Pinus rudis* en la Sierra el Coahuilón, Arteaga, Coahuila. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 73 p.
- Contreras, M. J. 2014. Almacenes de carbono edáfico en sistemas productivos en la comunidad de Cevatí, San José del Rincón, Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México. 88 p.
- Douterlungne, D. 2013. Árboles de rápido crecimiento para la restauración ecológica y la captura de carbono en el trópico húmedo de México. Tesis de Doctorado. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México. 94 p.
- Huechacona, R. A. H. 2016. Dinámica de la producción de hojarasca y el índice de área foliar en un bosque tropical seco en Yucatán. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C. Yucatán, México. 111 p.
- Mejía, S. L. 2006. Potencial de acumulación de carbono del componente edáfico, en reforestaciones de diversas especies de pino. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 102 p.
- Puc, K. R. 2014. Acumulación de biomasa y carbono aéreo en bosques tropicales secundarios del sur de Quintana Roo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 119 p.
- Ramírez, G. M. A. 2015. Estimación del carbono retenido en la biomasa aérea, en una selva tropical del Yucatán. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C. Yucatán, México. 93 p.
- Rivas, del B. V. M. 2013. Análisis de biomasa aérea en un rodal joven de *Pinus rudis* Endl. en San José de la Joya, Galeana,