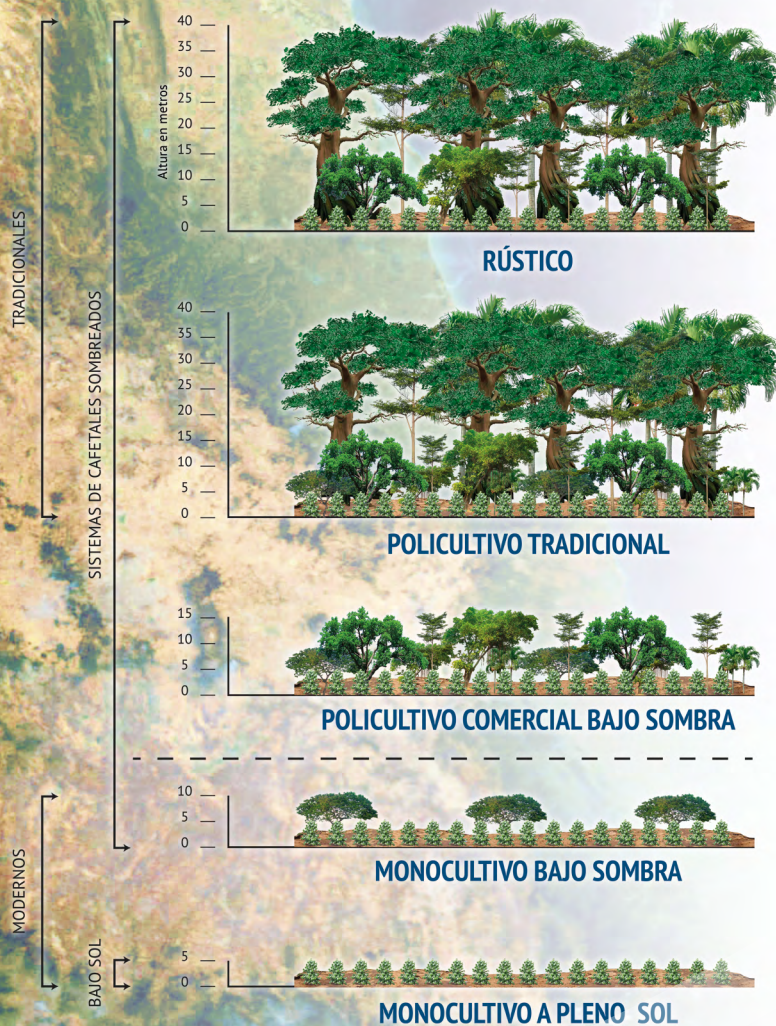
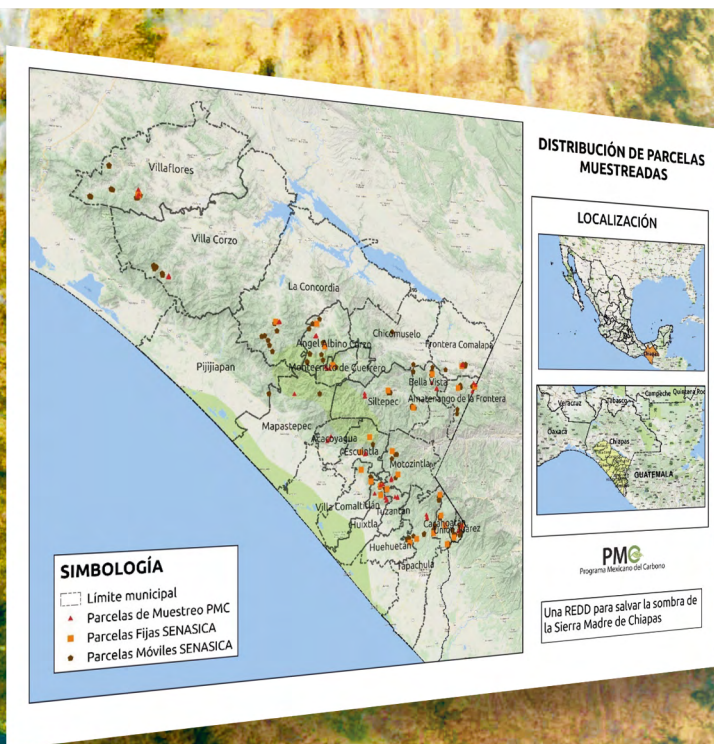




Elementos para Políticas Públicas

Volumen 6 • Número 2 • mayo - agosto de 2022



Ciclo del Carbono y sus Interacciones



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL CONACYT



Elementos para **Políticas Públicas**

Volumen 6 • Número 2 • Mayo - Agosto de 2022

Ciclo del Carbono
y sus Interacciones



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL **CONACYT**

ELEMENTOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS. Volumen 6, No. 2, mayo - agosto de 2022. Es una publicación cuatrimestral editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C. (PMC), Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmc carbono.org, coordinacion_general@pmc carbono.org. Editor responsable: Alma S. Velázquez Rodríguez. RESERVAS DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO No. 04-2015-120910081700-203, ISSN 2448-5578. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Alma S. Velázquez Rodríguez, Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, diciembre de 2022.

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

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



Elementos para **Políticas Públicas**

Comité Editorial

Dra. Alma Velázquez Rodríguez

EDITORA EN JEFE

Dr. Fernando Paz Pellat

CO-EDITOR

C.G. Oscar Velázquez Rodríguez

EDITOR DE MAQUETACIÓN

Coordinación Editorial

Alma Velázquez

COORDINADOR DEL PROCESO DE ARBITRAJE

Oscar Velázquez

COORDINADOR DE DISEÑO

Antoine Libert

CORRECCIÓN DE TEXTOS EN INGLÉS

Cristopher Escalera

WEB MASTER Y SOPORTE TÉCNICO

Consejo Editorial

Dr. Ben de Jong

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. Felipe García Oliva

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Georgina C. Sandoval Fabián

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

Dr. Guillermo Jiménez Ferrer

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. J. Martín Hernández Ayón

Universidad Autónoma de Baja California, México.

Dr. Jaime Garatuza Payán

Instituto Tecnológico de Sonora, México.

Dr. Jorge D. Etchevers Barra

Colegio de Postgraduados, México.

Dr. Jorge Herrera Silveira

Instituto Politécnico Nacional, México.

Dra. Leticia Merino Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Mariela Fuentes Ponce

Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Consejo Editorial

Dr. Mario G. Manzano Camarillo

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

Dr. Omar R. Masera Cerutti

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dr. Oscar L. Briones Villarreal

Instituto de Ecología, A.C., México.

Dr. Ramón Sosa Ávalos

Universidad de Colima, México.

Dr. Tulio Arredondo Moreno

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

Dr. Christian Prat

Institut de Recherche pour le Développement, Francia.

Dr. Juan F. Gallardo Lancho

Consejo Superior de Investigación Científica, España.

Dr. Rodrigo Vargas

University of Delaware, U.S.A.

Dr. Werner Kurz

Canadian Forest Service, Canadá.

Índice de Autores

Alma S. Velázquez Rodríguez

Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,
Universidad Autónoma del Estado de México,
Toluca, Estado de México, México.

Antoine Libert Amico

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

Cristóbal Sánchez Sánchez

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

Fernando Paz Pellat

Programa Mexicano del Carbono,
Texcoco, Estado de México, México.
GRENASER, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo,
Texcoco, Estado de México, México.

Martín A. Bolaños González

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

Víctor Manuel Salas Aguilar

Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
Chihuahua, Chihuahua, México.

El Programa Mexicano del Carbono (PMC) inició operaciones en Chiapas alrededor del 2009 y desde entonces se ha estado trabajando en el desarrollo de los mercados del Carbono. A partir del 2016 el PMC organizó campañas orientadas, principalmente, al seguimiento del efecto de la epidemia de la roya (*Hemileia vastatrix*) en los cafetales bajo sombra. Derivado de estos trabajos iniciales y en conjunto con instituciones de educación superior, se planteó un proyecto de investigación para consolidar diversas intervenciones con relación a la roya en cafetales bajo sombra. El proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” fue aprobado por el CONACYT para realizarse en el periodo 2022-2024.

Como parte del proyecto del CONACYT, el equipo de trabajo ha desarrollado diversas contribuciones, las cuales se presentan en este número de *Elementos para Políticas Públicas*, con una visión orientada a generar elementos para una estrategia de mercados de Carbono, particularmente enfocada a mercados “premium”.

En un par de contribuciones se presentan enfoques de desarrollo para la consideración de la diversidad vegetal, en especial de la sombra arbórea. Para ello, se presentan relaciones para la riqueza de plantas vasculares y los tipos funcionales, con enfoques novedosos para simplificar los requisitos para incorporar la riqueza de plantas y tipos funcionales, a través de relaciones matemáticas que reducen la complejidad de los parámetros a utilizar en la caracterización de la diversidad.

Los servicios hidrológicos de los cafetales bajo sombra se evalúan con el modelo MEJICO, el cual caracteriza la recarga de agua subterránea, el escurrimiento superficial y la erosión de los suelos, para definir métricas relacionadas con el agua, que puedan integrarse con las del Carbono.

Los almacenes de Carbono de los cafetales bajo sombra se caracterizan y valoran, con la finalidad de que participen en la iniciativa del Banco del Carbono del PMC. Dicha evaluación permite revisar su factibilidad financiera, independientemente de otros elementos a incorporar (agua y diversidad vegetal).

Contenido

Caracterización de los almacenes de carbono, estructura y diversidad de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, México <i>Fernando Paz Pellat, Víctor M. Salas Aguilar, Cristóbal D. Sánchez Sánchez, Antoine Libert Amico, Martín A. Bolaños González.</i>	101
Diversidad vegetal en cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, México <i>Fernando Paz Pellat, Víctor M. Salas Aguilar, Cristóbal Sánchez Sánchez, Antoine Libert Amico, Martín A. Bolaños González.</i>	123
Servicios hidrológicos de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, México <i>Fernando Paz Pellat, Víctor M. Salas Aguilar, Martín A. Bolaños González.</i>	139
Funciones de escala para las relaciones riqueza de especies – área y riqueza de tipos funcionales – área de los cafetales bajo sombra y vegetación natural de la Sierra Madre de Chiapas, México <i>Fernando Paz Pellat, Víctor M. Salas Aguilar, Cristóbal Sánchez Sánchez, Martín A. Bolaños González.</i>	151
Mercados de carbono para los cafetales bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas <i>Fernando Paz Pellat, Víctor M. Salas Aguilar, Alma S. Velázquez Rodríguez, Antoine Libert Amico, Martín A. Bolaños González.</i>	165

CARACTERIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE CARBONO, ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD DE LOS CAFETALES BAJO SOMBRA Y VEGETACIÓN NATURAL EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MÉXICO

CHARACTERIZATION OF CARBON STOCKS, STRUCTURE AND DIVERSITY OF SHADED COFFEE PLANTATIONS AND NATURAL VEGETATION IN THE SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MEXICO

Fernando Paz^{1†}, Víctor Salas², Cristóbal Sánchez³, Antoine Libert⁴ y Martín A. Bolaños⁵

¹ Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.

² Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³ Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo, Estado de México, México.

⁴ Programa Mexicano del Carbono, Estado de México, México.

⁵ Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, Estado de México, México.

† Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

La cafeticultura bajo sombra es una actividad de alta importancia en México, particularmente en la Sierra Madre de Chiapas, ya que es una actividad que está entre conservación y producción, con alto impacto en los medios de vida de pequeños productores e indígenas. En los cafetales bajo sombra, los arbustos de café arábigo son cultivados bajo árboles con diferentes composiciones, que se caracteriza por una tipología de cafetales. Con base en la tipología definida por Moguel y Toledo, se muestrearon 82 sitios ubicados en la Sierra Madre de Chiapas en México. En cada sitio se caracterizaron los almacenes de carbono por componentes (biomasa aérea viva, herbáceas, biomasa subterránea muerta, árboles muertos en pie, tocones, mantillo, material leñoso caído, principalmente), además de variables asociadas a la estructura y composición de la sombra de los cafetales y vegetación natural de referencia. En 10 sitios se detectaron inconsistencias en sus datos, por lo que solo se utilizaron 72 sitios de muestreo para el presente análisis. La caracterización de los almacenes de carbono por componentes, la estructura (densidad arbórea por estratos de altura, cobertura aérea, densidad de cafetos y de árboles, etc.) y diversidad (número de especies de árboles, arbustos, hierbas, lianas y epífitas) fue revisada para los distintos tipos de cafetales y analizada con relación a su uso en la discriminación de los cafetales bajo sombra. Los resultados muestran una capacidad limitada de discriminación de cafetales y vegetación natural, la cual se puede incrementar al considerar el uso de los árboles de la sombra, particularmente para los almacenes de carbono.

Palabras clave: *tipología de cafetales; campaña de muestreo; componentes de la vegetación; discriminación de cafetales; uso árboles de la sombra.*

ABSTRACT

Shade-grown coffee farming is an activity of great importance in Mexico, particularly in the Sierra Madre de Chiapas, since it is a hybrid between conservation and production, with a high impact on the livelihoods of small and indigenous producers. In shaded coffee plantations, Arabica coffee trees are grown under trees of different compositions, which define a typology of coffee plantations, which is analyzed. Based on the typology defined by Moguel and Toledo, a sampling campaign was carried out in 82 sites distributed in the Sierra Madre de

Chiapas, Mexico for the characterization of carbon stores by components (living aerial biomass, herbaceous, dead underground biomass, standing dead trees, stumps, topsoil, fallen woody material, mainly), in addition to variables associated with the structure and composition of the shade of coffee plantations and reference natural vegetation. After reviewing the measurement database, 72 sampling sites were selected for analysis. The characterization of carbon stores by components, structure (tree density by height strata, aerial cover, density of coffee trees and trees, etc.) and diversity (number of species of trees, shrubs, herbs and lianoids and epiphytes) was reviewed for the different types of coffee plantations and analyzed in relation to its use in discriminating shaded coffee plantations. The results show a limited ability to discriminate between coffee plantations and natural vegetation, which can be increased by considering the use of shade trees, particularly for carbon stores.

Keywords: *typology of coffee plantations; sampling campaign; vegetation components; discrimination of coffee plantations; use of shade trees.*

INTRODUCCIÓN

La producción de café bajo sombra y orgánico, es el medio de vida de un número importante de productores de bajos ingresos y alta marginalidad, ubicados predominantemente en el sureste de México (Libert Amico *et al.*, 2020). Los problemas asociados al cambio climático (*e.g.* plagas y enfermedades), además de factores de mercado (*e.g.* precios inestables del café) y de salud (*e.g.* Covid-19) han reducido las opciones de medios de vida, orillando a los productores a cambios de uso del suelo en ecosistemas de montaña, llevando a la deforestación y degradación forestal, y a esquemas marginales de medios de vida, que a su vez incrementan su vulnerabilidad ante escenarios adversos en el futuro. Esta es una problemática generalizada a la escala nacional para los productores de café. Aunque el café se produce en 15 estados de México con una superficie de aproximadamente 620 000 ha, Chiapas es el principal productor a nivel nacional (SAGARPA, 2017). El estado de Chiapas, con el 41 por ciento de la producción nacional (CEDRSSA, 2019), es también representativo de la producción bajo sombra y orgánico, cuyo “café gourmet” de alta calidad (*Coffea arabica*) no sólo sustenta la economía regional, sino que asegura la provisión de servicios ecosistémicos (servicios ambientales hidrológicos, captura de carbono, alimento para polinizadores, entre otros) y hábitats para la biodiversidad de flora y fauna. Con una historia cafetalera de casi 200 años y una amplia variedad de unidades de producción que siembran café dentro de la zona de influencia de áreas naturales protegidas (ANP), la Sierra Madre de Chiapas representa el 54% de la superficie sembrada

con café en el estado (SAGARPA, 2017) y ha sido fuente preferencial de productos de calidad derivados de la variedad *C. arabica* comercializados en nichos de café gourmet del mercado internacional.

México, desde 1981, ha padecido la roya del café, la cual es una enfermedad provocada por el hongo *Hemileia vastatrix*, un hongo con presencia en el continente americano desde 1979. En 2012 un brote atípico en el sureste mexicano provocó severas pérdidas para la producción cafetalera nacional y puso en riesgo las estrategias de vida locales (Avelino *et al.*, 2015; Libert-Amico *et al.*, 2016 y 2020). Este brote de roya fue parte de una epidemia de alcance regional, que generó entre 2012 y 2015 pérdidas de producción importantes en café arábigo con relación a años previos a éste (Libert-Amico *et al.*, 2020).

La región de la Sierra Madre de Chiapas se caracteriza por tener condiciones de bajo desarrollo socioeconómico y pobreza, donde habitan comunidades indígenas y equiparables, las cuales son altamente vulnerables ante eventos adversos de desastre que ponen en riesgo los medios de vida de los productores. La región es una zona de cafecultura bajo sombra de alta importancia en Chiapas, y el país, donde los productores producen café arábigo bajo condiciones de impacto mínimo en la vegetación natural (bosques y selvas) al sembrar cafetos en el estrato inferior de los bosques y selvas, siendo su fuente principal de ingresos. La conservación de la sombra evita la deforestación y degradación forestal, reduciendo así las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) para contribuir con las metas de país ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, además de generar estabilidad en los ingresos de los productores para el

combate de la pobreza y marginación de los pobladores en la región. La actividad cafetalera ha sido impactada, a partir del 2012, por la enfermedad de la roya del café, la cual es una enfermedad infecciosa de transmisión por vectores de viento, principalmente. La producción cafetalera en la región ha sufrido reducciones marcadas, generando condiciones de vulnerabilidad de los productores, que provocan el abandono de las fincas cafetaleras y el cambio de sistemas de producción hacia milpas y potreros ganaderos, con cambios radicales en los medios de subsistencia y mayor impacto ambiental, dado que dicho cambio provoca deforestación y degradación forestal (Perfecto *et al.*, 2019).

Los cafetales tienen un alto potencial de captura de carbono (Pineda-López *et al.*, 2005), por lo que podrían recibir pagos económicos por su conservación o incremento (Aguirre Dávila, 2006; Dávalos Sotelo *et al.*, 2008; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018; Paz-Pellat, 2020) usando mercados del carbono (Williams-Guillén y Otterstrom, 2014). La cuantificación de los almacenes de carbono de las componentes de los cafetales ha sido realizada en numerosos estudios (Aguirre Dávila, 2006; Dávalos Sotelo *et al.*, 2008; Soto-Pinto *et al.*, 2010; Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012; Valdez-Velarde *et al.*, 2014a y b; Cuevas-Trejo *et al.*, 2014; Masuhara *et al.*, 2015; Soto-Pinto y Aguirre-Dávila, 2015; Soto-Pinto *et al.*, 2015; Bautista-Calderón *et al.*, 2016; Salgado-Mora *et al.*, 2018; Salas-Aguilar *et al.*, 2018; Tinoco-Rueda *et al.*, 2021), principalmente en los estados de Chiapas y Veracruz. A la par, se han realizado meta-análisis de los almacenes de carbono en cafetales y otros tipos de uso del suelo (Ávila Vargas, 2000; Morales Coutiño, 2010; Covaleda *et al.*, 2012 y 2019; Rikxoort *et al.*, 2014; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018; Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018; Paz-Pellat, 2020) con distintos enfoques.

El Programa Mexicano del Carbono (PMC), en el 2016, implementó un ejercicio de muestreo de los almacenes de carbono en los cafetales de Sierra Madre de Chiapas, dentro de la campaña “Una REDD+ para salvar la sombra” (Libert-Amico *et al.*, 2016). Esta campaña es el antecedente del proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” (Bolaños *et al.*, 2021), actualmente financiado por el CONACYT, el cual tiene como objetivo caracterizar los almacenes de carbono de las componentes (biomasa aérea viva, suelo, mantillo, material leñoso muerto, biomasa muerta, etc.) de los cafetales en Sierra Madre de Chiapas. La presente contribución está enmarcada en el

proyecto previamente mencionado y analiza los datos colectados por el PMC en 2016.

Aunque existe una tipología de los cafetales bajo sombra (Moguel y Toledo, 1999), su uso en la caracterización de los almacenes de carbono ha sido escasamente explorada, ya que la tipología se basa principalmente en la estructura del café y su manejo (Hernández-Martínez *et al.*, 2009). En este trabajo se exploran las inconsistencias de la tipología de cafetales bajo sombra con relación a los almacenes de carbono a través del análisis de los datos de la campaña de muestreo del PMC en 2016, aunque ha sido analizada previamente (Salas-Aguilar *et al.*, 2018), la base de datos se revisó exhaustivamente en esta contribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipología de cafetales bajo sombra

La clasificación de objetos es una primera aproximación de su caracterización con fines de análisis. La tipología de sistemas de uso del suelo y manejo tiene una larga tradición (Alcorn, 1990). La clasificación o tipología de cafetales bajo sombra ha sido analizada previamente (Jiménez-Ávila y Martínez, 1979; Nolasco, 1985) y refinada por Moguel y Toledo (1999). Escamilla Prado y Díaz Cárdenas (2016) discuten con mayor detalle la tipología propuesta.

La tipología de los cafetales bajo sombra, Figura 1, propuesta por Moguel y Toledo (1999) y usada en este documento tiene cinco tipos: (a) “rústico” o “de montaña”, el cual asemeja a un bosque o selva que ha sido aclarado en su estrato inferior (sotobosque) y sustituido por plantas de café, manteniendo los árboles de sombra. El manejo incluye el control manual de arvenses y la poda ocasional de los cafetos, sin uso de agroquímicos, con producción baja de café. Está asociado a pequeños productores, generalmente indígenas. (b) “policultivo tradicional” o “jardín de café”. El estrato inferior es sustituido por cafetos y la sombra está compuesta por árboles naturales e introducidos de diferentes usos: especies maderables y frutales, entre otros. La mezcla de árboles naturales e introducidos define la complejidad de su estructura. Se realiza un control de arvenses, así como poda selectiva de cafetos, con una posible fertilización por ciclo, con control fitosanitario. Está asociado a productores medianos y pequeños. Adquiere la máxima complejidad vegetativa y arquitectónica, lo cual define “diversidad útil”. (c) “policultivo comercial”; la sombra es removida totalmente, para

generar sombra con dos o tres especies de árboles de tipo comercial y otros para la subsistencia local. La remoción total de la sombra usando árboles introducidos reduce la complejidad estructural y diversidad de la sombra. Se realizan labores generales y particulares para los árboles cultivados, con la aplicación de agroquímicos en forma intensa. Está asociado a medianos y pequeños productores. Se obtiene una mayor producción de café. La producción es exclusiva para el mercado. (d) “monocultivo bajo sombra” o “especializado”. Después de la remoción de la sombra, se plantan árboles, muchas veces de una

sola especie (por ejemplo, *Inga*). El manejo incluye control de arvenses, poda selectiva y sistemática, regulación de la sombra, control fitosanitario, con el uso obligatorio de agroquímicos. Está asociado a productores medianos y grandes. La producción está orientada al mercado. (e) “monocultivo sin sombra” o “a pleno sol”. No tiene sombra y está expuesto al sol, en altas densidades de cafetos. Tiene una alta dependencia de insumos agrícolas, uso de maquinaria y fuerza de trabajo intensiva. Las mayores cosechas de café se obtienen de este sistema. Generalmente, está asociado a grandes productores y superficies de cultivo.

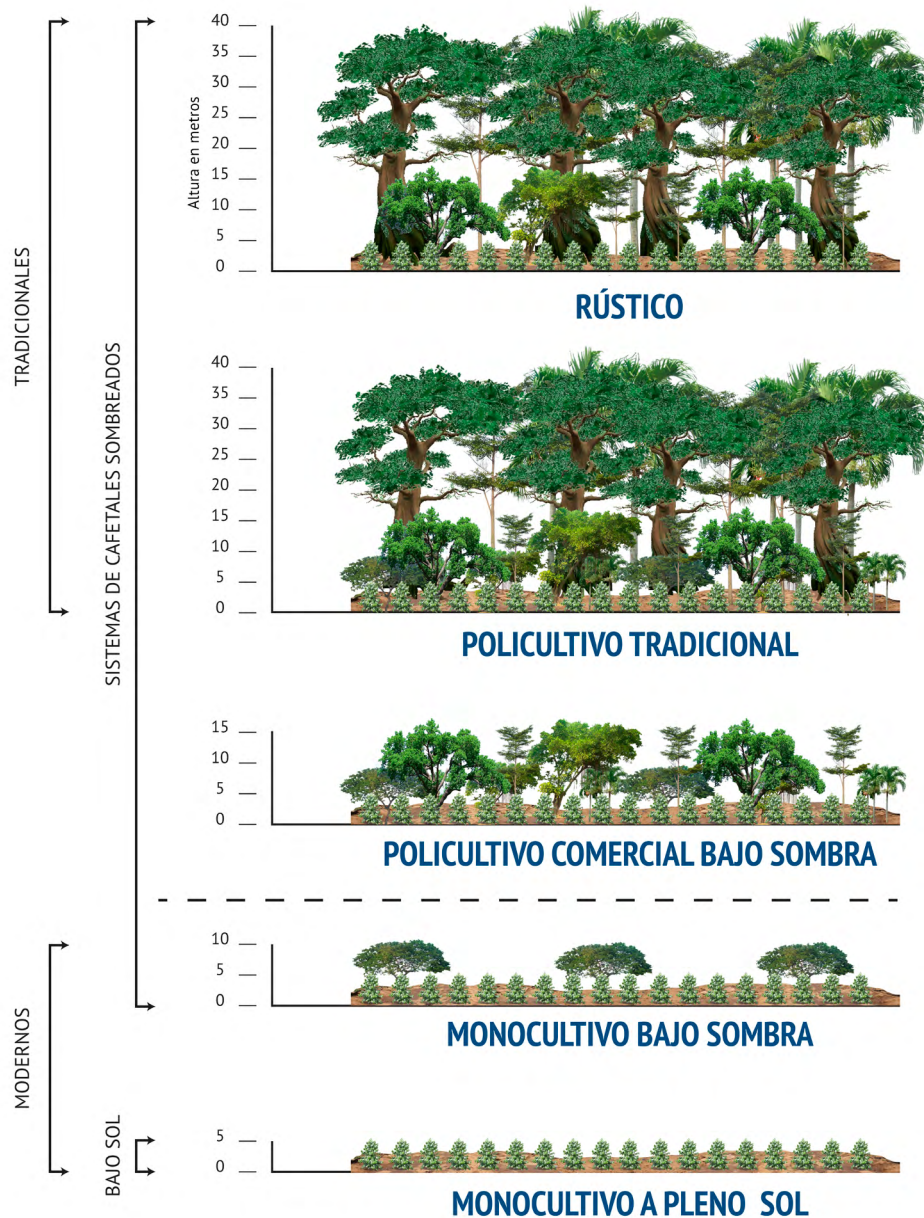


Figura 1. Tipología de cafetales bajo sombra. Adaptado de Moguel y Toledo (1999).

La tipología de cafetales definida por Moguel y Toledo (1999) usa un sistema de clasificación orientado a grandes divisiones: (a) un primer criterio consiste en discriminar entre la existencia o no de la sombra, para establecer el cafetal a pleno sol de resto. (b) el segundo criterio, para los cafetales bajo sombra, consiste en la separación entre mono y policultivos, analizando el número de especies de la sombra y, finalmente (c) un tercer criterio consiste en separar entre policultivos comerciales y policultivos tradicionales o rústicos. Para esto es necesario analizar la composición de árboles no nativos o no originales en la sombra. Los policultivos comerciales tienen una alta proporción de este tipo de árboles. Los policultivos tradicionales presentan una altura promedio de 20-30 m y los comerciales una altura de no más de 15 m. La abundancia de epífitas puede separar también los policultivos y discriminar a los cafetales rústicos. Los policultivos tradicionales y rústicos tienen una abundancia de especies de herbáceas que es dos a cuatro veces mayor que las especies arbóreas.

En el caso de cafetales bajo sombra y sus almacenes de carbono, es necesario diferenciar el tipo predominante de la composición arbórea. El uso de especies maderables (e.g. cedro, caoba, etc.) incrementa

el valor del almacén de la biomasa viva aérea (Nelson y de Jong, 2003; Soto-Pinto *et al.*, 2006; Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012) con relación al uso de árboles leguminosos o frutales.

La tipología de cafetales está circunscrita al axioma de “producir conservando y conservar produciendo” (Moguel y Toledo, 2004; Libert-Amico, 2017)), como una estrategia de intervención con orientación a la conservación de la diversidad. El enfoque de paisajes bioculturales integra la diversidad cultural y el manejo (Libert-Amico, 2017) en el análisis de los diferentes tipos de cafetales. La resiliencia socio-ecológica analiza el potencial de transformación socio-ecológico ante eventos de perturbación (Libert-Amico, 2018).

Los tipos de cafetales se deben analizar más allá de la perspectiva biológica e incluir, entre otras cosas, las dimensiones de sostenibilidad: economía, paisaje y hogar (Toledo y Moguel, 2012). Los tipos de cafetales definidos se basan en categorías tipo “Gestalt” (Mas y Dietsch, 2003), que definen patrones generales de clasificación usando rasgos dominantes o comunes. Por ejemplo, en la Figura 2 se muestran los patrones de tendencias de cambio de rasgos asociados a los diferentes tipos de cafetales (Perfecto *et al.*, 2019; Libert-Amico, 2020).

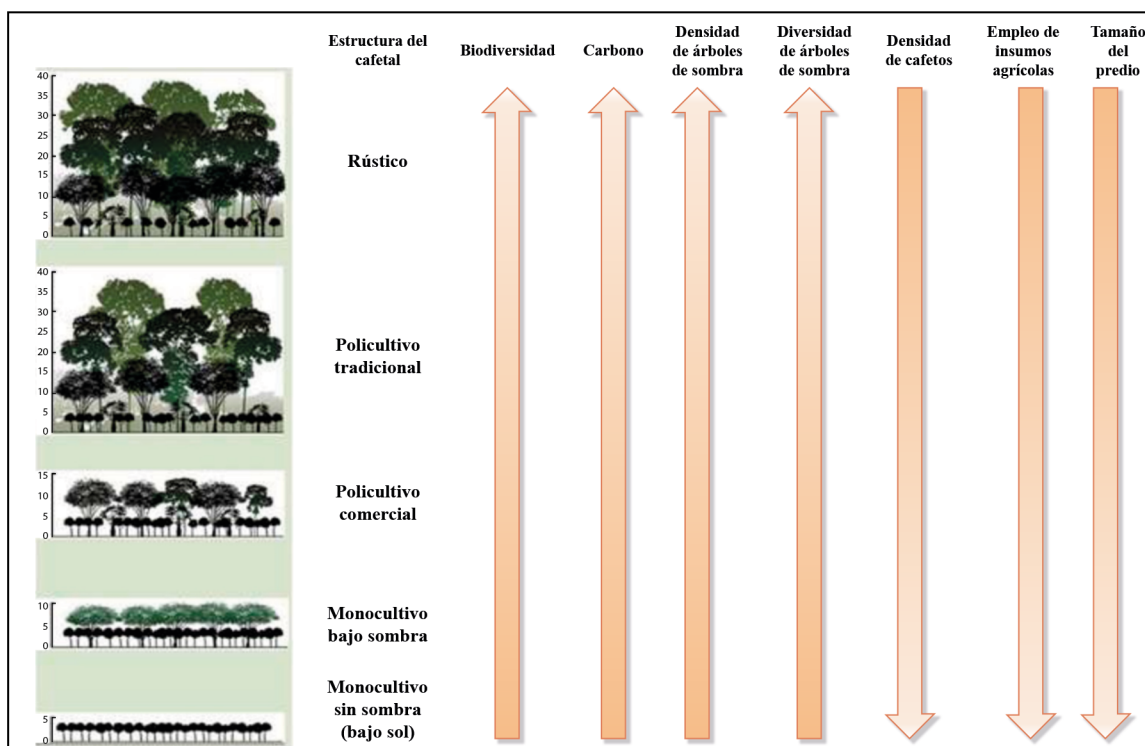


Figura 2. Patrones de las tendencias de algunos atributos de los tipos de cafetales. Fuente: Libert-Amico, 2020.

Para caracterizar a los cafetales rústicos se ha utilizado la presencia de epífitas, la cual es abundante en bosques tropicales y bosque mesófilo de montaña (Goodall *et al.*, 2014) y está relacionada con el diámetro normal (árboles grandes) y densidad arbórea (García-Franco y Toledo-Aceves, 2008).

La clasificación de los tipos de cafetales bajo sombra ha sido basada en la cobertura aérea y riqueza de árboles de la sombra (Perfecto *et al.*, 2005; Williams-Guillén y Otterstrom, 2014), de acuerdo con lo mostrado en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Cobertura aérea y riqueza árboles de sombra y tipos de cafetales.

Tipo cafetal	Cobertura aérea sombra (%)	Riqueza especies árboles	Cobertura aérea sombra (%)	Riqueza especies árboles
Rústico	71-100	>50	>90	>25
Policultivo tradicional	41-70	21-50	60-90	10-20
Policultivo comercial	31-40	6-20	30-60	5-10
Monocultivo bajo sombra	10-30	1-5	<30	1-5
A pleno sol	0	0	0	0
Autores	Perfecto <i>et al.</i> , 2005		Williams-Guillén y Otterstrom, 2014	

Con el fin de caracterizar los cafetales bajo sombra se han analizado los atributos de la sombra (Soto-Pinto *et al.*, 2001; Williams-Linera y López Gómez, 2008; Tsharntke *et al.*, 2011; Goodall *et al.*, 2014, García Mayoral *et al.*, 2015). Los servicios ecosistémicos de la sombra también se analizaron (Tsharntke *et al.*, 2011; Villareyna *et al.*, 2020). La selección de los árboles de sombra de los cafetales utiliza conocimiento local más allá de los mercados, incluyendo el manejo de la sucesión vegetal (Soto-Pinto *et al.*, 2007).

Los diversos tipos de manejo de los cafetales asociada a la diversidad cultural se analizaron para tipologías de estrategias productivas (Aguirre-Cadena *et al.*, 2007; Merlin-Urbe *et al.*, 2018).

Para la estrategia de certificar la sombra de los cafetales se han utilizado criterios biofísicos que describen la complejidad estructural y composición de la sombra (INECOL, 1999).

El uso de técnicas estadísticas multivariadas ha sido utilizado para caracterizar los tipos de cafetales bajo sombra utilizando índices de estructura y manejo con base a variables medidas o evaluadas, para reducir la dimensionalidad del problema (Mas y Dietsch, 2003; Hernández-Martínez, 2008; Hernández-Martínez *et al.*,

2009). Las variables de estructura asociadas a la sombra de la vegetación son: altura de árboles, densidad arbórea, estratos, diámetro normal o área basal, cobertura aérea de la sombra, cobertura de epífitas, riqueza de especies, especies nativas (proporción), principalmente. Para los cafetos se utilizan la altura y densidad de éstos, principalmente.

Ante el avance de la epidemia de la roya, y bajos precios del café, se han implementado patrones de reducción de la sombra de cafetales y cambios en el uso del suelo, de cafetales a milpas o potreros ganaderos (Harvey *et al.*, 2021), donde la remoción de las epífitas es común (Toledo-Aceves *et al.*, 2013), implicando una pérdida de diversidad vegetal (plantas vasculares).

La relación entre la cobertura aérea de la sombra y la producción del cafetal ha mostrado un patrón creciente hasta niveles medios de la sombra y después un patrón decreciente a medida que la cobertura se incrementa (Soto-Pinto *et al.*, 2000). En lo general, el patrón entre la riqueza de especies (diversidad) y la producción de café es de tipo decreciente (Perfecto *et al.*, 2003 y 2005; Zewdie *et al.*, 2022). Esto implica que, al incrementar la producción de café asociado a la reducción de la sombra de los cafetales, la diversidad se reduce.

Estimación de los almacenes de carbono por componentes

El arreglo geométrico de los sitios de muestreo de la vegetación se muestra en la Figura 3.

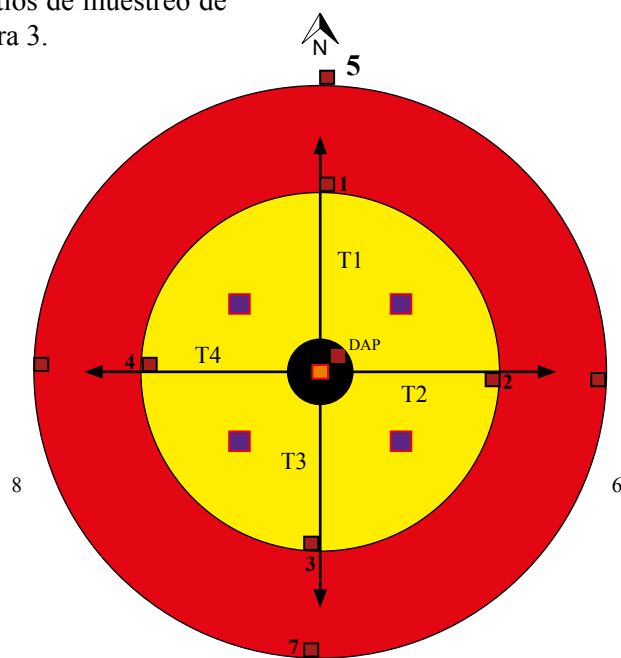


Figura 3. Arreglo geométrico de los sitios de muestreo de la vegetación.

Las unidades de muestreo de carbono en los sitios de muestreo se detallan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Unidades de muestreo de carbono de los sitios de muestreo.

	Color	○	●	●
Círculo	Radio (m)	17.85	11.28	2.00
	Área (m ²)	1000	400	12.56
	Almacén de Carbono	Árboles con DN mayor a 20 cm. Sólo en el área entre círculos.	Árboles con DN mayor a 7.5 cm y arbustos.	Renuevos de árboles y arbustos con DN < 7.5 cm y altura >= 50 cm.
	Color	■	■	■
Cuadro	Largo m	1	1	0.30
	Área (m ²)	1	1	0.09
	Almacén de Carbono	Hierbas, helechos, musgos y líquenes	Herbáceas	Mantillo y suelo
	Símbolo		T1	
Transecto	Largo (m)	15		
	Almacén de Carbono	Biomasa muerta sobre el suelo (combustibles)		

El arreglo geométrico del sitio de muestreo se basa en los conglomerados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2009), permitiendo muestreos compatibles entre sí. El muestreo expuesto en la Figura 3 considera un área de muestreo base de 400 m², con un área de 12.56 m² para el muestreo para el renuevo de los árboles, al igual que el INFyS, la cual se extiende a 1000 m² al considerar solo muestras de árboles con diámetro normal (DN), medido a la altura de 1.3 m, mayor a 20 cm. En el caso de la biomasa muerta sobre el suelo o material leñoso caído (combustibles) se consideran cuatro transectos de 15 m de longitud, siguiendo un protocolo similar al INFyS.

Para una documentación del protocolo del muestreo utilizado se deben consultar los manuales de campo desarrollados por el PMC (2011 y 2015). La determinación de la riqueza de plantas vasculares se realiza en el círculo de 1000 m².

La estimación del carbono de los almacenes de las componentes de los sitios de muestreo sigue los protocolos establecidos por el IPCC (2003 y 2006).

Escalamiento de las estimaciones

Los sitios de muestreo se integran por tres círculos concéntricos para la toma de muestras. El primer círculo tiene un área de 12.56 m² y en éste se miden los renuevos de árboles y arbustos con diámetros normales < 7.5 cm y altura mayor a 0.5 m. El segundo círculo tiene un área de 400 m², donde se miden árboles y arbustos con diámetros normales > 7.5 cm. Por último, en el tercer círculo, con área de 1000 m², se miden los árboles con diámetro normal > 20 cm. Para extrapolar las mediciones de las subparcelas circulares a una superficie de una hectárea, es necesario aplicar factores de expansión (factor multiplicativo). Para el primer círculo el factor de expansión es 796.17, 25.81 para el segundo círculo y 10.12 para el tercero.

Almacén de la biomasa aérea viva (Bav)

Para la estimación de la biomasa seca de los árboles se utilizaron bases de datos de ecuaciones alométrica compiladas (Rojas-García *et al.*, 2015), donde hay un total de 295 ecuaciones para la región de estudio. La nomenclatura de los registros de campo fue revisada y homogeneizada con la librería Taxonstand dentro del lenguaje de programación R versión 3.4.1. Las ecuaciones se asignaron de acuerdo al hábito, forma de crecimiento (Vázquez-Sánchez *et al.*, 2012) y forma de vida (Raunkier, 1934), así como su afinidad

taxonómica (familia, género y especie). Cuando no se encontró una ecuación específica para una especie, se utilizaron ecuaciones genéricas de acuerdo al tipo de vegetación.

El cálculo de la biomasa aérea viva (Bav), en términos de biomasa seca al horno (kg), se realizó para los árboles y arbustos vivos en los círculos de muestreo de 400 y 1000 m². Para cada especie se le asignó una ecuación alométrica para la estimación de Bav. Para el caso de árboles con DN > 75 cm, se aplicó una ecuación generalizada (Brown *et al.*, 1997):

$$Bav = \frac{0.5 + 15000DN^{2.7}}{DN^{2.7} + 364946} \quad (1)$$

donde DN está en cm y Bav en kg. El uso de la ecuación anterior se justifica porque las ecuaciones exponenciales (típicas en alometría) sobreestiman la biomasa arbórea.

La Bav estimada se multiplicó por 0.5 para estimar el contenido de carbono (IPCC, 2006).

Para el caso de DN ≤ 20 cm, el área de muestreo considerada fue de 400 m² y para DN > 20 cm, el área fue de 1000 m², para compensar los efectos de escala.

Almacén de la biomasa subterránea viva (Bsv)

Para la estimación de la biomasa subterránea viva se utilizó el modelo alométrico de Cairns *et al.* (1997):

Bosques templados:

$$Bsv = \exp [-1.0587 + 0.8836 \ln(Bav) + 0.2840] \quad (2)$$

Selvas:

$$Bsv = \exp [-1.0587 + 0.8836 \ln(Bav)] \quad (3)$$

donde Bsv y Bav están en Mg C ha⁻¹.

Almacén de la biomasa aérea de las herbáceas (Bah)

La estimación de la biomasa aérea de las plantas herbáceas fue calculada de:

$$Bah = \frac{Ps}{1000000} \quad (4)$$

donde Ps es el peso seco de las muestras (g) y el factor de 1000000 es utilizado para convertir a mega gramos (Mg). El estimado de Bah se multiplica por el factor 0.47 para estimar el contenido de carbono (IPCC, 2006).

Almacén de la biomasa de árboles muertos en pie (Bamp) y tocones (Bt)

Para la estimación de la biomasa de árboles muertos en pie se utilizaron las ecuaciones alométricas para Bav (Mg C) y resultado se dividió entre 2.

Para la estimación de la biomasa de los tocones se calculó su volumen y éste se multiplicó por la densidad de la madera (ρ):

$$Bt = \left[\frac{d^2 h}{4\pi} \right] \rho \quad (5)$$

donde d (cm) es el diámetro del tocón, h (cm) es su altura.

La biomasa del tocón (Bt) se multiplicó por 0.5 para estimar su contenido de carbono (IPCC, 2006).

El almacén de biomasa aérea muerta (Bam) corresponde a la suma de los árboles muertos en pie y los tocones.

Almacén de la biomasa del mantillo (Bm)

El mantillo es la suma de la capa de fermentación y de la hojarasca (CONAFOR, 2009; PMC, 2011 y 2015). La estimación de la biomasa del mantillo está definida por:

$$Bm = \left[\frac{Pm}{1000000} \right] \left[\frac{10000}{0.09} \right] \quad (6)$$

donde Pm es el peso del mantillo (g) (capa de fermentación más capa de hojarasca), 1000000 es un factor de conversión de g a Mg, 10000 es un factor de conversión de m a ha y 0.09 m² es el área de muestreo del mantillo de 0.3 x 0.3 m.

Almacén de la biomasa del material leñoso muerto (Bmlc)

En el caso del muestreo de los transectos de la biomasa del material leñoso muerto, el volumen puede ser estimado por la ecuación de Warren y Olson (1964) modificada por Van Wagner (1968):

$$Vmlc = \frac{\pi^2 \sum_{i=1}^n d_i^2}{8L} \quad (7)$$

donde Vmlc (m² ha⁻¹) es el volumen del material leñoso muerto por clase de densidad, d_i es el diámetro de la pieza i de material leñoso muerto a lo largo del transecto (cm) y L es la longitud del transecto (m). Los volúmenes por clase de densidad son multiplicados por la densidad de su clase (ρ) para estimar la biomasa (Mg ha⁻¹). Los estimados de biomasa son multiplicados por el factor 0.5 para su conversión a carbono (IPCC, 2006).

Almacén del carbono orgánico del suelo (Ccos)

El carbono orgánico del suelo (COS) se estima de acuerdo con (Poeplau *et al.*, 2017):

$$Ccos = (DAP)(P)(10000) * (1 - Fg)(COSp)(0.01) \quad (8)$$

donde Ccos es el contenido de carbono orgánico del suelo (Mg C ha⁻¹), DAP (Mg m²) es la densidad aparente del suelo, P es la profundidad del suelo (m), Fg (%) son los fragmentos gruesos (> 2 mm) en el suelo, COSp es el contenido del carbono orgánico (%) y 0.01 es un factor de conversión de porcentaje a fracción.

Almacenes de carbono por altura

Dado que no se midió la altura de los árboles, se realizó una estimación de la altura (H) usando DN de acuerdo a la relación definida por Batista *et al.* (2001) para sistemas tropicales:

$$H = 2.21DN^{0.533} \quad (9)$$

Con las alturas estimadas, se definieron cinco categorías: menor a 10 m, mayor de 10 m y menor a 15 m, mayor de 15 m y menor a 20 m, mayor de 20 m y menor a 25 m y mayor a 25 m. Para cada clase de altura se realizaron estimaciones del contenido de carbono de la biomasa aérea viva.

Cobertura aérea del follaje

Para la estimación de la cobertura aérea (cobertura proyectiva foliar) del follaje (sombra) se implementó el método desarrollado por Salas-Aguilar *et al.* (2017) para la estimación de la fracción de la cubierta forestal con el uso de fotografía digital a partir de su análisis con el lenguaje de programación Python 2.7 y la herramienta Orfeo Toolbox (OTB).

Las imágenes se tomaron con una cámara Canon Eos Rebel T5 configurada con la máxima resolución espacial (17 915 904 píxeles). El lente de la cámara se ajustó a un ISO de 200, la apertura y la exposición se usaron en modo automático. Para la captura de la fotografía el lente se niveló hacia arriba. Las fotografías se tomaron a 1.5 m con respecto al suelo en los radios de 17.84, 11.28 y 5.65 m respectivamente, en el sentido de las manecillas del reloj; de norte a sur, de noreste a suroeste, de este a oeste y de sureste a noroeste (Figura 4).

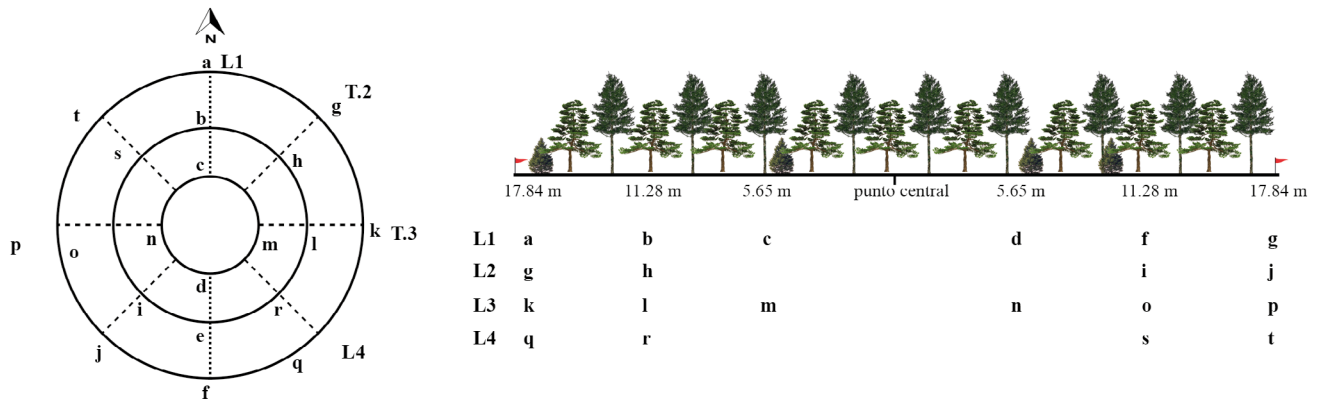


Figura 4. Ubicación de los puntos para la toma de fotografías dentro del sitio de muestreo. Fuente: Salas-Aguilar *et al.* (2017).

Campaña de sitios de muestreo

La campaña de muestreo de los almacenes de carbono de los cafetales bajo sombra se planteó para caracterizarlos en la Sierra Madre de Chiapas durante el 2016. Se propusieron 82 sitios de muestreo (PMC) con 29 sitios asociados a parcelas de muestreo de la

roya por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), Figura 5. El SENASICA, dentro de la región de estudio ha establecido parcelas de muestreo fijas (permanentes) y móviles, con el objetivo de evaluar el avance de la roya en los cafetales.

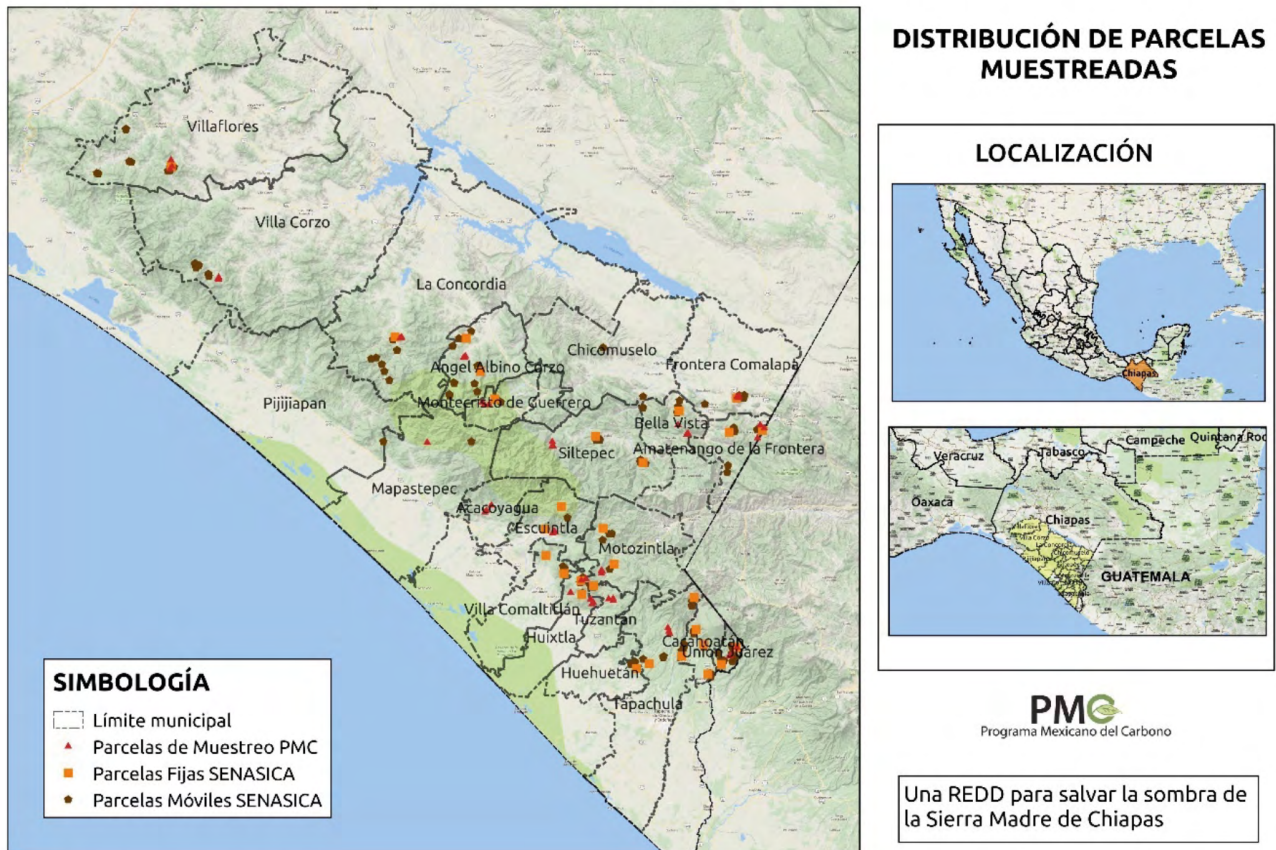


Figura 5. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

RESULTADOS

El número de sitios de muestreo originales fue de 82, aunque se revisaron las tipologías para buscar

inconsistencias, siendo el número final de 72 sitios de muestreo. El Cuadro 3 muestra la distribución del número de sitios de muestreo por tipo de uso del suelo (cafetal y vegetación natural).

Cuadro 3. Número de sitios de muestreo por uso del suelo y tipología de cafetales.

Uso del suelo	n
A pleno sol	4
Monocultivo bajo sombra	18
Policultivo comercial bajo sombra	25
Policultivo tradicional	11
Rústico	5
Bosque mesófilo	3
Selva mediana	2
Bosque de encino-pino	3
Agricultura de temporal	1

Los almacenes de carbono por las componentes C aérea (biomasa aérea viva) y carbono orgánico de los suelos (COS), así como el C total se muestran en el Cuadro 4. El contenido mayor COS está en el cafetal bajo sol, aunque no es clara esta relación, dado que es el cafetal con mayor grado de perturbación. El C aéreo

y el total muestran valores más o menos similares, con diferencias asociadas a los tipos de cafetales. Para la vegetación natural de referencia, los almacenes son mayores que los cafetales, con excepción de los bosques de encino-pino que muestran valores bajos del COS.

Cuadro 4. Almacenes principales de carbono en cafetales y vegetación natural.

Uso del suelo	Promedio C total (Mg C ha ⁻¹)	Desv. Est. C total (Mg C ha ⁻¹)	Promedio C aéreo (Mg C ha ⁻¹)	Desv. Est. C aéreo (Mg C ha ⁻¹)	Promedio COS (Mg C ha ⁻¹)	Desv. Est. COS (Mg C ha ⁻¹)
A pleno sol	123.96	11.98	3.6	2.9	112.7	18.6
Monocultivo bajo sombra	136.88	42.81	56.0	37.8	74.6	19.4
Policultivo comercial bajo sombra	128.80	37.96	41.0	29.8	83.2	25.8
Policultivo tradicional	150.41	53.42	53.4	29.1	91.4	31.4
Rústico	148.50	46.32	53.5	24.5	88.3	23.8
Bosque mesófilo	223.31	37.09	100.0	23.7	103.8	15.5
Selva mediana	172.95	5.35			103.5	26.0
Bosque de encino-pino	96.68	15.62	87.9		23.1	12.0
Agricultura de temporal	59.94		0.0		52.8	

La distribución de la densidad arbórea por altura de los estratos de la vegetación se muestra en el Cuadro 5. Para los cafetales a pleno sol se muestran densidades a árboles dispersos, aparentemente abandonados después

de la conversión a pleno sol. Para los otros tipos de cafetales, las densidades arbóreas se concentran en el estrato de 0 a 15 m o en el de 0 a 20 m, a diferencia de la vegetación natural que alcanza mayores alturas.

Cuadro 5. Distribución de las densidades arbóreas por estratos de diferentes alturas.

Clave Sitio Muestreo	Uso del suelo	Densidad arbórea Estrato > 25m	Densidad arbórea Estrato 20-25m	Densidad arbórea Estrato 15-20m	Densidad arbórea Estrato 10-15m	Densidad arbórea Estrato < 10m
07117520047C	A pleno sol	0	0	0	1	1
07117520050C	A pleno sol	0	0	0	2	2
07117520033C	A pleno sol	0	0	0	3	0
07067520023C	A pleno sol	0	0	1	1	3
07067520002C	Monocultivo bajo sombra	1	0	4	8	5
07107520069C	Monocultivo bajo sombra	0	0	2	7	0
07067520005C	Monocultivo bajo sombra	0	0	4	19	6
07067520008C	Monocultivo bajo sombra	0	0	0	6	60
07107520026C	Monocultivo bajo sombra	0	0	1	4	8
07117520059C	Monocultivo bajo sombra	0	1	0	9	18
07067520058C	Monocultivo bajo sombra	0	0	0	15	1
07111080042C	Monocultivo bajo sombra	0	2	1	26	7
07117520052C	Monocultivo bajo sombra	0	1	3	0	4
07102140038C	Monocultivo bajo sombra	1	1	4	10	10
07102140039C	Monocultivo bajo sombra	0	1	5	24	8
07107520013C	Monocultivo bajo sombra	0	0	2	5	0
07107520015C	Monocultivo bajo sombra	0	0	1	4	1
07107520037C	Monocultivo bajo sombra	0	3	1	11	7
07107520066C	Monocultivo bajo sombra	0	1	4	7	5
07107520067C	Monocultivo bajo sombra	0	0	2	11	0
07107520078C	Monocultivo bajo sombra	0	0	4	5	2
07117520053C	Monocultivo bajo sombra	1	0	8	13	13
07067520006C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	1	22	12
07067520009C	Policultivo comercial bajo sombra	0	1	4	14	62
07067520055C	Policultivo comercial bajo sombra	0	2	2	2	3

Cuadro 5. Distribución de las densidades arbóreas por estratos de diferentes alturas (Continuación).

Clave Sitio Muestreo	Uso del suelo	Densidad arbórea Estrato > 25m	Densidad arbórea Estrato 20-25m	Densidad arbórea Estrato 15-20m	Densidad arbórea Estrato 10-15m	Densidad arbórea Estrato < 10m
07067520056C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	3	23	5
07107520036C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	7	20	20
07107520040C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	5	17	4
07107520041C	Policultivo comercial bajo sombra	0	1	1	5	1
07107520068C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	0	12	4
07107520071C	Policultivo comercial bajo sombra	0	2	1	9	2
07107520072C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	0	11	2
07107520076C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	2	4	8
07107520077C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	2	9	3
07107520079C	Policultivo comercial bajo sombra	0	1	5	2	1
07107520080C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	4	10	9
07107520081C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	0	13	2
07117520043C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	6	8	5
07117520044C	Policultivo comercial bajo sombra	1	3	7	21	12
07117520046C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	4	17	11
07117520049C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	0	14	7
07117520060C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	0	6	14
07067520057C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	1	4	0
07117520061C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	5	6	1

Cuadro 5. Distribución de las densidades arbóreas por estratos de diferentes alturas (Continuación).

Clave Sitio Muestreo	Uso del suelo	Densidad arbórea Estrato > 25m	Densidad arbórea Estrato 20-25m	Densidad arbórea Estrato 15-20m	Densidad arbórea Estrato 10-15m	Densidad arbórea Estrato < 10m
07117520063C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	2	10	2
07117520075C	Policultivo comercial bajo sombra	0	1	2	11	1
07117530034C	Policultivo comercial bajo sombra	0	0	1	9	10
07097530017C	Policultivo tradicional	0	1	7	8	0
07102150014C	Policultivo tradicional	1	0	7	11	14
07062150007C	Policultivo tradicional	0	0	4	4	0
07107520010C	Policultivo tradicional	0	2	3	3	3
07107520012C	Policultivo tradicional	0	0	2	11	6
07107520027C	Policultivo tradicional	0	1	8	10	25
07107520065C	Policultivo tradicional	0	0	1	10	11
07107520073C	Policultivo tradicional	0	0	5	7	4
07107520082C	Policultivo tradicional	0	0	9	2	0
07117520064C	Policultivo tradicional	1	1	2	1	4
07117520074C	Policultivo tradicional	0	0	0	14	2
07062170018C	Rústico	0	3	4	12	5
07107520030C	Rústico	0	0	4	13	5
07101060011C	Rústico	0	1	6	4	6
07067520054C	Rústico	0	0	8	0	0
07117520062C	Rústico	0	0	5	10	0
07061080021C	Bosque mesófilo	0	0	7	16	25
07111080048C	Bosque mesófilo	1	2	8	13	19
07101080024C	Bosque mesófilo	0	1	7	12	5
07062140019C	Selva mediana	0	0	3	16	20
07062150003C	Selva mediana	0	1	14	16	23
07111060051C	Bosque de encino-pino	0	1	3	15	13
07061050004C	Bosque de encino-pino	0	1	5	17	15
07111060045C	Bosque de encino-pino	0	0	3	9	8
0709---0016C	Agricultura de temporal	0	0	0	0	5

Para los almacenes de carbono de las componentes menores (mantillo, material leñoso caído, biomasa muerta y herbáceas), el Cuadro 6 muestra los resultados para los cafetales y la vegetación natural.

Cuadro 6. Contenidos de carbono de los almacenes menores de los cafetales y vegetación natural.

Uso del suelo	Promedio C mantillo (Mg C ha ⁻¹)	Desv. Est. C mantillo (Mg C ha ⁻¹)	Promedio C MLC (Mg C ha ⁻¹)	Desv. Est. C MLC (Mg C ha ⁻¹)	Promedio C biomasa muerta (Mg C ha ⁻¹)	Desv. Est. C biomasa muerta (Mg C ha ⁻¹)	Promedio C herbáceas (Mg C ha ⁻¹)	Desv. Est. C herbáceas (Mg C ha ⁻¹)
A pleno sol	2.0	1.8	2.4	1.6	6.4	4.7	0.9	0.8
Monocultivo bajo sombra	3.7	2.2	1.1	1.5	1.5	1.6	1.2	1.2
Policultivo comercial bajo sombra	3.1	1.8	0.7	0.4	1.0	0.9	0.5	0.6
Policultivo tradicional	3.6	2.7	0.6	0.3	0.9	0.7	0.6	1.1
Rústico	4.5	2.7	0.7	0.5	1.2	0.8	1.2	1.9
Bosque mesófilo	17.7	8.6	0.9	0.5	1.8	0.9	2.3	2.9
Selva mediana	9.3	0.4	0.5	0.4	0.9	0.0	0.6	
Bosque de encino-pino	6.1	4.4	0.8	0.6	1.1	0.6	0.4	0.2
Agricultura de temporal	5.0		1.6		1.9		0.3	

Se observa del Cuadro 6 que, en el caso de los cafetales a pleno sol, los valores del material leñoso caído (MLC) y biomasa muerta (árboles muertos en pie y tocones), los almacenes tienen valores altos, implicando que el proceso de establecimiento de este tipo de cafetales dejó residuos de la vegetación previa.

Los resultados de la densidad promedio de cafetos, la densidad promedio de árboles y la cobertura aérea promedio están mostrados en el Cuadro 7. La densidad de cafetos varía en función del tipo de cafetal, así

como la densidad arbórea que tiene valores menores a la vegetación natural. La cobertura aérea promedio muestra valores mayores al 62% para los tipos de cafetales con sombra y para el de pleno sol tiene un promedio de 38.1%, posiblemente producto de árboles dispersos remanentes. Para la vegetación natural, la cobertura promedio es alta (mayor de 80%), con excepción del bosque de encino-pino que tiene valores similares a los cafetales bajo sombra.

Cuadro 7. Densidades de cafetos y árboles, así como cobertura aérea de cafetales y vegetación natural.

Uso del suelo	Promedio densidad cafetos (no. ha ⁻¹)	Desv. Est. densidad cafetos (no. ha ⁻¹)	Promedio densidad árboles (no. ha ⁻¹)	Desv. Est. densidad árboles (no. ha ⁻¹)	Promedio cobertura aérea (%)	Desv.Est. cobertura aérea (%)
A pleno sol	3585.1	994.1	62.9	34.7	38.1	24.8
Monocultivo bajo sombra	2148.3	2561.8	326.4	222.6	62.1	16.2
Policultivo comercial bajo sombra	1965.5	3259.3	368.6	342.5	62.0	12.3
Policultivo tradicional	1409.5	5233.3	331.7	229.6	69.5	13.6
Rústico	660.8	848.8	227.5	106.6	69.6	13.9
Bosque mesófilo	0.0		814.6	139.6	81.9	6.0
Selva mediana	0.0		847.3	107.4	80.5	9.0
Bosque de encino-pino	0.0		518.2	173.3	61.4	21.4
Agricultura de temporal	0.0		0.0		2.9	

Finalmente, con relación a la riqueza de plantas vasculares, en el Cuadro 8 se muestran los resultados para árboles, arbusto, hierbas y lianas y, epífitas. La relación entre especies de hierbas / especies arbóreas

tiene valores superiores a 1.0 y el de especies lianas y epífitas/especies arbóreas el valor es de alrededor de 1.0. La mayor densidad de lianas y epífitas se da en la vegetación natural y los cafetales rústicos.

Cuadro 8. Número de especies de árboles, arbustos, hierbas y lianas y, epífitas de los cafetales y vegetación natural.

Uso del suelo	Promedio especies árboles	Desv.Est. especies árboles	Promedio especies arbustos	Desv.Est. especies arbustos	Promedio especies hierbas	Desv.Est. especies hierbas	Especies hierbas / Especies árboles	Promedio especies lianas y epífitas	Desv.Est. especies lianas y epífitas
A pleno sol	8.3	4.3	9.0	4.2	19.0	4.2	2.3	8.8	6.8
Monocultivo bajo sombra	11.4	4.6	8.6	3.2	14.6	6.8	1.3	10.4	3.2

Cuadro 8. Número de especies de árboles, arbustos, hierbas y lianas y, epífitas de los cafetales y vegetación natural (Continuación).

Uso del suelo	Promedio	Desv.Est.	Promedio	Desv.Est.	Promedio	Desv.Est.	Especies	Promedio	Desv.Est.
	especies árboles	especies árboles	especies arbustos	especies arbustos	especies hierbas	especies hierbas	hierbas / Especies árboles	especies lianas y epífitas	especies lianas y epífitas
Policultivo comercial bajo sombra	10.6	3.6	7.1	2.6	15.5	4.6	1.5	9.7	3.3
Policultivo tradicional	10.4	2.9	7.0	2.6	13.5	4.3	1.3	8.0	4.4
Rústico	11.4	3.1	7.2	3.3	13.2	3.8	1.2	11.6	5.0
Bosque mesófilo	22.7	11.7	7.0	5.6	8.7	3.2	0.4	17.7	2.1
Selva mediana	18.0	5.7	6.0	1.4	6.5	0.7	0.4	8.0	5.7
Bosque de encino-pino	11.0	6.6	6.7	1.5	10.3	2.5	0.9	8.3	2.1
Agricultura de temporal	5.0		2.0		5.0		1.0	7.0	

DISCUSIÓN

Los datos obtenidos de la caracterización de los cafetales y la vegetación natural de referencia muestran valores relativamente cercanos entre sí, con diferencias entre los distintos tipos de cafetales.

Para el caso de los cafetales a pleno sol, los de mayor perturbación de la vegetación, los valores obtenidos de los almacenes de carbono y otras variables muestran resultados relativamente altos, los cuales posiblemente están asociados a remanentes o residuos dejados en los sitios o falta de mantenimiento de los mismos.

En lo general, la tipología de cafetales no es lo suficientemente discriminadora de los diferentes tipos de cafetales en cuanto a los almacenes de carbono de las componentes analizadas, aunque en algunos casos se diferencian cafetales, tanto a nivel de almacenes de carbono como de otras variables.

La vegetación natural de referencia se discrimina de los diferentes tipos de cafetales, particularmente

con relación a los almacenes de carbonos de las componentes.

Los almacenes de carbono pueden ser usados en los mercados del carbono, particularmente bajo la iniciativa del banco mexicano del carbono del Programa Mexicano del Carbono (Paz-Pellat, 2022a) y la definición de derechos del carbono (Paz-Pellat, 2022b).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados muestran patrones de discriminación de los diferentes tipos de cafetales en cuanto a los almacenes de carbono y variables estructurales de la sombra de los cafetales, aunque en algunos casos las diferencias son mínimas.

Es recomendable la caracterización de la composición arbórea de la sombra en función de su uso: maderable, frutal, leguminosa, etc., para poder realizar una mejor discriminación de los almacenes de carbono.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

- Aguirre Dávila, C. M. 2006. Servicios ambientales: captura de carbono en sistemas de café bajo sombra en Chiapas, México. Tesis de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sustentable. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México 84 p.
- Alcorn, J. B. 1990. Indigenous agroforestry systems in the Latin American tropics. pp. 203-218. In: M. A. Altieri and S. B. Hecht (eds). *Agroecology and Small Farm Development*. CRC Press. Boca Ratan, FL.
- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzuetto, A. J. Hruska and C. Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321.
- Ávila Vargas, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica 99 p.
- Batista, J. L., H. T. Z. Couto and M. Marquesini. 2001. Performance of height-diameter relationship models: analysis in three forest types. *Scientia Forestalis* 60: 149-163.
- Bautista-Calderón, E. A., V. M. Ordaz-Chaparro, E. V. Gutiérrez-Castorena, C. Hidalgo-Moreno and E. Valdés-Velarde. 2016. Carbono en sistemas agroforestales de café, bosque mesófilo de montaña y potrero en Huatusco, Veracruz. pp. 454-461. En: F. Paz Pellat y R. Torres Alamilla (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Bolaños-González, M. A., A. Libert-Amico, F. Paz-Pellat, V. Salas-Aguilar, G. Villalobos-Sánchez, E. Escamilla-Prado, A. S. Velázquez-Rodríguez y E. I. Morales-Reyes. 2021. Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas. pp. 633-638. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- Brown, S., P. Schroeder and R. Birdsey. 1997. Aboveground biomass distribution of US eastern hardwood forests and the use of large trees as an indicator of forest development. *For. Ecol. Manage.* 96: 37-47.
- Cairns, M., S. Brown, E. H. Helmer and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- CEDRSSA. 2019. Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-2024. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Cámara de Diputados - LXIV Legislatura 19 p.
- CONAFOR 2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo (Re-Muestreo 2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México 140 p.
- Covalada, S., F. Paz y B. de Jong. 2012. Parametrización de modelos de estados y transiciones para el carbono y caracterización de la incertidumbre. pp. 29-34. En: Paz, F., M. Bazán y V. Saynes (eds.). *Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono*. Texcoco, Estado de México, México.
- Covalada-Ocón, S., F. Paz-Pellat y B. de Jong. 2019. Modelos de estados y transiciones para los almacenes de carbono de las principales regiones de Chiapas, México. *Elementos para Políticas Públicas* 3:183-221.
- Cuevas-Trejo, S., M. López-Velasco, E. Valdés-Velarde, V. Ordaz-Chaparro, J. Ayala-Arreola, L. Krishnamurthy, E. Salcedo-Pérez, J.F. Gallardo-Lancho y J.I. Valdez-Hernández. 2014. Contenido de carbono en sistemas agroforestales de café en tres municipios de la región de “Las Montañas” (Veracruz, México). pp. 71-77. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Texcoco, Estado de México, México.
- Dávalos Sotelo, R., M. I. Rodríguez Morato y E. Martínez Piniillos-Cueto. 2008. Almacenamiento de carbono. pp. 223-233. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehltreter (eds). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. INECOL e INE-SEMARNAT, México.
- Escamilla Prado, E. y S. Díaz Cárdenas. 2016. *Sistemas de Cultivo de Café en México*. Centro Nacional de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café. Huatusco, Veracruz 61 p.
- Espinoza-Domínguez, W., L. Krishnamurthy, A. Vázquez-Alarcón y A. Torres-Rivera. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18:57-70.

- García-Franco, J.G. y T. Toledo-Aceves. 2008. Epifitas vasculares: bromelias y orquídeas. pp. 69-82. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (eds). Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación. INECOL e INE-SEMARNAT, México.
- García Mayoral, L. E., J. I. Valdez Hernández, M. Luna Cavazos y R. López Morgado. 2015. Estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de café en la Sierra de Atoyac, Veracruz. *Madera y Bosques* 21:69-82.
- Goodall, K. E., C. M. Bacon and V. E. Mendez. 2014. Shade tree diversity, carbon sequestration, and epiphyte presence in coffee agroecosystems: a decade of smallholder management in San Ramón, Nicaragua. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 199:200-206.
- Harvey, C. A., A. A. Pritts, M. J. Zwetsloot, K. Jansen, M. M. Pulleman, I. Armbrrecht, J. Avelino, J. F. Barrera, C. Bunn, J. Hoyos García, C. Isaza, J. Muñoz-Ucros, C. J. Pérez-Alemán, E. Rahn, V. Robiglio, E. Somarriba and V. Valencia. 2021. Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. Doi:10.1007/s13593-021-00712-0.
- Hernández-Martínez, G. 2008. Clasificación agroecológica pp. 15-34. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (eds). Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación. Instituto de Ecología A.C. – INECOL e Instituto Nacional de Ecología – SEMARNAT. México.
- Hernández-Martínez, G., R. H. Manson and A. Contreras Hernández. 2009. Quantitative classification of coffee agroecosystems spanning a range of production intensities in central Veracruz, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 134:89-98.
- INECOL. 1999. Definición del Café de Sombra con Criterios Biofísicos. Resultados del taller organizado por el Centro Smithsonian de Aves Migratorias del Parque Zoológico Nacional, Washington, DC. Jardín Botánico del Instituto de Ecología, Jalapa, Veracruz. Proyecto financiado por la Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Quebec, Canada 10 p.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Jiménez-Ávila, E. y V. P. Martínez. 1979. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero II. Producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. *Biótica* 4:109-126.
- Libert-Amico, A. 2017. Paisajes bioculturales ante el cambio climático: carbono y agrobiodiversidad en cafetales bajo sombra en Chiapas. pp. 94-99. En: F. Paz, R. Torres y A. Velázquez (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A. 2018. Resiliencia socio-ecológica ante la crisis del café en la Sierra Madre de Chiapas, México. pp. 149-155. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A. 2020. La clasificación de sistemas agroforestales: las contribuciones del café bajo sombra a la sustentabilidad. pp. 65-71. En: J.M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A., C. Ituarte-Lima and T. Elmqvist. 2020. Learning from social-ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science* 15:485-501.
- Libert-Amico, A. y F. Paz-Pellat. 2018. Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques* doi:10.21829/myb.2018.2401914.
- Libert-Amico, A., J. C. Wong-González y F. Paz-Pellat. 2016. Impacto de la roya del cafeto en los almacenes de carbono en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 219-225. En: F. Paz y R. Torres (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016. Texcoco, Estado de México, México.
- Mas, A. H. and T. V. Dietsch. 2003. An index of management intensity for coffee agroecosystems to evaluate butterfly species richness. *Ecological Applications* 13:1491-1501.
- Masuhara, A., E. Valdéz, J. Pérez, D. Gutiérrez, J. C. Vázquez, E. Salcedo, M. J. Juárez y A. Merino. 2015. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica de Ciencia y Tecnología* 4:69-93.
- Merlín-Uribe, Y., F. Charbonnier, A. Contreras-Hernández, O. B. Herrera Hernández y L. Soto-Pinto. 2018. Tipología de estrategias campesinas en la caficultura orgánica de la Sierra Madre de Chiapas. *Ecosist. Recur. Agropec.* 5:411-423.
- Moguel, P. and V. M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13:11-21.
- Moguel, P. y V. M. Toledo. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* 55:2-7.
- Morales Coutiño, T. A. 2010. Carbono en Sistemas Ganaderos en un Paisaje de Conservación REBIMA Chiapas, México. Tesis

- de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. 61 p.
- Nelson, K. C. and B. H. J. de Jong. 2003. Making global initiatives local realities: carbon mitigation projects in Chiapas, Mexico. *Global Environmental Change* 13:19-30.
- Nolasco, M. 1985. *Café y Sociedad en México*. Centro de Ecodesarrollo. D.F., México 454 p.
- Paz-Pellat, F. 2020. Costo de las políticas públicas asociadas al manejo de la roya en los cafetales bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas pp. 81-86. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020*. Texcoco, Estado de México, México.
- Paz-Pellat, F. 2022a. Iniciativa del banco mexicano del carbono: elementos constitutivos y rasgos principales. *Elementos para Políticas Públicas* 6:1-12.
- Paz-Pellat, F. 2022b. Derechos del carbono y servicios ambientales: la doble negación. *Elementos para Políticas Públicas* 6:13-20.
- Perfecto, I., M. E. Jiménez-Soto and J. Vandermeer. 2019. Coffee landscapes shaping the anthropocene, forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology* doi: 10.1086/7703413.
- Perfecto, I., A. Mas, T. Dietsch and J. Vandermeer. 2003. Conservation of biodiversity in coffee agroecosystems: a tri-taxa comparison in southern Mexico. *Biodiversity and Conservation* 12:1239-1252
- Perfecto, I., J. Vandermeer, A. Mas and L. Soto Pinto. 2005. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics* 54:435-446.
- Pineda-López, M. R., G. Ortiz-Ceballos y L. R. Sánchez-Velásquez. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio Ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11:3-14.
- PMC. 2011. *Manual de Campo para el Inventario Forestal Estatal Cuantitativo (Versión 2.11)*. Coordinación: F. Paz, Colaboradores: M. Casiano, C. O. Cruz, J. Argumedo, B. de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México 129 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>.
- PMC. 2015. *Manual de procedimientos inventario cuantitativo de carbono+*. Estudio de factibilidad Técnica para el pago de bonos de carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Fabiola Rojas-García, Julio Cesar Wong y José Ignacio Pulido Ponce. Texcoco, Estado de México, México 69 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>.
- Poeplau, C., C. Vos and A. Don. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameter's bulk density and rock fragment content. *Soil* 3:61-66.
- Raunkiaer, C. 1934. *The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography*. Oxford University Press, London.
- Rojas-García, F., B.H.J. De Jong, P. Martínez-Zurimendi y F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72:835-864.
- SAGARPA. 2017. *Cierre de la Producción Agrícola*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México: SAGARPA. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx>.
- Salas-Aguilar, V. M., F. Paz-Pellat, F. Rojas-García y M. Bolaños. 2018. Almacenes de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros de la Sierra Madre de Chiapas pp. 671-677. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México.
- Salas-Aguilar, V., C. Sánchez-Sánchez, F. Rojas-García, F. Paz-Pellat, J. R. Valdez-Lizalde and C. Pinedo-Álvarez. 2017. Estimation of vegetation cover using digital photography in a regional survey of Central Mexico. *Forests* 8, 392, doi:10.3390/f8100392.
- Soto-Pinto, L. and C. M. Aguirre-Davila. 2015. Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science* 7:117-128.
- Soto-Pinto, L., C. M. Aguirre-Dávila y M. J. Anzueto-Martínez. 2015. Almacenes de carbono en cafetales con distintos manejos en el Norte de Chiapas, México. pp. 256-263. En: F. Paz Pellat, J. Wong González y R. Torres Alamilla (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015*. Texcoco, Estado de México, México.
- Soto-Pinto, L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jiménez Ferrer and B. de Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest. Syst.* 78:39-51.
- Soto Pinto, L., B. H. J. de Jong, E. Esquivel Bazán y S. Quechulpa. 2006. Potencial ecológico de captura de carbono en cafetales. pp. 373-380. En: J. Pohlen, L. Soto y J. Barrera (eds.). *El Cafetal del Futuro, Realidades y Visiones*. Shaker Verlag, Germany
- Soto-Pinto, L. y G. Jiménez-Ferrer. 2018. Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosques*. doi:10.21829/myb.2018.2401887.
- Soto-Pinto, L., I. Perfecto, J. Castillo-Hernández and J. Caballero-Nieto. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80:61-69.
- Soto-Pinto, L., Y. Romero-Alvarado, J. Caballero-Nieto and G. Segura Warnholtz. 2001. Woody plant diversity and structure of

- shade-grown-coffee plantations in Northern Chiapas, Mexico. *Rev. Biol. Trop.* 49:977-987
- Soto-Pinto, L., V. Villalvazo-López, G. Jiménez-Ferrer, N. Ramírez-Marcial, G. Montoya and F. L. Sinclair. 2007. The role of local knowledge in determining composition of multi-strata systems in Chiapas, Mexico. *Biodiversity and Conservation* 16:419-436.
- Tinoco-Rueda, J. A., E. Escamilla-Prado y M. Flores-Ordoñez. 2021. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo en cafetales orgánicos del centro de Veracruz, México. pp. 605-608. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- Toledo, V. M. and P. Moguel. 2012. Coffee and sustainability: the multiple values of traditional shaded coffee. *Journal of Sustainable agriculture* 36:353-377.
- Toledo-Aceves, T., K. Mehlreter, J.C. García-Franco, A. Hernández-Rojas and V. J. Sosa. 2013. Benefits and costs of epiphyte management in shade coffee plantations. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 181:149-156.
- Tscharntke, T., Y. Clough, S. A. Bhagwat, D. Buchori, H. Faust, D. Hertel, D. Hölscher, J. Jührbandt, M. Kessler, I. Perfecto, C. Scherber, G. Schroth, E. Veldkamp and T. C. Wanger. 2010. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes – a review. *Journal of Applied Ecology*. doi:10.1111/j.1365-2664.2010.01939.
- Valdés-Velarde, E., L. Rojas-Pérez, J. C. Vázquez-Rodríguez, V. M. Ordaz-Chaparro, J. Pérez-Nieto, J. C. Vázquez-Rodríguez, M. J. Juárez-Hernández, D. Gutiérrez-del-Pozo y A. Merino. 2014. Estudio del carbono en sistemas agroforestales de una región cafetalera de Veracruz. pp. 55-61. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Texcoco, Estado de México, México.
- Valdés-Velarde, E., Vázquez-Rodríguez, V. M. Ordaz-Chaparro, J. Pérez-Nieto, J. Ayala-Arreola, J. F. Gallardo-Lancho, E. Salcedo-Pérez y L. Krishnamurthy. 2014. Carbono capturado en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) en Chocorán (Veracruz, México). pp. 62-69. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México*.
- Van Rikxoort, G. Schroth, P. Läderach and B. Rodríguez-Sánchez. 2014. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agron. Sustain. Dev.* 34:887-897.
- Van Wagner, C. E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science* 14: 20-26.
- Vázquez-Sánchez M., T. Terrazas y S. Arias. 2012. El hábito y la forma de crecimiento en la tribu Cactaceae (*Cactaceae Cactoideae*). *Botanical Sciences*. 90: 97-108.
- Villareyna, R., J. Avelino y R. Cerdaa. 2020. Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana* 31:499-516.
- Warren, W. G. and P. F. Olsen. 1964. A line intersect technique for assessing logging waste. *Forest Science* 10:267-276.
- Williams-Guillén and S. Otterstrom. 2014. Market-based incentives for the conservation of ecosystem services in agricultural landscapes: examples from coffee cultivation in Latin America. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems, Volume 4*, pp.172-185.
- Williams-Linera, G. y A. López-Gómez. 2008. Estructura y diversidad de la vegetación leñosa. pp. 55-68. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (eds). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. INECOL e INE-SEMARNAT, México.
- Zewdie, B., A. J. M. Tack, B. Ayalew, M. Wondafrash, S. Nemomissa and K. Hylander. 2022. Plant biodiversity declines with increasing coffee yield in Ethiopia's coffee agroforests. *Journal of Applied Ecology* 59:1198-1208.

DIVERSIDAD VEGETAL EN CAFETALES BAJO SOMBRA Y VEGETACIÓN NATURAL EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MÉXICO

PLANT DIVERSITY IN COFFEE PLANTATIONS UNDER SHADE AND NATURAL VEGETATION IN THE SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MÉXICO

Fernando Paz^{1‡}, Víctor Salas², Cristóbal Sánchez³, Antoine Libert⁴ y Martín A. Bolaños⁵

¹ Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.

² Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³ Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo, Estado de México, México.

⁴ Programa Mexicano del Carbono, Estado de México, México.

⁵ Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, Estado de México, México.

‡ Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

Los cafetales bajo sombra tienen gran importancia en los estados del sureste de México. En Chiapas, en la Sierra Madre, son importantes para los niveles de vida de los productores rurales. La tipología propuesta por Moguel y Toledo se utilizó para definir los diferentes tipos de cafetales bajo sombra. La riqueza (número) de especies (S) se ha utilizado como una métrica de diversidad, la cual no varía con relación al ambiente. La riqueza de tipos funcionales (Sg) es función del ambiente. El objetivo de la contribución es establecer una relación entre Sg y S que simplifique su parametrización, para usarse en aplicaciones con datos restringidos. Se realizó una campaña en 2016 en la Sierra Madre de Chiapas, con 82 sitios de muestreo en diferentes tipos de cafetales bajo sombra y vegetación natural. Después de la revisión de la consistencia de los patrones de la base de datos original, se utilizaron 72 sitios para el análisis. Los resultados mostraron relaciones lineales entre las riquezas ($S = a + bSg$), aunque con algún grado de dispersión. Los parámetros a y b, de la relación lineal entre Sg y S, forman una relación lineal, producto de la intersección de líneas rectas en un punto común, que puede ser usada para simplificar el proceso de estimación de la relación lineal Sg-S con el uso de un punto de medición (Sg, S), facilitando la evaluación de la diversidad vegetal.

Palabras clave: *riqueza de especies; riqueza de tipos funcionales; usos del suelo; perturbaciones; relación de parámetros a y b.*

ABSTRACT

Shade-grown coffee plantations are of great importance in the southeastern states of Mexico. In Chiapas, in the Sierra Madre, they are important for the living standards of rural producers. The typology proposed by Moguel and Toledo was used to define the different types of coffee plantations under shade. The richness (number) of species (S) has been used as a diversity metric, which does not vary in relation to the environment. The richness of functional types (Sg) is a function of the environment. The objective of the contribution is to establish a relationship between Sg and S that simplifies its parameterization, to be used in applications with restricted data. A campaign was carried out in 2016 in the Sierra Madre of Chiapas, with 82 sampling sites in different types of

coffee plantations under shade and natural vegetation. After consistency check of the original database patterns, 72 sites were used for analysis. The results showed linear relationships between richness ($S = a + bSg$), although with some degree of dispersion. The parameters a and b , of the linear relationship between Sg and S , form a linear relationship, product of the intersection of straight lines at a common point, which can be used to simplify the process of estimating the linear relationship Sg - S with the use of a measurement point (Sg, S), facilitating the evaluation of plant diversity.

Keywords: species richness; richness of functional types; land use relationships; disturbances; relationship of parameters a and b .

INTRODUCCIÓN

La producción de café en México es una actividad importante para los ingresos de los productores rurales. En el sureste de México, con productores de bajos ingresos y alta marginalidad, la cafecultura, principalmente bajo sombra, con café arábigo (*Coffea arabica*) representa una fuente importante de los medios de vida de los productores (Libert-Amico *et al.*, 2020). Chiapas es el principal estado productor de café a nivel nacional (SAGARPA, 2017), con el 41% de la producción de México (CEDRSSA, 2019). La Sierra Madre de Chiapas representa el 54% de la superficie sembrada con café en el estado (SAGARPA, 2017) y ha sido fuente preferencial de productos de calidad derivados de la variedad *C. arabica* comercializados en nichos de café gourmet del mercado internacional, además de contribuir en la producción de servicios ecosistémicos y biodiversidad (Libert-Amico *et al.*, 2020).

Los tipos de cafetales bajo sombra (Moguel y Toledo, 1999) plantean un balance entre conservación y producción (Moguel y Toledo, 2004), por lo que este sistema agroforestal representa niveles de biodiversidad cercanos a los bosques y selvas originales (Moguel y Toledo, 1999; Soto-Pinto *et al.*, 2001; Perfecto *et al.*, 2005; Williams-Linera y López-Gómez, 2008; Perfecto *et al.*, 2019), por lo que es importante su caracterización. La vegetación natural, como referencia, permite realizar análisis comparativos con los cafetales.

Entre las diversas métricas de la biodiversidad en comunidades vegetales, la riqueza (número) de plantas vasculares (S) es de los indicadores más utilizados (NRC, 2000; Newton y Kapos, 2002; Croezem *et al.*, 2011). La utilización de plantas vasculares facilita su

medición e interpretación, además de estar relacionada con otros grupos biológicos de interés (Santi *et al.*, 2010; Lindenmayer y Likens, 2011; Gao *et al.*, 2015).

En la parte ambiental, las especies de plantas vasculares tienen una gran diversidad de mecanismos de respuestas al medio ambiente, por lo que su distribución puede analizarse con el uso de factores ambientales relacionados a atributos morfológicos y fisiológicos (Dumortier *et al.*, 2002; Ohlemüller *et al.*, 2004).

La riqueza de especies no impacta directamente a las respuestas dinámicas de la vegetación ante cambios ambientales, a diferencia de los grupos o tipos funcionales (Phillips *et al.*, 1994; Tilman *et al.*, 2002), los cuales son conjuntos de organismos que comparten ciertas características morfológicas, fisiológicas y adaptativas, de respuesta al medio ambiente, independientemente de su afinidad taxonómica (Díaz y Cabido, 2001). Los tipos funcionales de plantas vasculares responden de manera similar al ambiente o tienen efectos similares en el funcionamiento del ecosistema (Shugart, 1996; Díaz y Cabido, 2001; Gillison, 2013 y 2016). Las métricas de diversidad funcional no siempre se correlacionan con la riqueza de especies (Díaz Cabido, 2001; Hooper *et al.*, 2005).

No existe una clasificación universal de tipos funcionales, por lo que depende del objetivo, escala y proceso ecosistémico o factor ambiental de interés (Lavorel *et al.*, 1997). Uno de los enfoques sobresalientes de tipos funcionales es el propuesto por Gillison (Gillison, 1981; Gillison y Carpenter, 1997; Gillison, 2002; Gillison, 2006; Gillison, 2013; Gillison, 2016) que agrupa a los individuos en función de la envoltura fotosintética (tamaño e inclinación de las hojas, clorotipo y tipo de hoja) y la estructura de soporte

vascular (forma de vida y tipo de raíz). La ventaja del uso del sistema de Gillison para tipos funcionales de plantas vasculares es que se realiza en forma visual y solo requiere de un entrenamiento mínimo, por lo que puede implementarse por profesionales o gente capacitada de las comunidades, lo que evita los costos asociados a los muestreos taxonómicos; particularmente en bosques y selvas.

La riqueza de tipos funcionales (Sg), asociada a la de especies de plantas vasculares (S), define la métrica S/Sg. La relación S/Sg se asoció con la riqueza de especies de termitas (Gillison *et al.*, 2003 y 2013), con buenos resultados. También se ha relacionado con la riqueza de aves y escarabajos (Gillison y Liswanti, 2004), además del carbono en la biomasa aérea (Gillison *et al.*, 2003; Gillison y Liswanti, 2004); aunque esta última relación muestra una saturación de S/Sg (no cambia de valor después de un umbral).

El análisis de los patrones muestra que S/Sg disminuye en función del nivel de perturbación en los usos del suelo, aunque las tendencias no resultan claras al mezclarse diferentes condiciones (sucesión y no sucesión) de la vegetación. Métricas más complejas, como el análisis multivariado, asociadas con S/Sg se han utilizado para mejorar las tendencias y que reflejen patrones generales de perturbación del sistema (Gillison *et al.*, 2003 y 2004).

Para caracterizar los patrones de la relación S-Sg en los cafetales bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas se implementó un programa de muestreo en el 2016 dentro de la campaña “Una REDD+ para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas” (Libert *et al.*, 2016) implementada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC), para generar información relacionada con la presencia de la roya (*Hemileia vastatrix*) en los cafetales y los almacenes de carbono. La presencia de la roya en Chiapas ha provocado la reducción de la sombra de los cafetales y cambios de uso del suelo hacia a milpas y potreros (Avelino *et al.*, 2015; Libert-Amico *et al.*, 2016; Harvey *et al.*, 2021), con la consiguiente pérdida de carbono. Los muestreos realizados en el 2016 de las relaciones S-Sg y otras métricas, analizados previamente por Sánchez-Sánchez (2018) en una perspectiva diferente, forman la base de la caracterización de los cafetales y vegetación natural incluida en el proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” (Bolaños *et al.*, 2021) para definir relaciones entre las variables medidas para su simplificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo en cafetales y vegetación natural

La campaña de muestreo de la biodiversidad de los cafetales y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas se realizó durante el 2016. Se propusieron 82 sitios de muestreo (PMC) con 29 sitios asociados a parcelas de muestreo de la roya por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). La Figura 1 muestra la distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA. El SENASICA, dentro de la región de estudio, estableció parcelas de muestreo fijas (permanentes) y móviles con el objetivo de evaluar el avance de la roya en los cafetales. La campaña de muestreo de almacenes de carbono, cobertura aérea y diversidad vegetal del PMC estuvo orientada a evaluar los efectos de la roya en el manejo de los cafetales.

De los 82 sitios de muestreos, la revisión de la consistencia de sus patrones generales entre variables permitió una selección final de 72 sitios para su estudio.

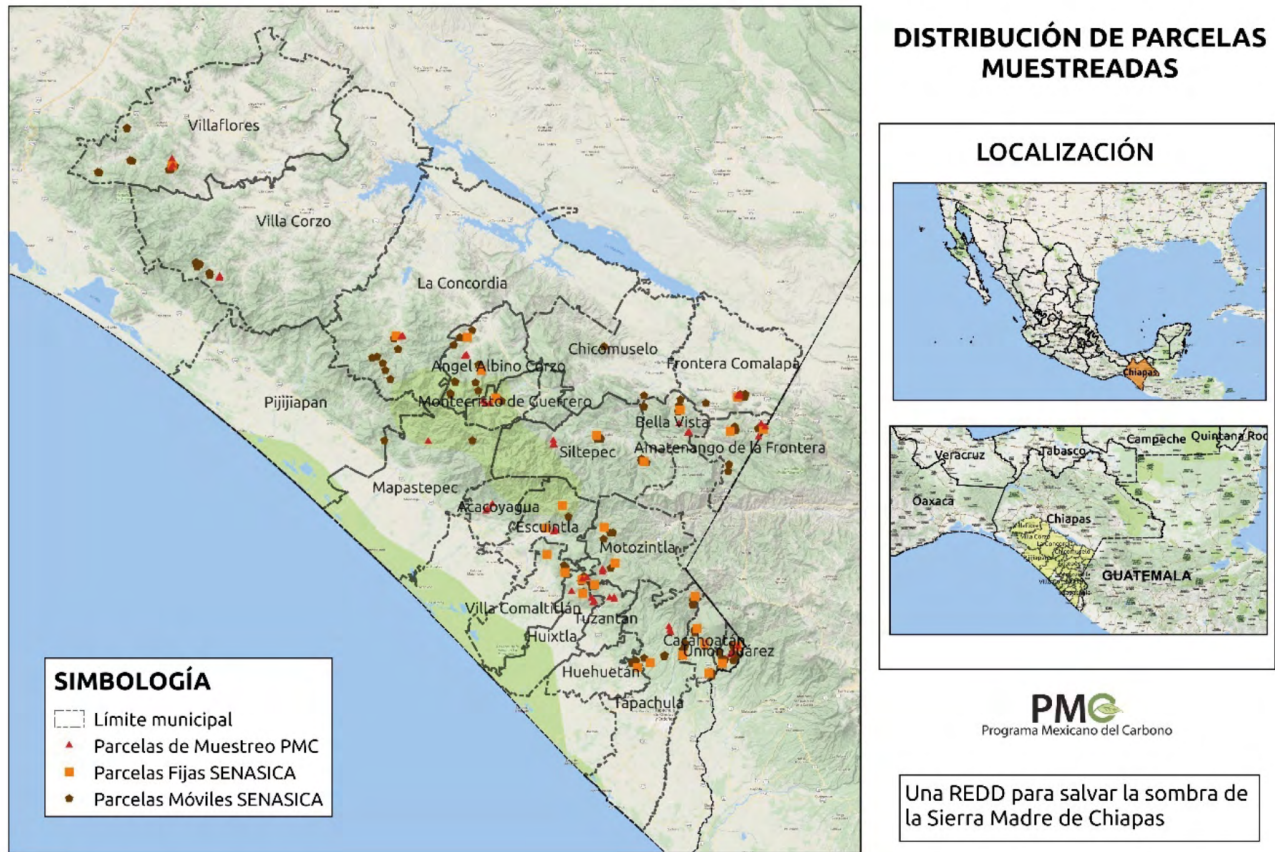


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

Tipología de cafetales bajo sombra

La clasificación o tipología de cafetales bajo sombra ha sido analizada previamente (Nolasco, 1985) y refinada por Moguel y Toledo (1999), Figura 2. La tipología de Moguel y Toledo fue utilizada como base en la caracterización de los cafetales y el sistema de clasificación del INEGI para la vegetación natural (Paz-Pellat *et al.*, 2019).

La tipología de los cafetales bajo sombra propuesta por Moguel y Toledo (1999) considera cinco tipos: (a) “rústico” o “de montaña”, el cual asemeja a un bosque o selva que ha sido aclarado en su estrato inferior (sotobosque) y sustituido por plantas de café, manteniendo los árboles de sombra. (b) “policultivo tradicional” o “jardín de café”. El estrato inferior es

sustituido por cafetos y la sombra está compuesta por árboles naturales e introducidos de diferentes usos: especies maderables y frutales, entre otros. La mezcla de árboles naturales e introducidos define la complejidad de su estructura. (c) “policultivo comercial”. La sombra es removida totalmente, para generar sombra con dos o tres especies de árboles de tipo comercial y otros para la subsistencia local. La remoción total de la sombra usando árboles introducidos reduce la complejidad estructural y diversidad de la sombra. (d) “monocultivo bajo sombra” o “especializado”. Después de la remoción de la sombra, se plantan árboles, muchas veces de una sola especie (por ejemplo, *Inga*). (e) “monocultivo sin sombra” o “a pleno sol”. No tiene sombra y está expuesto al sol, con altas densidades de cafetos.

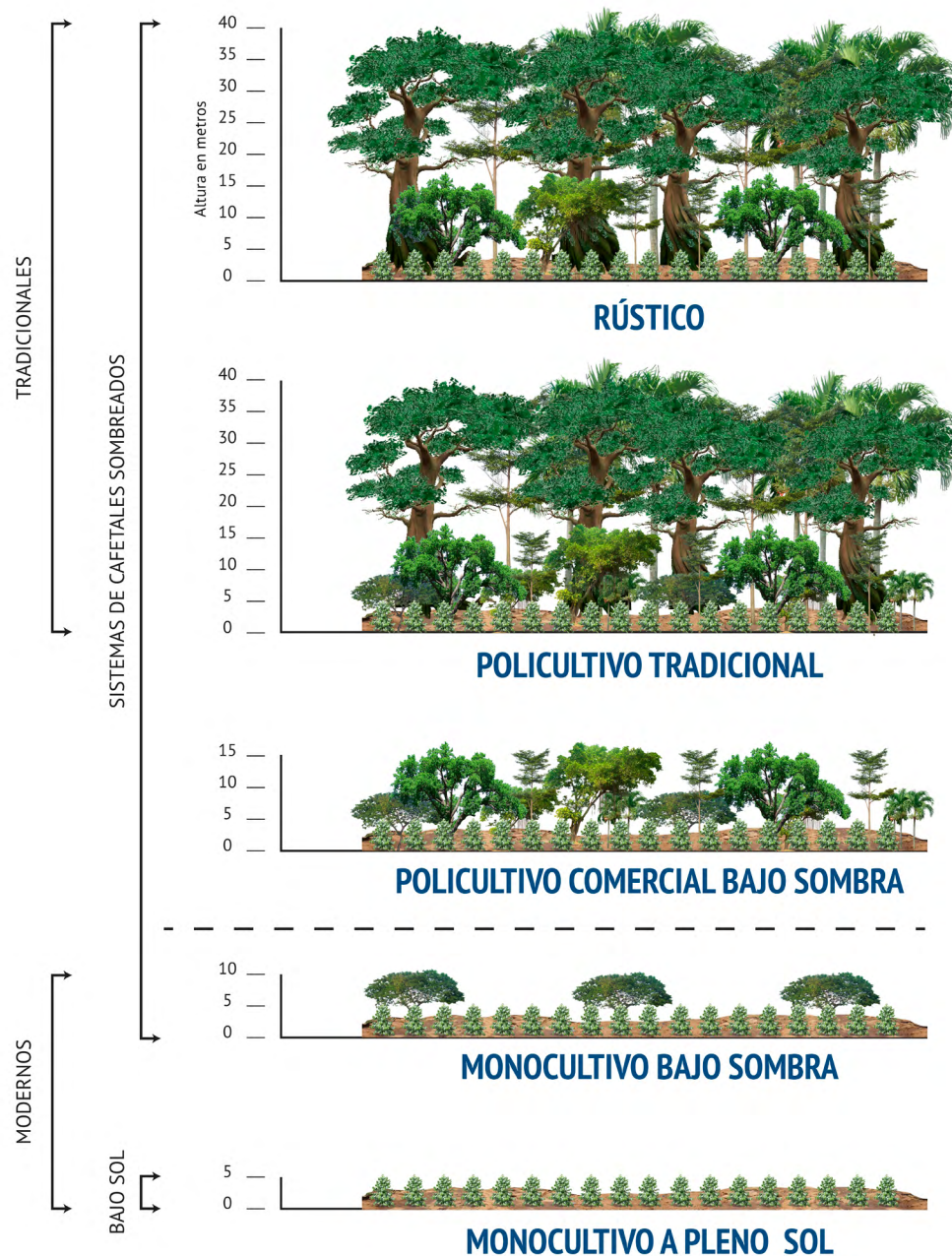


Figura 2. Tipología de cafetales bajo sombra. Adaptado de Moguel y Toledo (1999).

Muestreos de diversidad en cafetales y vegetación natural

Los muestreos de S y Sg fueron realizados en círculos de 1000 m², siguiendo protocolos estandarizados (PMC, 2015a y b).

Registro de especies

En el trabajo de campo, se registraron todas las especies de plantas vasculares presentes en cada

sitio de muestreo, siguiendo el formato para esto. Se tomaron fotografías de todos los taxa y sólo se colectaron aquellos en floración o fructificación mediante los métodos estándar (Lot y Chiang, 1986) y la identificación taxonómica de gabinete se realizó utilizando literatura especializada.

La composición florística (especies, géneros y familias) fue analizada en los sitios muestreados. Para realizar un catálogo de especies se tomó con referencia en el sistema de clasificación taxonómica de

angiospermas APG IV (2016). Para la nomenclatura de gimnospermas y pteridofitas se realizaron consultas al Proyecto de Flora Mundial Tropicos® del Herbario del Jardín Botánico de Missouri (Missouri Botanical Garden, 2016), el cual contiene las actualizaciones más recientes de la información taxonómica referente a este tipo de plantas.

Caracterización de tipos funcionales de plantas

El tipo funcional de cada especie de acuerdo con el sistema de clasificación funcional desarrollado por Gillison (2002), en el cual se considera la configuración espacial y temporal del tejido foliar y vascular de las

plantas evaluadas, así como aptitudes relacionadas con su supervivencia y respuesta al ambiente.

El método de Gillison (2002, 2006) utiliza un modelo funcional de dos componentes: su estructura fotosintética y su sistema vascular de soporte (Cuadro 1). La estructura fotosintética se caracteriza por la unidad foliar funcional más repetitiva, en función a su tamaño, inclinación, clorotipo y forma. El sistema vascular de soporte esta definido con base en las formas de vida de Raunkiær (1934) y una clasificación de sistemas radicales adventicios.

Cuadro 1. Atributos del sistema descriptivo para tipos funcionales de plantas. Fuente: Gillison (2006).

Componentes del modelo funcional	Atributos	Elementos	Descripción
Tamaño foliar		<i>nr</i>	Unidad foliar no repetida
		<i>pi</i>	Picófila (< 0.2 cm)
		<i>le</i>	Leptófila (0.2-0.8 cm)
		<i>na</i>	Nanófila (0.8-2.5 cm)
		<i>mi</i>	Micrófila (2.5-7.5 cm)
		<i>no</i>	Notófila (7.5-12.5 cm)
		<i>me</i>	Mesófila (12.5-25 cm)
		<i>pl</i>	Platífila (25-36 cm)
		<i>ma</i>	Macrófila (36- 83 cm)
		<i>mg</i>	Megáfila (> 83 cm)
Cubierta fotosintética	Inclinación foliar	<i>ve</i>	Vertical (> 30° por encima de la horizontal)
		<i>la</i>	Lateral (± 30° a la horizontal)
		<i>pe</i>	Pendular (> 30° por debajo de la horizontal)
		<i>co</i>	Compuesta
Clorotipo foliar		<i>do</i>	Dorsoventral
		<i>is</i>	Isobilateral o isocéntrico
		<i>de</i>	Caducifolio
		<i>ct</i>	Córtico (tallo fotosintético)
		<i>ac</i>	Aclorófilo (sin clorofila)
		<i>ro</i>	Roseta
		<i>so</i>	Sólido tridimensional

Cuadro 1. Atributos del sistema descriptivo para tipos funcionales de plantas (Continuación).

Componentes del modelo funcional	Atributos	Elementos	Descripción
Cubierta fotosintética	Morfotipo Foliar	<i>su</i>	Suculento
		<i>pv</i>	Nervadura paralela
		<i>fi</i>	Filicoide (pteridofitas)
		<i>ca</i>	Insectívoro
Estructura vascular de soporte	Forma de vida	<i>ph</i>	Fanerofita
		<i>ch</i>	Caméfito
		<i>hc</i>	Hemicriptófita
		<i>cr</i>	Criptófita
		<i>th</i>	Terófita
		<i>li</i>	Lianoide
	Tipo de raíz	<i>ad</i>	Adventicia (e.g. contrafuertes)
		<i>ae</i>	Aérea (e.g. neumatóforos)
		<i>ep</i>	Epifítica (e.g. <i>Tillandsia</i> spp.)
		<i>hy</i>	Hidrofítica (e.g. <i>Nymphaea</i> spp.)
		<i>pa</i>	Parasítica (e.g. <i>Cuscuta</i> spp.)

Los atributos funcionales considerados se integran de 36 caracteres, denominados elementos funcionales (Cuadro 1), de manera que las especies y morfoespecies con la misma combinación de elementos funcionales forman los llamados grupos o tipos funcionales de plantas, por ejemplo: *Roldana angulifolia* (DC.) H. Rob. & Brettell se caracteriza de la siguiente manera: *meladoph* = *me* (hoja mesófila), *la* (inclinación lateral), *do* (clorotipo dorsoventral), *ph* (fanerofita) (Gillison, 2002; Gillison, 2006).

Patrones de la relación S-Sg

Para un tipo de uso del suelo (cafetal o vegetación natural), la relación entre S y Sg es generalmente de tipo lineal (Paz-Pellat *et al.*, 2022), (Figura 3), para distintos usos del suelo de una base mundial.

La relación entre S y Sg para vegetación natural y perturbada muestra diferentes patrones (líneas rectas) que se diferencian entre sí (Figura 4).

Para los cafetales de diferentes edades, Gillison *et al.* (2004) muestran una relación lineal entre S y Sg. Para el caso de una perturbación de uso del suelo, el patrón de S-Sg cambia los parámetros de la línea de tendencia (Gillison, 1996), pudiéndose diferenciar en forma fácil.

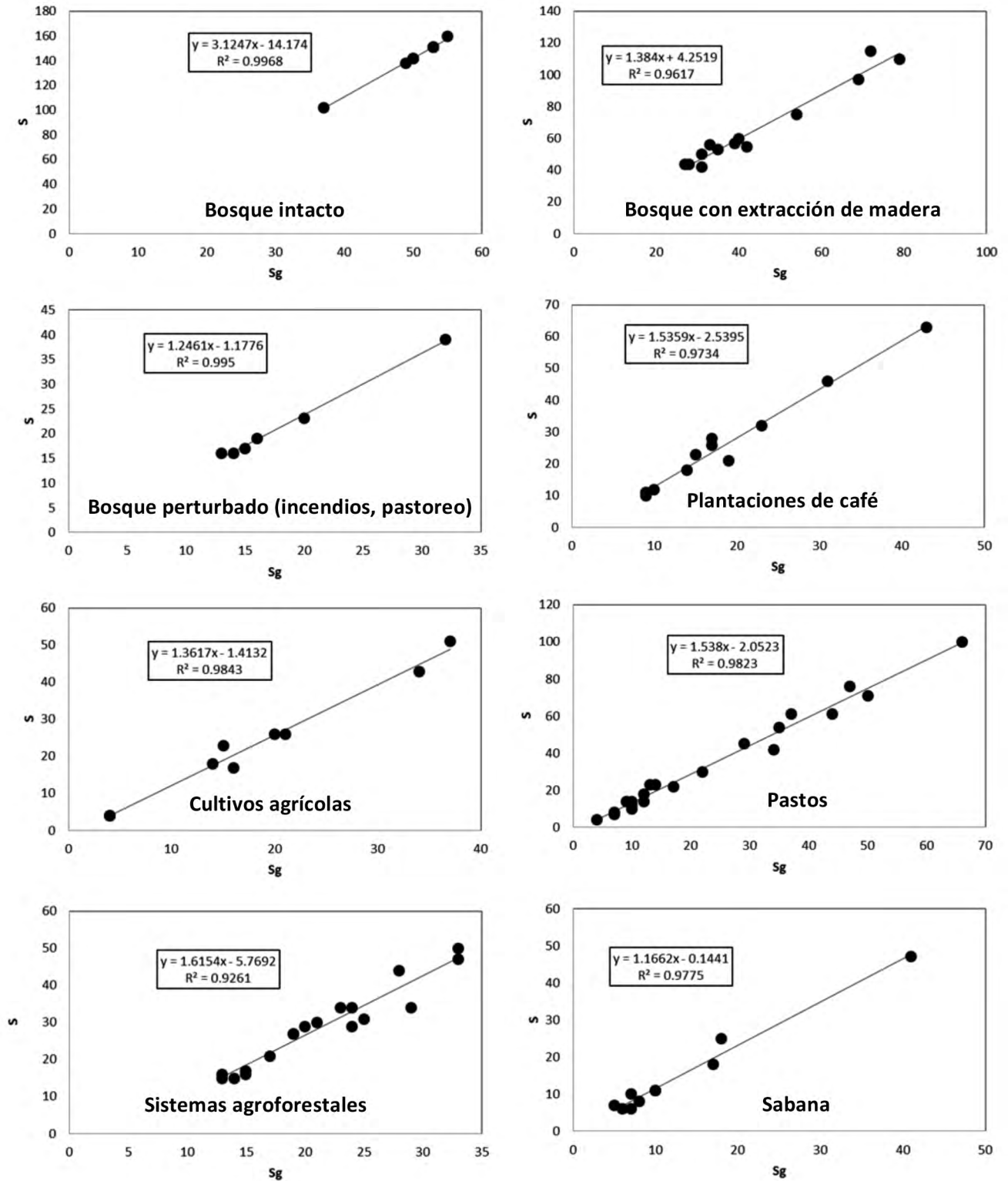


Figura 3. Relación S-Sg para diferentes usos del suelo. Fuente: Paz-Pellat *et al.* (2022).

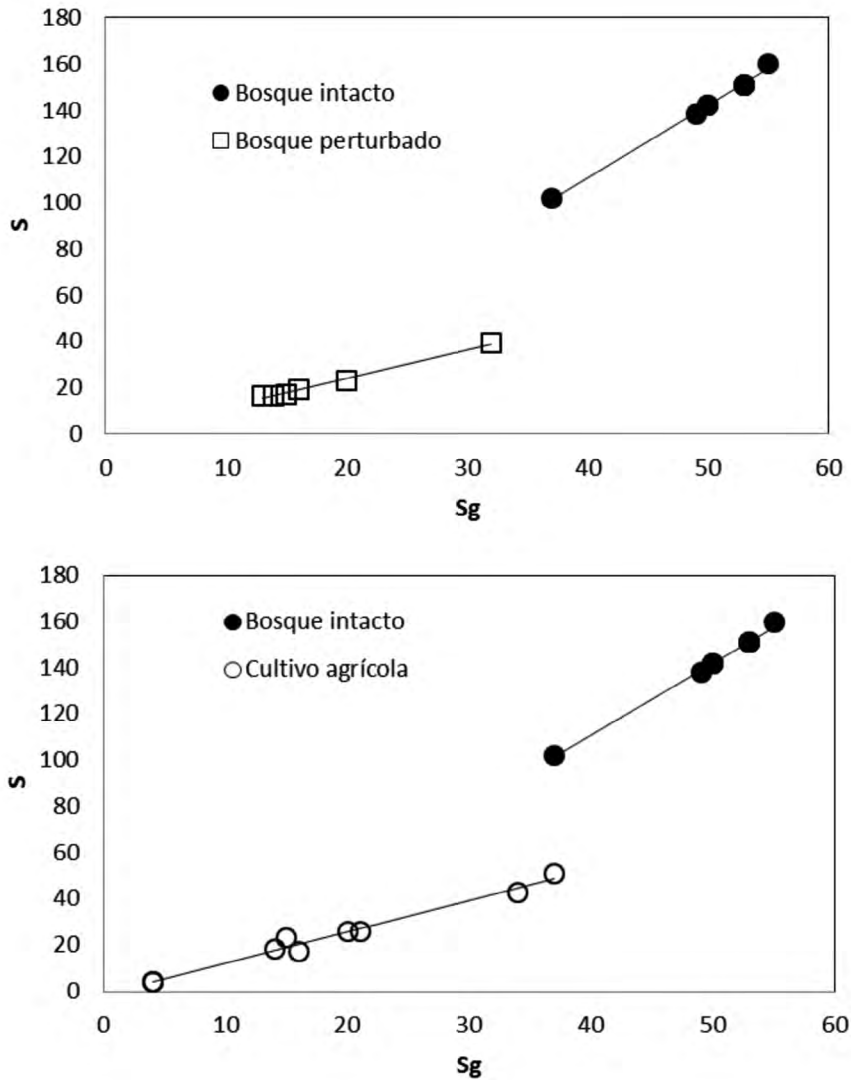


Figura 4. Relación S-Sg para vegetación natural y perturbada. Fuente: Paz-Pellat *et al.* (2022).

RESULTADOS

Los diferentes patrones entre S y Sg fueron analizados para revisar sus patrones matemáticos en las relaciones generadas.

La relación entre S y Sg para los tipos de cafetales y vegetación natural se muestra en la Figura 5 para todos los datos. De la observación de la distribución

de los puntos de muestreo de la Figura 5, emerge un patrón de líneas con diferentes pendientes y un punto común de intersección, localizado en la parte inferior a la derecha de la figura.

En el caso de los cafetales a pleno sol, monocultivo bajo sombra y policultivo comercial bajo sombra en la Figura 6 se muestran los ajustes lineales de la relación Sg-S.

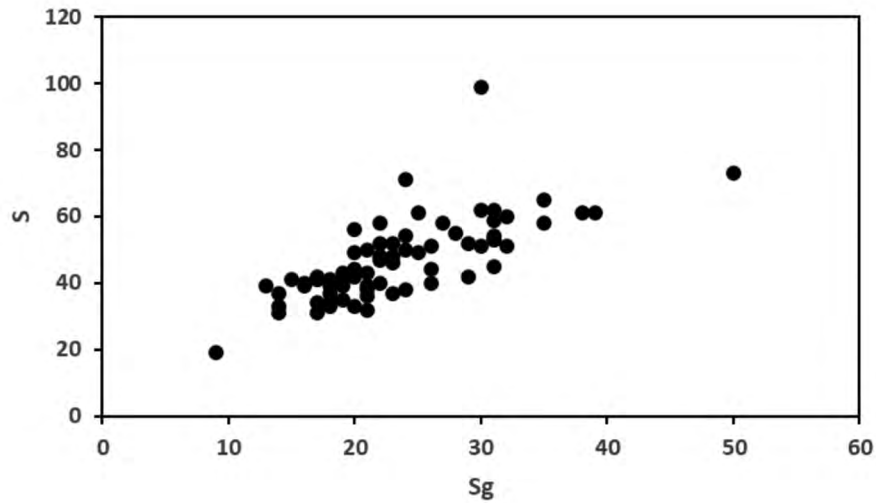


Figura 5. Distribución de los puntos Sg-S de todos los sitios de muestreo.

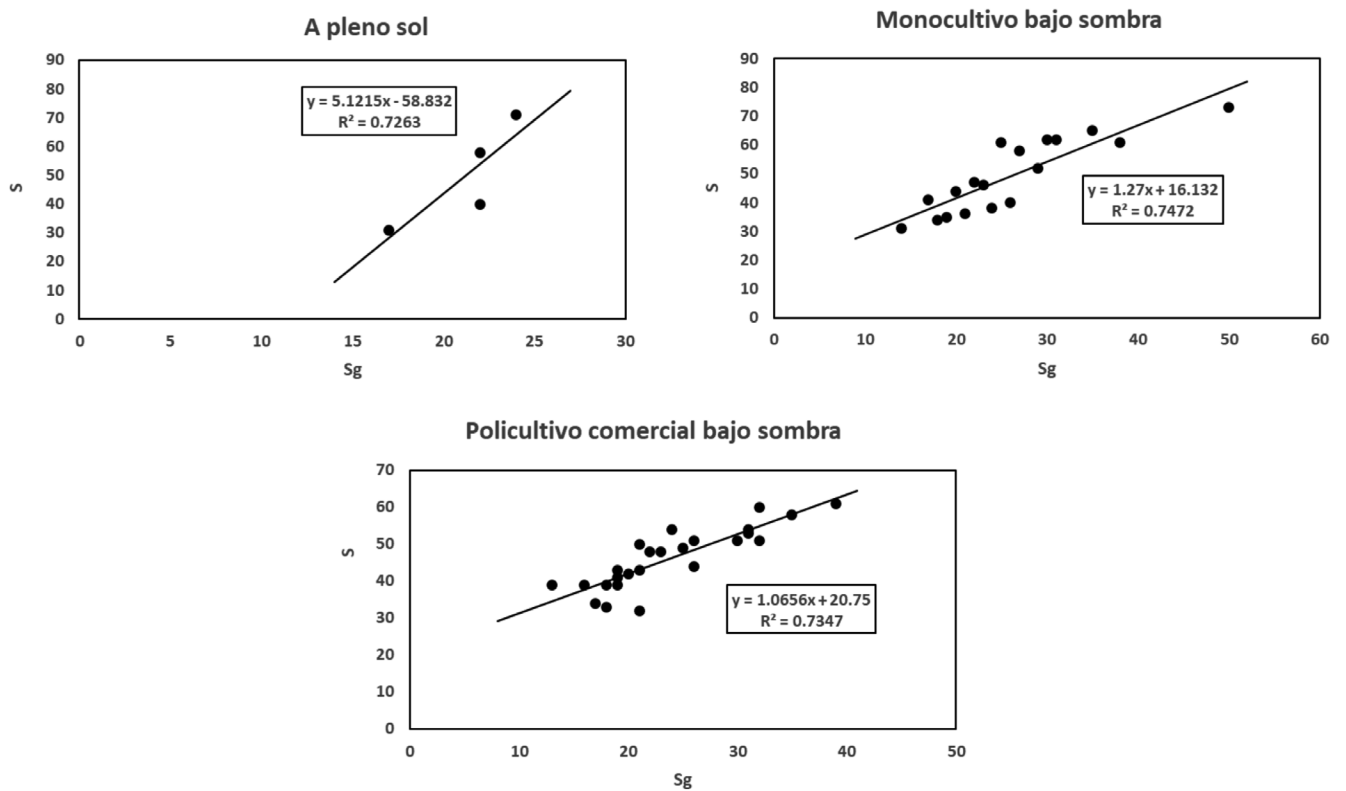


Figura 6. Ajustes de relaciones lineales para Sg-S para cafetales a pleno sol, monocultivos bajo sombra y policultivos comerciales bajo sombra.

Para los cafetales de policultivos tradicionales y rústicos, además de la vegetación natural, en la Figura 7

se muestran los ajustes lineales ($S = a + bSg$) para la relación Sg-S.

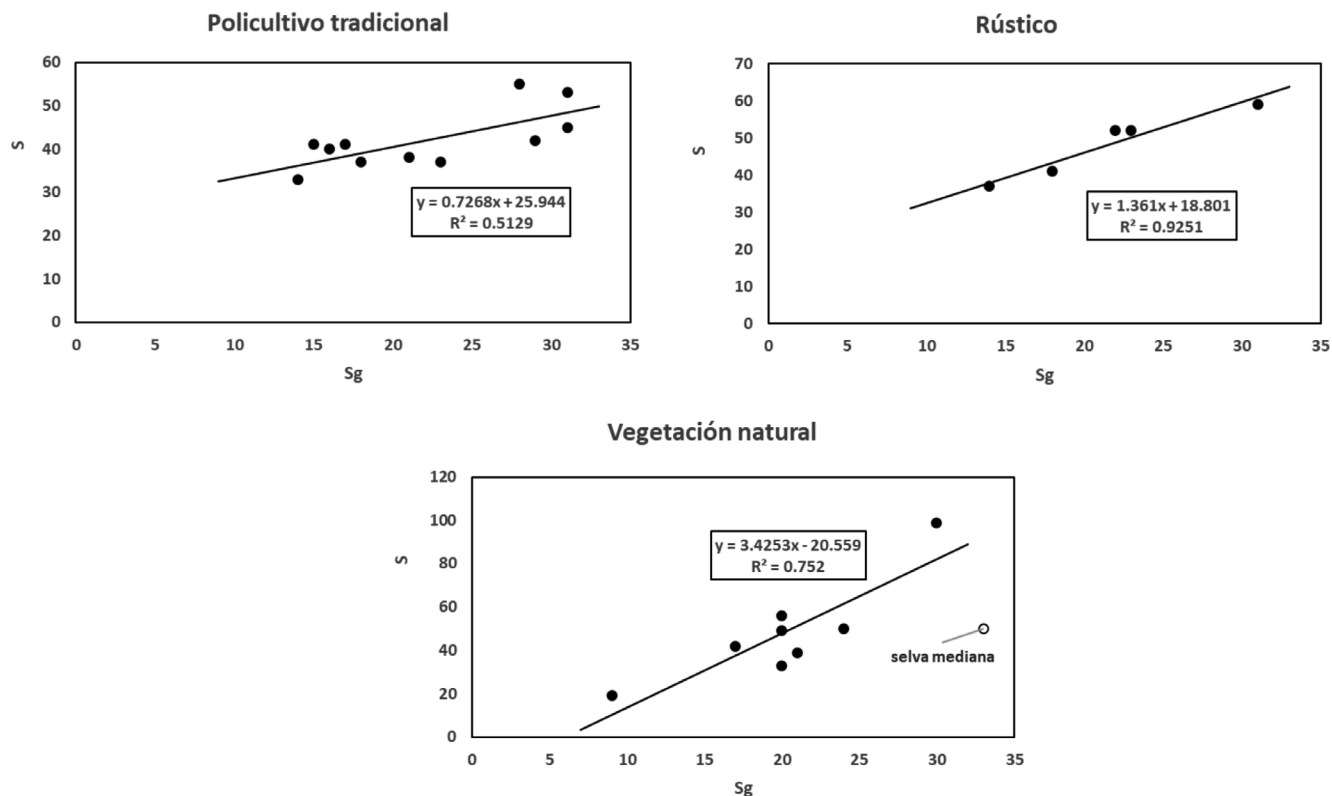


Figura 7. Ajustes de relaciones lineales para Sg-S para cafetales de policultivos tradicionales y rústicos, además de la vegetación natural.

De acuerdo con la propiedad de que los parámetros (a y b), relación lineal entre Sg y S, de un conjunto de líneas que se interceptan en un punto común se ajustan a una línea recta (Paz *et al.*, 2009); en el Cuadro 2 se

muestran los resultados de los ajustes estadísticos para a y b; además, en la Figura 8 se muestra de manera gráfica la relación entre estos parámetros.

Cuadro 2. Parámetros de las relaciones lineales entre Sg y S.

Uso del Suelo	a	b
Cafetal a pleno sol	-58.832	5.1215
Vegetación natural	-20.559	3.4253
Cafetal rústico	18.801	1.3610
Cafetal monocultivo bajo sombra	16.132	1.2700
Cafetal policultivo comercial bajo sombra	20.750	1.0656
Cafetal policultivo tradicional	25.944	0.7268

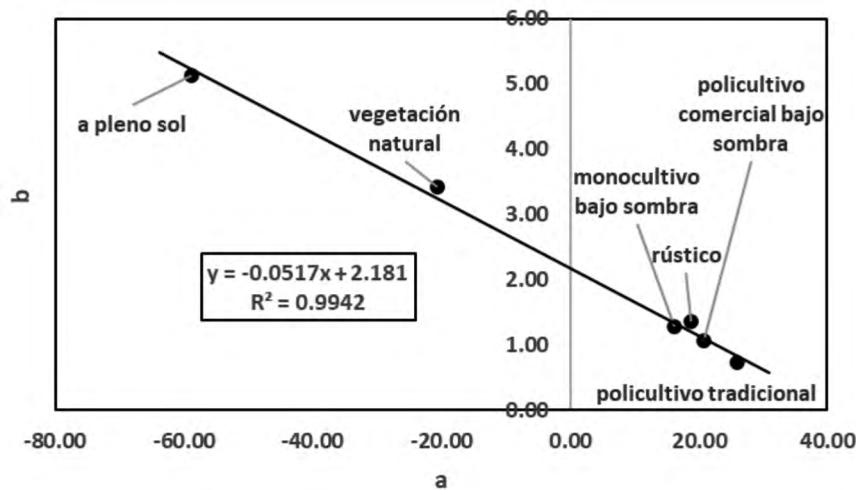


Figura 8. Relación lineal entre los parámetros a y b de las líneas entre Sg y S de los cafetales y vegetación natural.

Aunque la relación entre los parámetros a y b de las ecuaciones lineales de Sg-S para los tipos de cafetales y vegetación natural es una aproximación, con un solo par de datos (Sg, S) es posible estimar la ecuación entre Sg y S que define la diversidad vegetal. Para esto, la relación $b = 2.181 - 0.0517a$, Figura 8, debe sustituirse en las relaciones lineales $S = a + bSg$ para estimar los parámetros b y a usando el dato (Sg, S). Esto simplifica el proceso de estimación de la relación Sg y S, para caracterizar la diversidad vegetal.

DISCUSIÓN

Las relaciones entre Sg y S para los tipos de cafetales y vegetación natural muestran diferentes grados de dispersión en los ajustes estadísticos, por lo que los resultados obtenidos pueden considerarse como una aproximación a las relaciones reales. Esto es producto de la caracterización realizada utilizando la tipología de Moguel y Toledo (1999), la cual tiene un cierto nivel de subjetividad.

A pesar de la dispersión observada en los patrones de la relación Sg-S para los distintos cafetales y usos del suelo, la relación observada entre los parámetros lineales permite simplificar la parametrización de las relaciones Sg-S.

CONCLUSIONES

Las métricas de riqueza de especies (S) y tipos funcionales (Sg) se pueden utilizar para evaluar la diversidad vegetal de diferentes tipos de cafetales y la vegetación natural, permitiendo el análisis de la diversidad vegetal bajo una perspectiva más amplia.

El uso de la relación lineal entre los parámetros a y b permite simplificar la estimación de las relaciones lineales entre Sg y S al utilizar el par de datos medidos (Sg, S), simplificando el proceso de estimación.

En el contexto de los mercados del carbono, iniciativa banco mexicano del carbono del Programa Mexicano del Carbono (Paz-Pellat, 2022a) y los derechos del carbono asociados (Paz-Pellat, 2022b), los desarrollos mostrados permiten integrar la diversidad vegetal junto con el carbono al considerar las métricas S y Sg, definiendo mercados diferenciados del carbono (“premium”).

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

- APG IV. 2016. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 181: 1-20.
- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A. J. Hruska and C. Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321.
- Bolaños-González, M. A., A. Libert-Amico, F. Paz-Pellat, V. Salas-Aguilar, G. Villalobos-Sánchez, E. Escamilla-Prado, A. S. Velázquez-Rodríguez y E. I. Morales-Reyes. 2021. Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas. pp. 633-638. En: J.M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- CEDRSSA. 2019. Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-2024. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Cámara de Diputados - LXIV Legislatura 19 p.
- Croezen, H., G. Bergsma, A. Clemeus, M. Sevensteen, B. Tulleners. 2011. Biodiversity and land use. A search for suitable indicators for policy use. CE Delft, Delft. https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/8250_finalreportHCEV.pdf.
- Díaz, S. and M. Cabido. 2001. Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends Ecol. Evol.* 16: 646-655. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(01\)02283-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02283-2).
- Dumortier, M., J. Butaye, H. Jacquemyn, N. Van Camp, N. Lust and M. Hermy. 2002. Predicting vascular plant species richness of fragmented forests in agricultural landscapes in central Belgium. *Forest Ecology and Management* 158: 85-102.
- Gao, T., A. B. Nielsen and M. Hedblom. 2015. Reviewing the strength of evidence of biodiversity indicators for forest ecosystems in Europe. *Ecological Indicators*, 57, 420-434. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.028>.
- Gillison, A. N. 1981. Towards a functional vegetation classification. In: A. N. Gillison, and D. J. Anderson (eds). *Vegetation Classification in Australia*. CSIRO and Australian National University Press. Canberra, Australia pp. 30-41.
- Gillison, A. N. 2002. A generic, computer assisted method for rapid vegetation classification and survey: tropical and temperate case studies. *Conservation Ecology* 6:1-17. <http://www.jstor.org/stable/26271883>.
- Gillison, A. N. 2006. A field manual for rapid vegetation classification and survey for general purposes. Jakarta, Indonesia: Center for International Forestry Research, <http://www.cifor.org/publications/pdf_files/vegclass/vegman2006.pdf> (Acceso: junio, 2019).
- Gillison, A. N. 2013. Plant functional type and traits at the community, ecosystem and world level. In: E. van der Marrel and J. Franklin (eds.) *Vegetation Ecology*. Second Edition. Wiley-Blackwell, Chichester, UK. pp. 347-386.
- Gillison, A. N. 2016. Vegetation functional types and traits at multiple scales. In E.O. Box (ed.). *Vegetation Structure and Function at Multiple spatial, Temporal and Conceptual scales*. *Geobotany Studies* doi:10.1007/978-3-319-21452-8_2
- Gillison A. N., D. E. Bignell, K. R.W. Brewer, E. C. M. Fernandes, D. T. Jones, D. Sheiz, P. H. May, A. D. Watt, R. Constantino, E. G. Couto, K. Hairiah, P. Jepson, A. P. Kartono, I. Maryauto, G. G. Neto, M. van Noordwijk, E. A. Silveira, F. X. Susilo, S. A. Vosti, and P. C. Nunes. 2013. Plant functional types and traits as biodiversity indicators for tropical forests: two biogeographically separated case studies including birds, mammals and termites. *Biodiversity and Conservation* 22:1909-1930.
- Gillison, A. N. and G. Carpenter. 1997. A generic plant functional attribute set and grammar for dynamic vegetation description and analysis. *Functional Biology* 11: 775-783.
- Gillison, A. N., Discoanti and I. A. Rachman. 1996. Rapid ecological assessment Kerinci Seblat National Park Buffer Zone. Preliminary Report to Plant Ecology and Overview of Biodiversity Assessment. Working Paper no. 14. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia. 47 p.
- Gillison, A. N., D. T. Jones, F. X. Susilo and D. E. Bignell. 2003. Vegetation indicates diversity of soil macroinvertebrates: a case study with termites along land-use intensification gradient in lowland Sumatra. *Organisms Diversity and Evolution* 3:111-126.
- Gillison, A. N., N. Liswanti, S. Budidarsomo, M. van Noordwijk and T. P. Tonich. 2004. Impact of cropping methods on biodiversity in coffee agroecosystems in Sumatra, Indonesia. *Ecology and Society* 9:7.
- Harvey, C. A., A. A. Pritts, M. J. Zwetsloot, K. Jansen, M. M. Pulletman, I. Armbrecht, J. Avelino, J. F. Barrera, C. Bunn, J. Hoyos García, C. Isaza, J. Muñoz-Ucros, C.J. Pérez-Alemán, E. Rahn, V. Robiglio, E. Somarriba and V. Valencia. 2021. Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. Doi:10.1007/s13593-021-00712-0.
- Hooper, D. U., F. S. Chapin, J. J. Ewel, A. Hector, P. Inchausti, S. Lavorel, J. H. Lawton, D. M. Lodge, M. Loreau, S. Naeem, B. Schmid, H. Setälä, A. J. Symstad, J. Vandermeer and D. A. Wardle. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*. 75:3-35.

- Lavorel, S., S. McIntyre, J. Landeberg and T. D. A. Forbes. 1997. Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends Ecol. Evol.* 12:474-478.
- Libert-Amico, A., C. Ituarte-Lima and T. Elmqvist. 2020. Learning from social-ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science* 15:485-501.
- Libert-Amico, A., J. C. Wong-González y F. Paz-Pellat. 2016. Impacto de la roya del cafeto en los almacenes de carbono en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 219-225. En: F. Paz y R. Torres (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Lindenmayer, D. B. and G. E. Likens. 2011. Direct measurement versus surrogate indicator species for evaluating environmental change and biodiversity loss. *Ecosystems* 14:47-59.
- Lot, A. y F. Chiang (Comp.). 1986. *Manual de herbario: Administración y manejo de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos*. Consejo Nacional de Flora de México. D.F., México 122 p.
- Missouri Botanical Garden. 2018. *Herbario virtual del Jardín Botánico de Missouri*. Disponible en: <http://www.tropicos.org> (Acceso en septiembre de 2018).
- Moguel, P. and V. M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13:11-21.
- Moguel, P. y V. M. Toledo. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* 55:2-7.
- Newton, A. C. and V. Kapos. 2002. Biodiversity indicators in national forest inventories. *Kotka IV: Expert Consultation on Global Forest Resources Assessments – Linking National and International Efforts*. Background Paper 6.4. Kotka, Finland. 19 p. <https://www.fao.org/forestry/3946-0e7f052eeb-66d8935170504e3d01ab348.pdf> (Acceso en mayo, 2020).
- Nolasco, M. 1985. *Café y Sociedad en México*. Centro de Ecodesarrollo. D.F., México 454 p.
- NRC. 2000. *Ecological indicators for the National Committee to Evaluate Indicators for Monitoring Aquatic and Terrestrial Environments*, Board on Environmental Studies and Toxicology, Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C. 180 p.
- Ohlemüller, R., P. Bannister, K. J. M. Dickinson, S. Walker, B. J. Anderson and J. B. Wilson. 2004. Correlates of vascular plant species richness in fragmented indigenous forests: assessing the role of local and regional factors. *Community Ecology* 5:45-54.
- Paz-Pellat, F. 2022a. *Iniciativa del banco mexicano del carbono: elementos constitutivos y rasgos principales*. *Elementos para Políticas Públicas* 6:1-12.
- Paz-Pellat, F. 2022b. *Derechos del carbono y servicios ambientales: la doble negación*. *Elementos para Políticas Públicas* 6:13-20
- Paz, F., M. Odi, A. Cano, M. A. Bolaños y A. Zarco. 2009. Equivalencia ambiental en la productividad de la vegetación. *Agrociencia* 43:635-648.
- Paz-Pellat, F., V. M. Romero-Benítez, J. A. Argumedo-Espinoza, M. Bolaños-González, B. de Jong, J. C. de la Cruz-Cabrera y A. Velázquez-Rodríguez. 2019. Capítulo 23: Dinámica del uso del suelo y vegetación. pp. 529-572. En: F. Paz-Pellat, J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Paz-Pellat, F., A. Velázquez-Rodríguez, C. Sánchez-Sánchez y M. A. Bolaños-González. 2022. *Relaciones entre riqueza de plantas vasculares y tipos funcionales: usos del suelo y vegetación en equilibrio*. Aceptado para su publicación por *Terra Latinoamericana*.
- Perfecto, I., M. E. Jiménez-Soto and J. Vandermeer. 2019. Coffee landscapes shaping the Anthropocene, forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology* doi: 10.1086/7703413.
- Perfecto, I., J. Vandermeer, A. Mas and L. Soto Pinto. 2005. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics* 54:435-446.
- Phillips, O. L., A. H. Gentry, P. Hail, S.A. Sawyer and R. Vazquez. 1994. Dynamics and species richness of tropical rain forests. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 91:2805-2809.
- PMC. 2015a. *Manual de procedimientos inventario cuantitativo de carbono+*. Estudio de factibilidad Técnica para el pago de bonos de carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Fabiola Rojas-García, Julio Cesar Wong y José Ignacio Pulido Ponce. Texcoco, Estado de México, México 69 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>.
- PMC. 2015b. *Una REDD para SALVAR la SOMBRA de la Sierra Madre de Chiapas*. Manual de Procedimientos Inventario de Biodiversidad. Coordinador: Fernando Paz Pellat. Colaboradores: Antoine Libert Amico, Julio César Wong González y Cristóbal Daniel Sánchez-Sánchez. Texcoco, Estado de México. 77 p. Disponible en: http://pmcarbono.org/pmc/descargas/proyectos/redd/MANUAL_Inventario_de_Biodiversidad_1.0_Cafetales.pdf.
- Raunkjær, C. 1934. *The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography*. Oxford University Press, Oxford. 632 p.

-
- SAGARPA. 2017. Cierre de la Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México: SAGARPA. Recuperado de <http://infos-iap.siap.gob.mx> (Acceso: diciembre de 2017).
- Santi, E., S. Maccherini, D. Rocchini, I. Bonini, G. Brunialti, L. Favilli, C. Perini, F. Pezzo, S. Piazzini, E. Rota, E. Salerni and A. Chiarucci. 2010.. Simple to sample: vascular plants as surrogate group in a nature reserve. *Journal for Nature Conservation* 18:2–11.
- Sánchez-Sánchez, C.D. 2018. Biodiversidad y cobertura aérea en cafetales bajo distinto manejo en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 644-651. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México.
- Shugart, H.H. 1996. Plant and ecosystem functional types. pp. 20-43. *In*: T. M. Smith, H. H. Shugart and F. I. Woodward (eds.) *Plant Functional Types: Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK .
- Soto-Pinto, L., Y. Romero-Alvarado, J. Caballero-Nieto and G. Segura Warnholtz. 2001. Woody plant diversity and structure of shade-grown-coffee plantations in Northern Chiapas, Mexico. *Rev. Biol. Trop.* 49:977-987.
- Tilman, D., J. Knops, D. Wedin and P. Reich. 2002. Plant diversity and composition: effects on productivity and nutrient dynamics of experimental grasslands. pp. 21-35. *In*: M. Loreau, S. Naeem and P. Inchausti (eds.) *Biodiversity and Ecosystem Functionals*. Oxford University Press. Oxford, UK.
- Williams-Linera, G. y A. López-Gómez. 2008. Estructura y diversidad de la vegetación leñosa. pp. 55-68. En: R.H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (eds). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*.

SERVICIOS HIDROLÓGICOS DE LOS CAFETALES BAJO SOMBRA Y VEGETACIÓN NATURAL EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MÉXICO

HYDROLOGICAL SERVICES OF COFFEE PLANTATIONS UNDER SHADE AND NATURAL VEGETATION IN THE SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MEXICO

Fernando Paz^{1‡}, Víctor Salas² y Martín A. Bolaños³

¹ Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.

² Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³ Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, Estado de México, México.

‡ Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

La mayor incidencia y severidad con la que la roya del cafeto se presentó a partir de 2012, en el sureste de México, afectó la producción de la cafecultura bajo sombra, que promovió la degradación forestal (reducción de la sombra) y la deforestación (cambio de cafetales a milpas y potreros, principalmente). En el 2016 se implementó un programa de muestreo de cafetales y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, México, orientado al monitoreo de la roya y la caracterización de los almacenes de carbono, la biodiversidad y la cobertura aérea del follaje. Las evaluaciones se extendieron a los servicios hidrológicos (escurrimiento superficial, recarga subterránea y erosión del suelo), al utilizar la base de datos de la campaña del 2016 más información meteorológica (precipitación y evapotranspiración potencial, periodo 2011 a 2021). Los resultados muestran la evaluación de los servicios hidrológicos para los cafetales bajo sombra y vegetación natural, donde se presentan algunos datos aparentemente inconsistentes, los cuales se puede explicar al considerar los parámetros iniciales al usar (por ejemplo, la textura del suelo). Las evaluaciones muestran que los resultados se pueden utilizar para definir mercados “premium” que considere los almacenes de carbono y los servicios hidrológicos.

Palabras clave: *MEJICO; balance hídrico; escurrimiento superficial; recarga subterránea; erosión del suelo.*

ABSTRACT

The greater incidence and severity with which the coffee rust occurred as of 2012, mainly in the southeast of Mexico, affected the production of coffee growing under shade, promoting forest degradation (shade reduction) and deforestation (change from coffee plantations to milpas and pastures, mainly). In 2016, a sampling program for coffee plantations and natural vegetation was implemented in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico, aimed at rust monitoring and characterizing carbon stocks, biodiversity, and aerial foliage cover. Evaluations extended to hydrological services (surface runoff, groundwater recharge and soil erosion), using the 2016 campaign database plus meteorological information (precipitation and potential evapotranspiration, period 2011 to 2021). The results show the evaluation of hydrological services for coffee plantations under shade and natural vegetation, where in some cases where apparently inconsistent data are presented, which can be explained by considering the initial parameters used (for example, soil texture). The evaluations show that the results can be used to define “premium” markets that consider carbon stocks and hydrological services.

Keywords: *water balance; surface runoff; groundwater recharge; soil erosion.*

INTRODUCCIÓN

La crisis de la roya del cafeto (hongo *Hemileia vastatrix*) (Avelino *et al.*, 2015; Libert-Amico *et al.*, 2016), a partir del 2012, ha incidido en pérdidas de la producción de café en México, principalmente en la región sureste, donde Chiapas es el principal estado productor de México (CEDRSSA, 2019). La Sierra Madre de Chiapas representa el 54% de la superficie sembrada con café en el estado (SAGARPA, 2017), principalmente con cafetales bajo sombra y manejo orgánico.

Ante los impactos de la roya del cafeto, con y bajos precios del café, los productores han degradado las plantaciones (reducción de la sombra) y deforestado sus predios para cambiar las plantaciones de café a milpas y potreros (Perfecto *et al.*, 2019; Harvey *et al.*, 2021). Esta situación ha provocado una pérdida de los servicios ecosistémicos (hidrológicos, carbono, polinización, etc.) los cuales requieren de su evaluación.

A partir del 2016, el Programa Mexicano del Carbono implementó un programa de muestreo dentro de la campaña “Una REDD+ para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas” (Libert-Amico *et al.*, 2016), para generar información relacionada con la presencia de la roya y caracterizar los cafetales bajo sombra y su manejo. En este documento se analiza la base de datos generada en el 2016 para el análisis de los servicios hidrológicos, en el contexto del proyecto financiado por CONACYT “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” (Bolaños *et al.*, 2021).

La evaluación de los servicios hidrológicos de los cafetales bajo sombra y vegetación natural se realizó usando el modelo de estados y transiciones jerárquicos integrados y multiescalares del carbono y otros componentes (MEJICO) (Paz-Pellat, 2022a) y la formulación del balance hídrico de Paz y Beltrán (2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Campaña de muestreo en Sierra Madre de Chiapas

La campaña de muestreo de los cafetales y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas se realizó durante el 2016. Inicialmente se propusieron 82 sitios de muestreo (PMC), de los cuales 29 sitios se asociaron a parcelas de muestreo de la roya por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). La Figura 1 muestra

la distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

La campaña de muestreo de almacenes de carbono, cobertura aérea y diversidad vegetal del PMC estuvo orientada a evaluar los efectos de la roya en el manejo de los cafetales. Previa revisión la consistencia de variables de los 82 sitios de muestreos, se seleccionaron 72 sitios para su análisis, el resto no se incluyó.

Tipología de cafetales bajo sombra

La clasificación o tipología de cafetales bajo sombra que se utilizó, fue la desarrollada por Moguel y Toledo (1999), quienes propusieron cinco tipos de cafetales: (a) “rústico” o “de montaña”, el cual asemeja a un bosque o selva que ha sido aclarado en su estrato inferior (sotobosque) y sustituido por plantas de café, manteniendo los árboles de sombra. (b) “policultivo tradicional” o “jardín de café”, el estrato inferior es sustituido por cafetos y la sombra está compuesta por árboles naturales e introducidos de diferentes usos: especies maderables y frutales, entre otros. La mezcla de árboles naturales e introducidos define la complejidad de su estructura. (c) “policultivo comercial”, la sombra nativa es removida totalmente, para generar sombra con dos o tres especies de árboles exóticos y otros para la subsistencia local, lo que reduce la complejidad estructural y diversidad de la sombra. (d) “monocultivo bajo sombra” o “especializado”, después de la remoción de la sombra, se plantan árboles, muchas veces de una sola especie (por ejemplo, del género *Inga*). (e) “monocultivo sin sombra” o “a pleno sol”, no tiene sombra y está expuesto al sol, con altas densidades de cafetos.

Cubierta forestal

Salas-Aguilar *et al.* (2017) desarrollaron un método para estimar la fracción de la cubierta forestal con el uso de fotografía digital a partir de su análisis con el lenguaje de programación Python 2.7 y la herramienta Orfeo Toolbox (OTB).

Las imágenes se tomaron con una cámara Canon Eos Rebel T5 configurada con la máxima resolución espacial (17 915 904 pixeles). El lente de la cámara se ajustó a un ISO de 200, la apertura y la exposición se usaron en modo automático. Para la captura de la fotografía el lente se niveló hacia arriba. Las fotografías se tomaron a 1.5 m con respecto al suelo en los radios de 17.84, 11.28 y 5.65 m respectivamente, en el sentido de las manecillas del reloj; de norte a sur, de noreste a suroeste, de este a oeste y de sureste a noroeste (Figura 2).

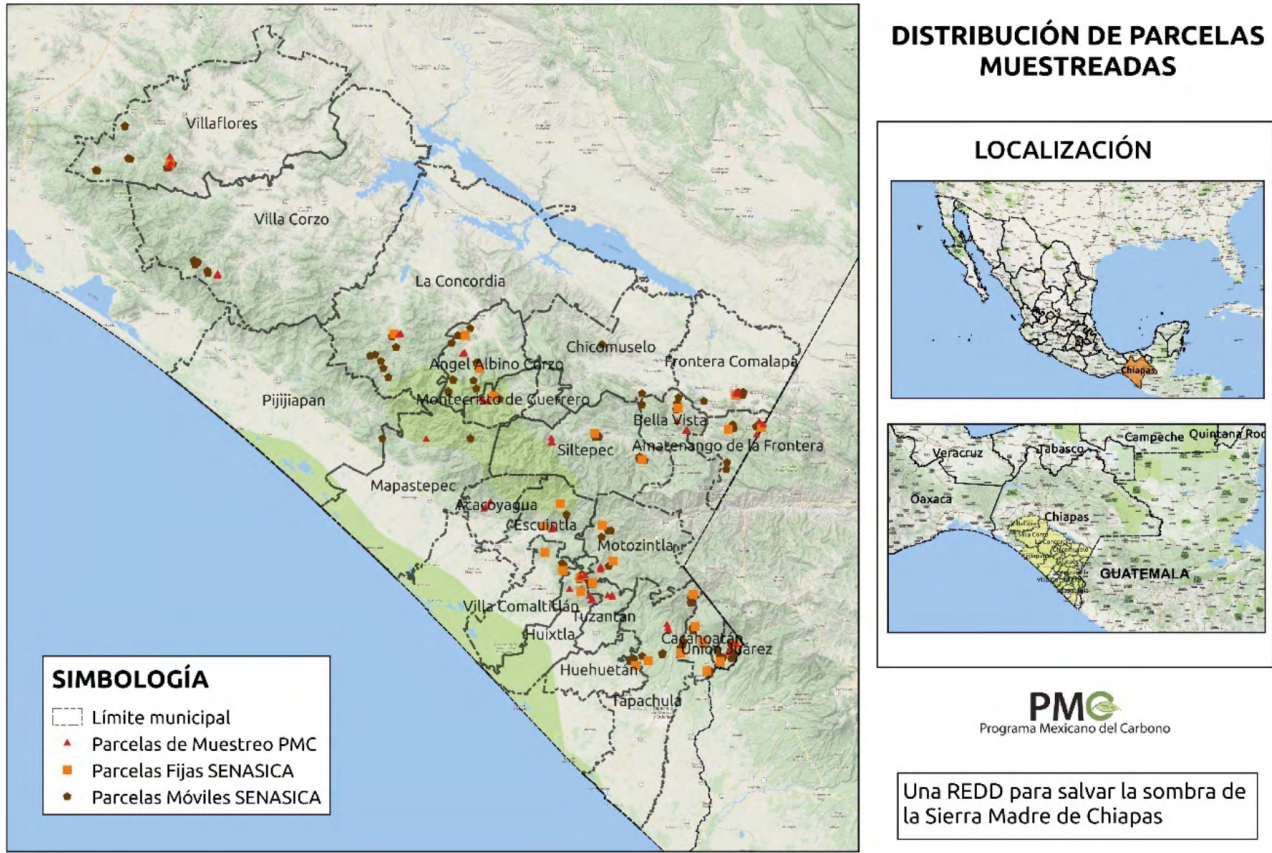


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

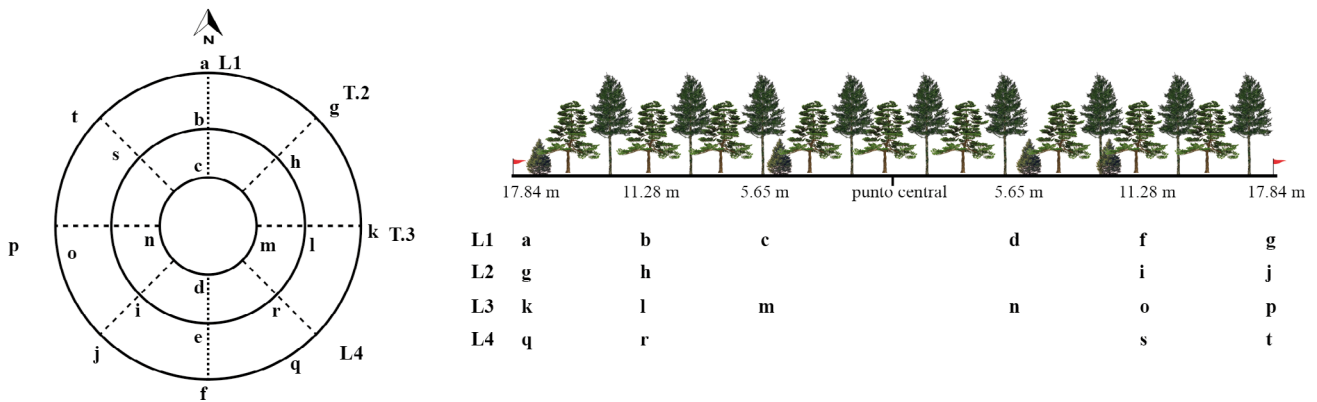


Figura 2. Ubicación de los puntos para la toma de fotografías dentro del sitio de muestreo. Fuente: Salas-Aguilar *et al.* (2017).

Relación biomasa aérea viva y cobertura proyectiva foliar

De acuerdo con Paz-Pellat (2022a), la relación entre la biomasa aérea viva (Bav) y el índice de área foliar (IAF) está dada por:

$$IAF = a(Bav)^b \quad (1)$$

Donde con IAF hasta su valor máximo IAF_x que se asocia a Bav_x, siendo *a* y *b* son constantes empíricas. La constante *a* se puede determinar de $a = IAF_x/Bav_x$. La constante *b* tiene valores entre 0.9 y 1.1, por lo que se puede usar *b* = 1. El conocer el IAF máximo define el punto de la tasa máxima de crecimiento (Ryan *et al.*, 1997).

Las estimaciones de la cobertura aérea del follaje (cubierta forestal) o cobertura proyectiva foliar (CPF, en porcentaje) se estima de la Ley de Beer-Lambert con el uso del coeficiente de extinción *k_e*:

$$CPF = 100[1 - k_e IAF] \quad (2)$$

Los valores de IAF y coeficientes de extinción se pueden estimar de Asner *et al.* (2003).

Coefficiente de escurrimiento y erosión del suelo

El coeficiente de escurrimiento Q/P, con Q = Escurrimiento, P = Precipitación define la respuesta hidrológica ante un cambio de uso del suelo y vegetación (USyV). También, la erosión (E) del suelo se puede poner en función de Q/P. En lo siguiente, se propone un modelo para estimar Q/P siguiendo los desarrollos de modelos de erosión (Renard *et al.*, 1991; USDA-ARS, 2008)) y otros conceptos.

El modelo de Q/P está definido por:

$$\frac{Q}{P} = (FCPF)(FP)(FG) \quad (3)$$

FCPF es un factor que se define en función de la CPF de acuerdo con los modelos empíricos revisados por Duran y Rodríguez (2008, 2009). FP es un factor de pendiente y FG es un factor de geoforma. En la Figura 3 se muestran patrones hipotéticos de la relación COB(CPF) – Q/P (Rogers y Schumm, 1991).

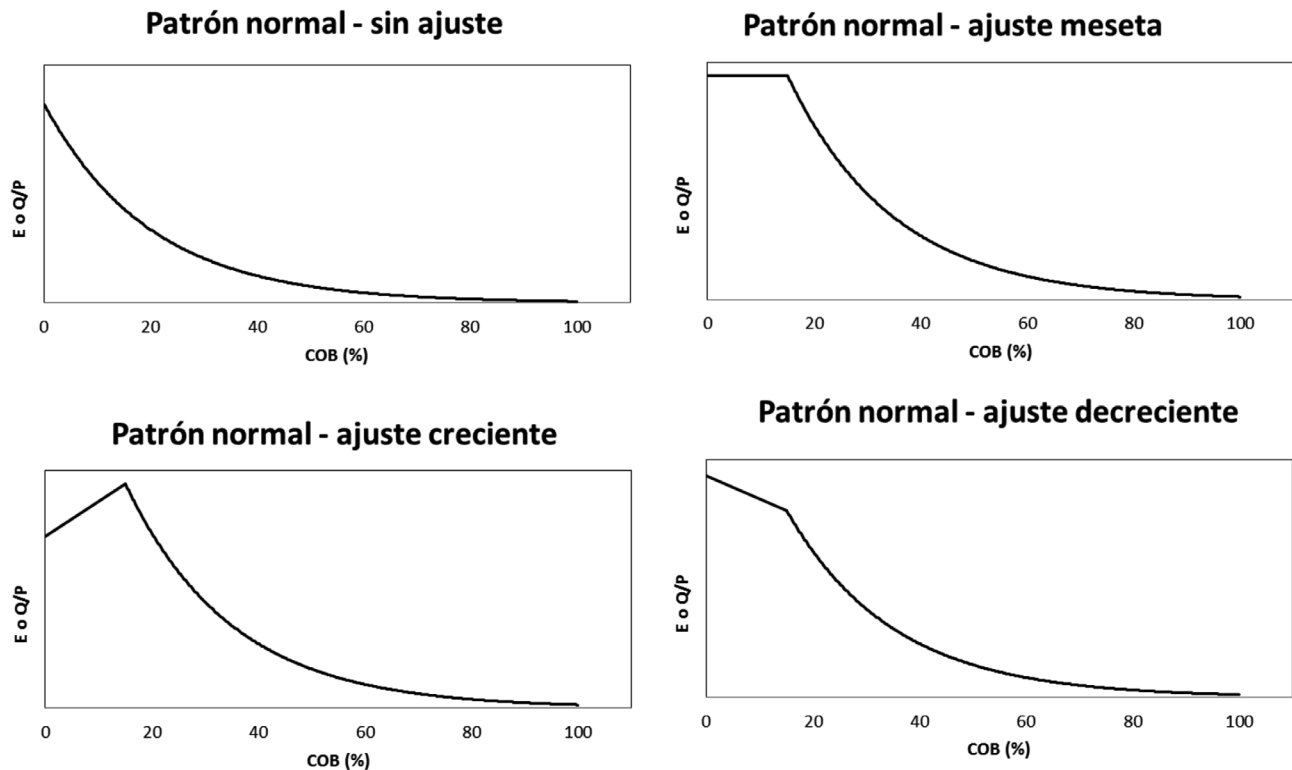


Figura 3. Patrones hipotéticos entre COB-E o COB-(Q/P). Adaptada de Rogers y Schumm (1991), donde E = erosión del suelo, Q/P = coeficiente de escurrimiento y COB = cobertura aérea del follaje.

En la Figura 2 la relación Q/P (E) con CPF (COB) muestra dos patrones diferentes usando CPF = 20 % como la transición.

Para la región de CPF ≤ 20, el valor inicial de Q/P está en función de la textura del suelo (Cuadro 5), para el caso de CPF = 0 (suelo desnudo). El patrón lineal para CPF ≤ 20 % utiliza una estimación (Q/P)₀ (CPF = 0) en función de la textura del suelo y el contenido (%) de materia orgánica del suelo. El valor de Q/P para CPF = 20, es estimado de (Q/P)₂₀ = FA(Q/P)₀, donde FA = 0.95. Para el caso de CPF > 20, se utiliza un modelo expo-lineal parametrizado en función de (Q/P)₁₀₀ (CPF = 100), usando las estimaciones propuestas por Paz-Pellat (2022a).

El factor de pendiente (FP) de la relación (3) se estima en función de la pendiente del terreno y el factor de geoforma (FG) en función de las geoformas del terreno (Paz-Pellat, 2022a). En este caso se usó FG = 1, geoforma lineal uniforme.

Para la relación del coeficiente de escurrimiento con la erosión (Mg ha⁻¹), se utilizó la relación de Maetens *et al.* (2012) adaptada:

$$E = 251.9 \left(\frac{Q}{P}\right)^{1.626} \quad (4)$$

Balance hídrico

La recarga de agua subterránea (Rs) se estimó del balance hídrico (Paz y Beltrán, 2014):

$$R_s = P - ET_a - \left(\frac{Q}{P}\right)P \quad (5)$$

donde, si $R_s < 0$, entonces $R_s = 0$. ET_a es la evapotranspiración actual, la cual puede ser estimada

de la evapotranspiración potencial (ET_0) (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_a = KcET_0 \quad (6)$$

donde Kc es un coeficiente de cultivo, el cual varía en el tiempo. Kc es estimado en función de la CPF y la precipitación (Paz y Beltrán, 2014) a través de:

$$Kc = Kc_{min} + eP \left(\frac{CPF}{100}\right) \quad (7)$$

$$Kc_{min} = 0.40 + 0.35 \left(\frac{CPF}{100}\right) \quad (8)$$

donde e es un parámetro empírico (Paz y Beltrán, 2014).

Para realizar la evaluación de los servicios hidrológicos que se asocian a los diferentes tipos de cafetales bajo sombra y vegetación natural, en el Cuadro 1 se muestran los valores de las variables utilizadas, que incluyen: la pendiente del terreno (S), la materia orgánica del suelo (M.O.), textura: gruesa (arena > 70%), fina (arcilla > 35%) y media (el resto de los porcentajes de arena y arcilla), etc.

En el caso de la precipitación promedio anual (P) y la evapotranspiración promedio anual (ET_0), estas se obtuvieron de compilaciones disponibles (Salas-Aguilar y Paz-Pellat, 2018). En este caso, los valores fueron extraídos de la base de datos mensual Terra Climate (Abatzoglou *et al.*, 2018) para el periodo 2011-2021. La evapotranspiración potencial se calculó usando el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

Cuadro 1. Variables anuales utilizadas en los sitios de muestreo para MEJICO.

Identificador del punto de muestreo	TIPO_CAFE_FINAL	S (%)	M.O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	P (mm)	ET ₀ (mm)	C	
										Almacén aéreo (Mg ha ⁻¹)	CPF (%)
07117520047C	A pleno sol	47	6.7	49	38	13	Media	2019.3	1428.1	0.7	5.8
07117520050C	A pleno sol	22	8.6	37	30	33	Media	2044.6	1469.4	2.8	10.0
07117520033C	A pleno sol	36	3.8	55	25	20	Media	3203.0	1583.3	3.4	10.0
07067520023C	A pleno sol	35	6.6	37	27	36	Fina	2405.7	1442.7	7.5	10.0
07067520002C	Monocultivo bajo sombra	35	3.9	28	32	40	Fina	2787.1	1575.4	79.8	36.3
07107520069C	Monocultivo bajo sombra	40	16.6	55	30	15	Media	4057.1	1540.9	26.0	47.7

Cuadro 1. Variables anuales utilizadas en los sitios de muestreo para MEJICO (Continuación).

Identificador del punto de muestreo	TIPO_CAFE_FINAL	S (%)	M.O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	P (mm)	ETo (mm)	C	
										Almacén aéreo (Mg ha ⁻¹)	CPF (%)
07067520005C	Monocultivo bajo sombra	20	3.4	28	36	36	Fina	2964.9	1532.0	68.5	47.2
07067520008C	Monocultivo bajo sombra	20	4	52	20	28	Media	1302.8	1529.8	50.1	54.9
07107520026C	Monocultivo bajo sombra	26	5.2	35	19	46	Fina	3143.5	1706.8	14.9	76.6
07117520059C	Monocultivo bajo sombra	13	3.4	15	28	57	Fina	2503.5	1503.8	50.2	53.2
07067520058C	Monocultivo bajo sombra	51	10.4	33	26	41	Fina	2688.6	1484.7	19.2	69.4
07111080042C	Monocultivo bajo sombra	42	2.8	41	35	24	Media	2339.0	1452.5	73.7	79.1
07117520052C	Monocultivo bajo sombra	2	1.8	23	44	33	Media	1836.3	1604.2	49.9	50.5
07102140038C	Monocultivo bajo sombra	42	6.6	35	35	30	Media	3065.3	1627.6	150.0	80.4
07102140039C	Monocultivo bajo sombra	46	2.7	49	39	12	Media	2902.3	1662.9	81.4	83.1
07107520013C	Monocultivo bajo sombra	12	7.5	50	15	35	Media	3788.6	1562.6	22.2	54.4
07107520015C	Monocultivo bajo sombra	7	4.7	50	33	17	Media	3788.6	1562.6	10.0	38.6
07107520037C	Monocultivo bajo sombra	25	3.2	35	27	38	Fina	2957.5	1772.0	100.5	81.4
07107520066C	Monocultivo bajo sombra	38	9.8	37	38	25	Media	3981.4	1513.0	44.1	53.4
07107520067C	Monocultivo bajo sombra	6	8.6	39	22	39	Fina	4072.6	1459.1	32.5	66.3
07107520078C	Monocultivo bajo sombra	52	3.6	41	22	37	Fina	3163.1	1611.2	25.6	57.7
07117520053C	Monocultivo bajo sombra	12	7.5	15	30	55	Fina	1836.3	1604.2	109.9	88.1
07067520006C	Policultivo comercial bajo sombra	7	4.6	26	30	44	Fina	2964.9	1532.0	41.5	62.4
07067520009C	Policultivo comercial bajo sombra	4	2.1	66	16	18	Media	1245.1	1541.1	60.7	36.7
07067520055C	Policultivo comercial bajo sombra	30	2.6	25	34	41	Fina	2787.1	1575.4	45.8	66.2
07067520056C	Policultivo comercial bajo sombra	18	7.9	29	46	25	Media	2978.0	1601.8	34.8	44.4
07107520036C	Policultivo comercial bajo sombra	12	3.7	29	39	32	Media	2957.5	1772.0	70.5	71.6
07107520040C	Policultivo comercial bajo sombra	21	2.6	31	45	24	Media	2902.3	1662.9	42.7	80.7
07107520041C	Policultivo comercial bajo sombra	27	8.5	48	41	11	Media	2951.6	1711.8	33.6	68.8
07107520068C	Policultivo comercial bajo sombra	2	10	49	32	19	Media	4119.1	1576.3	20.6	43.6
07107520071C	Policultivo comercial bajo sombra	2	14.1	43	40	17	Media	4164.6	1608.1	71.4	68.1
07107520072C	Policultivo comercial bajo sombra	45	6.2	19	18	63	Fina	3837.4	1704.8	19.6	73.9
07107520076C	Policultivo comercial bajo sombra	30	7.5	41	34	25	Media	3143.5	1706.8	17.5	64.8
07107520077C	Policultivo comercial bajo sombra	24	6.2	37	24	39	Fina	3351.2	1606.0	23.8	62.1

Cuadro 1. Variables anuales utilizadas en los sitios de muestreo para MEJICO (Continuación).

Identificador del punto de muestreo	TIPO_CAFE_FINAL	S (%)	M.O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	P (mm)	ETo (mm)	C	
										Almacén aéreo (Mg ha ⁻¹)	CPF (%)
07107520079C	Policultivo comercial bajo sombra	65	4	59	24	17	Media	3025.9	1710.5	53.0	59.0
07107520080C	Policultivo comercial bajo sombra	38	5.3	17	38	45	Fina	2980.8	1715.2	49.3	65.9
07107520081C	Policultivo comercial bajo sombra	48	6.6	39	36	25	Media	2869.3	1544.5	17.6	63.3
07117520043C	Policultivo comercial bajo sombra	22	3.9	49	25	26	Media	2390.2	1455.2	43.1	53.6
07117520044C	Policultivo comercial bajo sombra	22	5.9	49	25	26	Media	2339.0	1452.5	157.8	78.7
07117520046C	Policultivo comercial bajo sombra	14	5.1	21	24	55	Fina	2151.4	1508.2	53.5	74.0
07117520049C	Policultivo comercial bajo sombra	24	8.3	21	42	37	Fina	2044.6	1469.4	27.9	71.6
07117520060C	Policultivo comercial bajo sombra	27	9.7	23	34	43	Fina	1896.5	1402.6	18.3	44.5
07067520057C	Policultivo comercial bajo sombra	34	4.7	37	36	27	Media	2458.4	1453.9	10.1	47.5
07117520061C	Policultivo comercial bajo sombra	35	4.6	27	20	53	Fina	2151.4	1508.2	27.1	77.0
07117520063C	Policultivo comercial bajo sombra	36	4.4	17	36	47	Fina	1983.1	1495.4	16.0	57.9
07117520075C	Policultivo comercial bajo sombra	35	2.6	63	18	19	Media	2918.0	1602.9	43.5	67.8
07117530034C	Policultivo comercial bajo sombra	28	1.5	67	23	10	Media	3203.0	1583.3	24.7	46.6
07097530017C	Policultivo tradicional	20	1.6	64	19	17	Media	3084.0	1713.1		58.0
07102150014C	Policultivo tradicional	35	8.9	26	33	41	Fina	3544.0	1597.8	78.7	90.0
07062150007C	Policultivo tradicional	76	6.9	62	12	26	Media	1302.8	1529.8	79.8	78.4
07107520010C	Policultivo tradicional	42	6.5	60	19	21	Media	4150.1	1478.5	60.5	81.0
07107520012C	Policultivo tradicional	13	7.4	40	31	29	Media	4072.6	1459.1	18.8	54.9
07107520027C	Policultivo tradicional	13	4.2	45	29	26	Media	3175.3	1692.3	61.9	87.9
07107520065C	Policultivo tradicional	50	11.4	45	40	15	Media	2994.4	1421.7	28.4	57.7
07107520073C	Policultivo tradicional	10	3.9	17	30	53	Fina	3837.4	1704.8	29.1	57.6
07107520082C	Policultivo tradicional	45	8.3	55	16	29	Media	2951.6	1711.8	55.8	54.2
07117520064C	Policultivo tradicional	13	7.4	55	20	25	Media	1944.0	1573.5	103.2	69.3
07117520074C	Policultivo tradicional	40	4.3	45	32	23	Media	2531.8	1455.6	17.9	75.0
07062170018C	Rústico	58	5.7	59	25	16	Media	1731.2	1562.7	96.4	49.4
07107520030C	Rústico	25	3.1	25	31	44	Fina	3254.0	1667.2	43.5	85.6
07101060011C	Rústico	20	8.8	56	23	21	Media	4150.1	1478.5	50.2	77.9
07067520054C	Rústico	47	4.7	55	20	25	Media	1302.8	1529.8	36.8	63.5

Cuadro 1. Variables anuales utilizadas en los sitios de muestreo para MEJICO (Continuación).

Identificador del punto de muestreo	TIPO_CAFE_FINAL	S (%)	M.O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	P (mm)	ETo (mm)	C Almacén aéreo (Mg ha ⁻¹)	CPF (%)
07117520062C	Rústico	2	3.1	25	46	29	Media	1836.3	1604.2	40.7	71.5
07061080021C	Bosque mesófilo	13	8.6	49	29	22	Media	2416.9	1453.8	74.1	75.1
07111080048C	Bosque mesófilo	28	7.5	51	16	33	Media	1821.4	1421.8	105.43	84.1
07101080024C	Bosque mesófilo	40	8.9	55	25	20	Media	2688.6	1484.7	120.51	86.4
07062140019C	Selva mediana	38	4.6	63	21	16	Media	1731.2	1562.7		74.1
07062150003C	Selva mediana	36	6.1	20	36	44	Fina	2787.1	1575.4		86.8
07111060051C	Bosque de encino-pino	23	2.4	37	34	29	Media	1836.3	1604.2	87.92	83.1
07061050004C	Bosque de encino-pino	35	8	44	36	20	Media	2964.9	1532.0		40.4
07111060045C	Bosque de encino-pino	7	2.1	23	46	31	Media	2151.4	1508.2		60.7
0709---0016C	Agricultura de temporal	8	1.6	78	11	11	Gruesa	3084.0	1713.1	0	2.9

S = pendiente, M.O. = materia orgánica, P = precipitación, ETo = evapotranspiración potencial, E = erosión del suelo, CPF = cobertura proyectiva del follaje

RESULTADOS

La relación entre Bav y CPF se muestra en la Figura 4, donde se observa una gran dispersión.

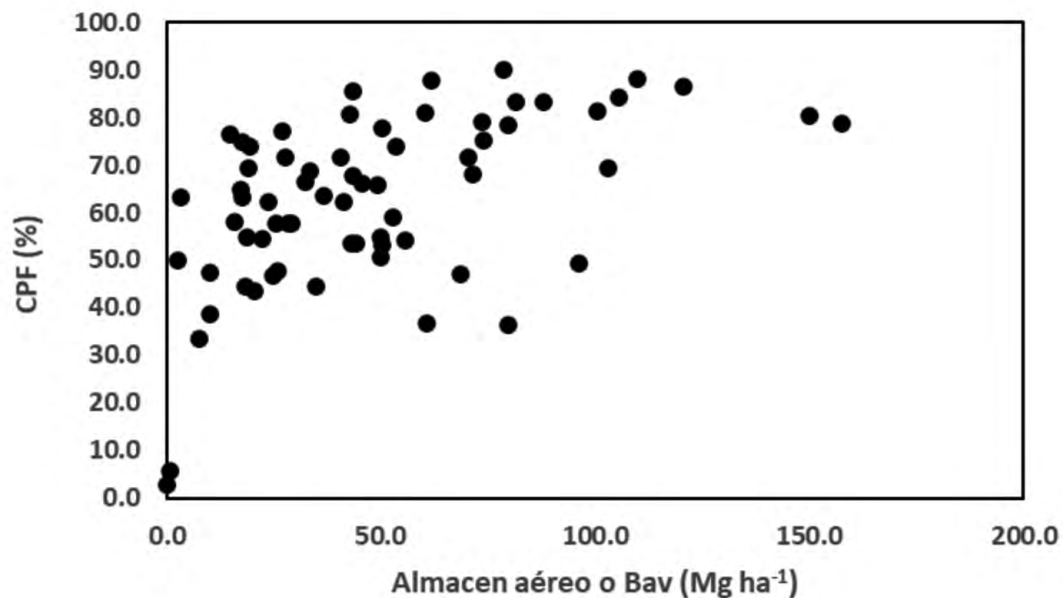


Figura 4. Relación entre Bav y CPF para todos los sitios de muestreo, donde CPF es la cobertura proyectiva del follaje.

En la Figura 5 se muestra un patrón más definido, una vez que se eliminaron diez datos en los extremos (Figura 4). En el ajuste usado para el modelo de variación (línea marrón) se utilizaron valores de IAFx = 5 y Bavx = 100 ($a = .05$) y $b = 1$.

En el Cuadro 2 se muestran los resultados de la evaluación de los servicios hidrológicos (escurrimiento, recarga y erosión).

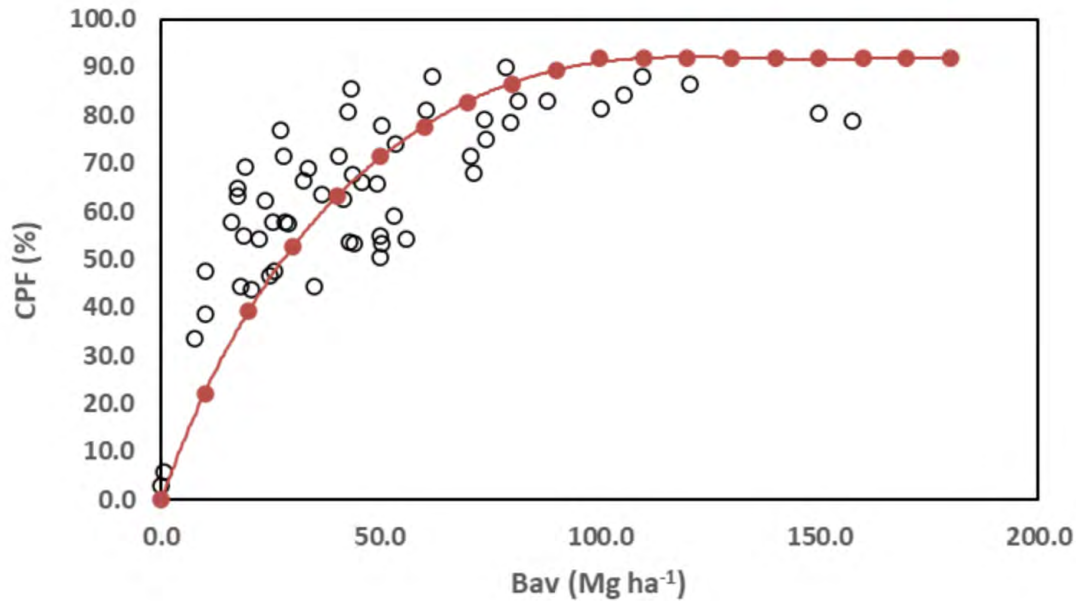


Figura 5. Relación entre Bav y CPF depurada, donde Bav es la biomasa aérea viva y CPF es la cobertura proyectiva del follaje.

Cuadro 2. Servicios hidrológicos evaluados, promedio y desviación estándar, para el periodo 2011-2021.

Uso del suelo	Prom	Desv. Est.	Prom	Desv. Est.	Prom	Desv.Est.
	Q	Q	Rs	Rs	E	E
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(Mg ha ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)
Cafetal a pleno sol	871.8	327.2	679.1	344.7	49.2	25.4
Cafetales monocultivos bajo sombra	626.8	249.1	752.1	680.1	21.1	11.6
Cafetales policultivos comerciales bajo sombra	387.6	135.0	922.6	496.4	11.2	6.0
Cafetales policultivos tradicionales	374.4	146.8	1055.8	644.2	8.6	3.8
Cafetales rústicos	262.4	108.6	646.4	781.0	8.2	5.7
Vegetación leñosa natural	260.3	136.7	610.2	462.2	7.3	4.4
Agricultura de temporal	651.5		1628.5		20.1	

Q = escurrimiento superficial, Rs es la recarga subterránea y E = erosión del suelo.

DISCUSIÓN

La relación entre la biomasa aérea viva y la cobertura proyectiva foliar se debe considerar como válida para condiciones promedio de los diferentes tipos de cafetales bajo sombra y vegetación natural. Por lo que se debe ver como una primera aproximación a la relación particular de los diferentes usos del suelo y tipos de vegetación natural.

Los resultados obtenidos de la evaluación del escurrimiento (Q) son congruentes con los tipos de cafetales, con láminas mayores de escurrimiento en los cafetales a pleno sol y agricultura de temporal en este último uso del suelo presenta una textura gruesa. Los monocultivos bajo sombra, menor complejidad estructural de la sombra, presentaron también valores altos.

Con relación a la recarga de agua subterránea (Rs), la agricultura de temporal presentó el valor más alto, dada la textura gruesa del suelo. En el caso de los cafetales rústicos, sus valores muestran alta dispersión (desviación estándar) que los hace difícil de interpretar (promedios).

Finalmente, con relación a la erosión del suelo (E), los cafetales a pleno sol (sin sombra) muestran los valores más altos, incluida la agricultura de temporal, que tiene un valor cercano a los cafetales de monocultivos bajo sombra.

En general, los cafetales rústicos tienen valores de las variables hidrológicas más o menos similares a la vegetación leñosa natural, lo cual es esperado.

En la perspectiva de la iniciativa del banco mexicano del carbono del Programa Mexicano del Carbono (Paz-Pellat, 2022b) y los derechos del carbono asociados (Paz-Pellat, 2022c), la integración del carbono y los servicios hidrológicos permite el desarrollo de mercados del carbono diferenciados (“premium”), relativamente fáciles de implementar.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los servicios hidrológicos de los cafetales bajo sombra y vegetación natural de referencia se evaluaron en forma adecuada utilizando MEJICO (Paz-Pellat, 2022a) y un balance hídrico (Paz y Beltrán, 2014), lo cual permite realizar estimaciones para diferenciar la biomasa viva sobre el suelo, dada la relación entre la biomasa aérea viva y la cobertura proyectiva foliar.

La recarga de agua subterránea, el escurrimiento y la erosión del suelo se pueden utilizar para ponderar el carbono tipo “premium” en los mercados del carbono, para considerar los servicios ecosistémicos debidos a la captura de carbono y sus servicios hidrológicos en forma conjunta.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

- Abatzoglou, J. T., S. Z. Dobrowski, S. A. Parks and K. C. Hegewisch. 2018. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data* 5:170191 doi:10.1038/sdata.2017.191.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO. Rome 300 p.
- Asner, G. P., J. M. O. Scurlock and J. A. Hicke. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography* 12:191-205.
- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A. J. Hruska and C. Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321.
- Bolaños-González, M. A., A. Libert-Amico, F. Paz-Pellat, V. Salas-Aguilar, G. Villalobos-Sánchez, E. Escamilla-Prado, A. S. Velázquez-Rodríguez y E. I. Morales-Reyes. 2021. Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas. pp. 633-638. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- CEDRSSA. 2019. *Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-2024*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Cámara de Diputados - LXIV Legislatura 19 p.

- Duran, V. H. and C. R. Rodríguez. 2008. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 28:65-86.
- Duran, V. H. and C. R. Rodríguez. 2009. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. pp. 785-811. *In: Lichtfouse, E. et al. (eds.). A review: Sustainable Agriculture*. Springer-Verlag. Germany.
- Harvey, C. A., A. A. Pritts, M. J. Zwetsloot, K. Jansen, M. M. Pulletman, I. Armbrrecht, J. Avelino, J. F. Barrera, C. Bunn, J. Hoyos García, C. Isaza, J. Muñoz-Ucros, C. J. Pérez-Alemán, E. Rahn, V. Robiglio, E. Somarriba and V. Valencia. 2021. Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. doi:10.1007/s13593-021-00712-0.
- Libert-Amico, A., J. C. Wong-González y F. Paz-Pellat. 2016. Impacto de la roya del café en los almacenes de carbono en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 219-225. *En: F. Paz y R. Torres (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Maetens, W., M. Vanmaercke, J. Poesen, B. Jankauskas, G. Jankauskiene and I. Ionita. 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: a meta-analysis of plot data. *Progress in Physical Geography* 36:599-653.
- Moguel, P. and V. M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13:11-21.
- Paz-Pellat, F. 2022a. Modelo de estados y transiciones jerárquicos integrados y multiescalares del carbono y otros componentes (MEJICO). *Elementos para Políticas Públicas* 6:69-99.
- Paz-Pellat, F. 2022b. Iniciativa del banco mexicano del carbono: elementos constitutivos y rasgos principales. *Elementos para Políticas Públicas* 6:1-12.
- Paz-Pellat, F. 2022c. Derechos del carbono y servicios ambientales: la doble negación. *Elementos para Políticas Públicas* 6:13-20.
- Paz, F. y A. Beltrán. 2014. Evaluación de los servicios ambientales hidrológicos de predios apoyados por PROBOSQUE en el Estado de México y su asociación al carbono forestal. pp. 492-500. *En: Paz, F. y J. Wong (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono*. Texcoco, Estado de México, México.
- Perfecto, I., M. E. Jiménez-Soto and J. Vandermeer. 2019. Coffee landscapes shaping the Anthropocene, forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology* doi: 10.1086/703413.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies and J. R. Porter. 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46:30-33.
- Rogers, R. D. and S. A. Schumm. 1991. The effect of sparse vegetation on erosion and sediment yield. *Journal of Hydrology* 123:19-24.
- Ryan, M. G., D. Binkley and J. H. Fownes. 1997. Age-related decline in forest productivity: pattern and process. *Advances in Ecological Research* 27:213-262.
- SAGARPA. 2017. Cierre de la Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México: SAGARPA. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx> (Acceso: diciembre de 2017).
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2018. Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas* 2:19-32.
- Salas-Aguilar, V., C. Sánchez-Sánchez, F. Rojas-García, F. Paz-Pellat, J. R. Valdez-Lizalde and C. Pinedo-Álvarez. 2017. Estimation of vegetation cover using digital photography in a regional survey of Central Mexico. *Forests* 8, 392, doi:10.3390/f8100392.
- USDA-ARS. 2008. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2. User's Reference Guide (Draft). USA – Agricultural Research Service. Washington, D.C. 355 p.

FUNCIONES DE ESCALA PARA LAS RELACIONES RIQUEZA DE ESPECIES – ÁREA Y RIQUEZA DE TIPOS FUNCIONALES – ÁREA DE LOS CAFETALES BAJO SOMBRA Y VEGETACIÓN NATURAL DE LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MÉXICO

SCALE FUNCTIONS FOR SPECIES RICHNESS-AREA AND FUNCTIONAL TYPE RICHNESS-AREA RELATIONSHIPS OF SHADE-GROWN COFFEE PLANTATIONS AND NATURAL VEGETATION IN THE SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MEXICO

Fernando Paz^{1‡}, Víctor Salas², Cristóbal Sánchez³ y Martín A. Bolaños⁴

¹ Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.

² Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³ Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo, Estado de México, México.

⁴ Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, Estado de México, México.

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

RESUMEN

La diversidad vegetal asociada a los diferentes usos del suelo es una métrica de biodiversidad que puede evaluarse utilizando la riqueza de plantas vasculares (S), además de considerar la riqueza de tipos funcionales (Sg), para analizar su relación con el ambiente. El sistema de Gillison se utiliza para los tipos funcionales, dada su simplicidad operativa. En los cafetales bajo sombra y la vegetación natural permite evaluar los impactos de la epidemia de la roya del cafeto, y bajos precios del café, en el manejo de la caficultura. La región de Sierra Madre de Chiapas, México, ha sido impactada por la roya, por lo que en el 2016 el Programa Mexicano del Carbono implementó una campaña de medición en sitios de muestreo, el cual es retomado en esta investigación a través de un proyecto apoyado por el CONACYT. Se usaron muestreos anidados en parcelas circulares de diferentes dimensiones (A). Se utilizó el modelo de S-A y Sg-A, con una cinética de orden n para su parametrización, con buenos resultados ($R^2 > 0.98$). Los parámetros de los modelos S-A y Sg-A están relacionados entre sí, simplificando el proceso de estimación. La relación Sg-S establecida por la cinética resultó en buenos ajustes ($R^2 > 0.98$) al utilizar los parámetros de las relaciones S-A y Sg-A. El enfoque de modelación permite realizar estimaciones con un solo dato (A, S o A, Sg) cuando se cuenta con un dato adicional para superficies pequeñas de muestreo.

Palabras clave: cinética de orden n ; relación entre parámetros; relación Sg-S; simplificación de estimaciones; dato adicional para pequeñas áreas.

ABSTRACT

Plant diversity associated with different land uses is a biodiversity metric that can be used for the richness of vascular plants (S), in addition to considering the richness of functional types (Sg), to estimate its relationship with the environment. Gillison's system is used for the functional types, given its operational simplicity. In coffee plantations under shade and natural vegetation, it allows evaluating the impacts of the coffee rust epidemic, and low coffee prices, on the management of coffee cultivation. The Sierra Madre de Chiapas region, Mexico, has been impacted by rust, so in 2016 a sampling site program was implemented by the Mexican Carbon Program, which

is taken up in this research through a project supported by CONACYT. Using nested samples of circular plots of different dimensions (A). For the S-A and Sg-A model, an n -order kinetics was proposed for its parameterization with good results ($R^2 > 0.98$). The parameters of the S-A and Sg-A models are related to each other, simplifying the estimation process. The Sg-S relationship established by kinetics resulted in good fits ($R^2 > 0.98$) when using the S-A and Sg-A relationship parameters. The modeling approach allows estimates to be made with a single data point (A, S or A, Sg), when additional data is available for small sampling surfaces.

Keywords: *n-order kinetics; relationship between parameters; Sg-S relationship; simplification of estimates; additional data for small areas.*

INTRODUCCIÓN

La biodiversidad es un factor crítico en la sustentabilidad de los ecosistemas terrestres. Para evaluarla se pueden utilizar diversas métricas que reflejen en forma directa o indirecta su estado, particularmente en relación a una referencia y así apreciar sus cambios. La métrica de riqueza (número) de plantas vasculares (S) se ha utilizado para tal fin (NRC, 2000; Croezen *et al.*, 2011). El uso de las plantas vasculares para el desarrollo de métricas de diversidad vegetal se utiliza ampliamente por su facilidad de medición, dado que representa la mayor parte de la biomasa forestal y otros tipos de vegetación.

Considerando la respuesta de la riqueza de plantas vasculares al medio ambiente, se propuso el uso de tipos funcionales de plantas (Phillips *et al.*, 1994; Tilman *et al.*, 2002), los cuales son conjuntos de individuos con ciertas características morfológicas, fisiológicas y adaptativas comunes, que brindan una respuesta específica al ambiente, independientemente de su afinidad taxonómica (Díaz y Cabido, 2001). Los tipos funcionales de plantas plantean una respuesta relativamente similar al ambiente o tienen factores de incidencia más o menos de igual magnitud en el funcionamiento del ecosistema (Díaz y Cabido, 2001).

Existen numerosos enfoques para definir los tipos funcionales (Lavorel *et al.*, 1997; Gillison, 2013). Aunque hay diversos enfoques usados para caracterizar tipos funcionales usando atributos de las plantas vasculares, el sistema de clasificación de Gillison es útil (Gillison, 1981, 2002, 2006; Gillison y Carpenter, 1997), ya que es sencillo y práctico. En este sistema se consideran los atributos de la estructura fotosintética (tamaño e inclinación de las hojas, clorotipo y tipo de hoja) y de la estructura vascular de soporte (forma de

vida y tipo de raíz). La riqueza de tipos funcionales (Sg) de plantas vasculares plantea la evaluación de la redundancia funcional en la vegetación. La relación S/Sg está asociada a la riqueza de especies de termitas, aves y escarabajos (Gillison *et al.*, 2003, 2013; Gillison y Liswanti, 2004).

La riqueza de especies es función del área de muestreo (Rosenzweig, 1995), por lo que se requiere definir la relación funcional entre el área de muestreo (A) y la riqueza de especies (S). En el caso de la riqueza de tipos funcionales (Sg), la relación Sg-A está bien establecida (Gillison, 2002), en forma similar a la relación S-A; aunque no existe un modelo universalmente aceptable de la relación riqueza-área de los treinta modelos propuestos (Tjørve y Tjørve, 2021). Los modelos de uso más común son el potencial de Arrhenius (1921, 1923a) y el logarítmico de Gleason (1922, 1925), por lo que existe controversia sobre cual es mejor (Gleason, 1922; Arrhenius, 1923b). No obstante, en las evaluaciones empíricas, el modelo potencial ha presentado mejores resultados en los ajustes estadísticos (Williams *et al.*, 2009; Dengler, 2009; Tjørve, 2009).

La evaluación de la riqueza de especies y su dependencia del área de muestreo es importante en la caracterización de los paisajes bioculturales (Libert-Amico, 2017), entre los que destacan los cafetales bajo sombra (Moguel y Toledo, 1999). En el sureste de México es donde se presenta la mayor producción de café arábigo, siendo Chiapas el mayor productor de café (CEDRSSA, 2019), donde la región de la Sierra Madre representa el 54 % de la superficie sembrada en el estado (SAGARPA, 2019).

La cafeticultura bajo sombra ha estado sujeta a presión desde el 2012 por la epidemia de la roya (Avelino *et al.* 2015; Libert-Amico *et al.*, 2016), además

de la caída de los precios del café. Estas presiones han incidido en la degradación forestal y cambios en los usos del suelo, principalmente por la reducción de la sombra y cambios de plantaciones de cafetales a milpas y potreros (Perfecto *et al.*, 2019; Libert-Amico *et al.*, 2020; Harvey *et al.*, 2021), lo que implica pérdidas en la biodiversidad que requieren ser evaluadas.

El Programa Mexicano del Carbono (PMC) implementó la campaña “Una REDD+ para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas” a partir de 2016 (Libert-Amico *et al.*, 2016), instrumentando un programa de muestreo en los diferentes tipos de cafetales bajo sombra (Moguel y Toledo, 1999) y la vegetación natural de referencia, en el contexto de análisis de los impactos causados por la epidemia de la roya. La diversidad vegetal se evaluó en forma preliminar (Sánchez-Sánchez, 2018), por lo que en este trabajo se evalúa detalladamente la relación riqueza-área, retomando la información generada en el programa de muestreo referido, dentro del proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana

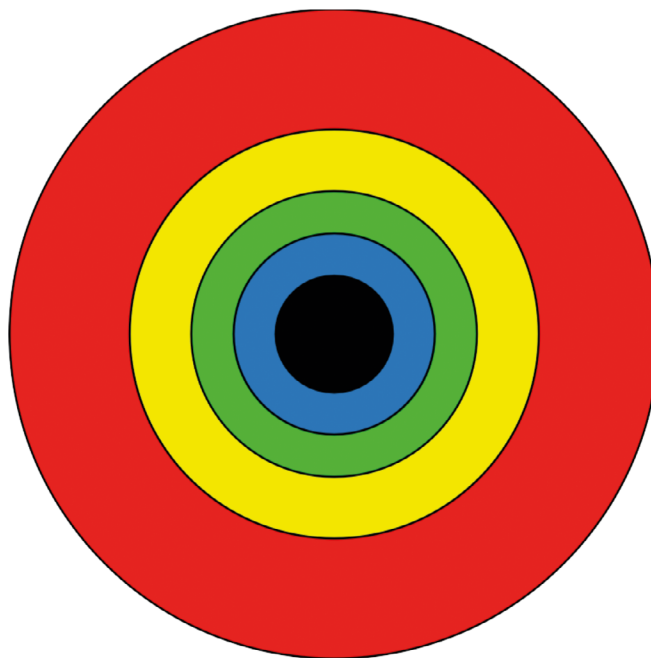
bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” (Bolaños *et al.*, 2021), actualmente financiado por el CONACYT, y que tiene como uno de sus objetivos caracterizar los almacenes de carbono y biodiversidad de los cafetales en Sierra Madre de Chiapas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreos de sitios del programa de muestreo

La parcela de medición tuvo forma circular y cubrió una superficie de 1000 m². Se conformó por cinco círculos concéntricos (Figura 1).

El círculo amarillo cubre la superficie total de la parcela (1000 m²), el radio mide 17.85 m, este círculo se usó en los inventarios de carbono y biodiversidad. El círculo verde cubre una superficie de 400 m², con un radio de 11.28 m. El círculo azul abarca un área de 200 m², con radio de 7.98 m. El círculo morado cubre una superficie de 100 m², su radio mide 5.65 m. El círculo rosa abarca un área de 12.56 m², tiene un radio de 2 m.



Parcela	Círculo					
	Radio m	17.85	11.28	7.98	5.65	2.00
	Área m ²	1000	400	200	100	12.56
Inventario	Carbono					
Carbono+	Biodiversidad					

Figura 1. Parcela de muestreo del inventario de carbono y biodiversidad.

Registro de especies

Se registraron todas las especies de plantas vasculares presentes en cada sitio de muestreo, de acuerdo con el formato de campo (PMC, 2015a y b). Se tomó registro fotográfico de todos los taxa y sólo se colectaron aquellos en floración o fructificación mediante los métodos estándar (Lot y Chiang, 1986). La identificación taxonómica de gabinete se llevó a cabo con ayuda de literatura especializada.

Se analizó la composición florística (especies, géneros y familias) de los sitios muestreados. El catálogo de especies se tomó con referencia en el sistema de clasificación taxonómica de angiospermas APG IV (2016). Para la nomenclatura de gimnospermas y pteridofitas se consultó el Proyecto de Flora Mundial Tropicos® del Herbario del Jardín Botánico de Missouri (Missouri Botanical Garden, 2016), el cual contiene las actualizaciones más recientes de la información taxonómica referente a este tipo de plantas.

Tipos funcionales de Gillison

Los desarrollos de Gillison (2002, 2006) plantean una taxonomía de tipos funcionales, la cual describe cada especie como un modelo funcional de dos componentes: su estructura fotosintética y su sistema vascular de soporte. La estructura fotosintética se caracteriza por la unidad foliar funcional más repetitiva, en función de su tamaño, inclinación, clorotipo y forma. El sistema vascular de soporte se define en función de las formas de vida y de sistemas radicales adventicios. Los atributos funcionales evaluados constan de 36 caracteres, denominados elementos funcionales (Cuadro 1), por lo que las especies y morfoespecies con la misma combinación de elementos funcionales definen un tipo funcional (Gillison, 2002; Gillison, 2006).

Cuadro 1. Atributos y elementos funcionales del sistema de clasificación de Gillison (2006) para plantas vasculares.

Componentes del modelo funcional	Atributos funcionales	Elementos funcionales	Descripción
Cubierta fotosintética	Tamaño foliar	<i>nr</i>	Unidad foliar no repetida
		<i>pi</i>	Picófila (< 0.2 cm)
		<i>le</i>	Leptófila (0.2-0.8 cm)
		<i>na</i>	Nanófila (0.8-2.5 cm)
		<i>mi</i>	Micrófila (2.5-7.5 cm)
		<i>no</i>	Notófila (7.5-12.5 cm)
		<i>me</i>	Mesófila (12.5-25 cm)
		<i>pl</i>	Platífila (25-36 cm)
		<i>ma</i>	Macrófila (36- 83 cm)
		<i>mg</i>	Megáfila (> 83 cm)
	Inclinación foliar	<i>ve</i>	Vertical (> 30° por encima de la horizontal)
		<i>la</i>	Lateral (± 30° a la horizontal)
		<i>pe</i>	Pendular (> 30° por debajo de la horizontal)
		<i>co</i>	Compuesta

Cuadro 1. Atributos y elementos funcionales del sistema de clasificación de Gillison (2006) para plantas vasculares (Continuación).

Componentes del modelo funcional	Atributos funcionales	Elementos funcionales	Descripción
Cubierta fotosintética	Clorotipo foliar	<i>do</i>	Dorsoventral
		<i>is</i>	Isobilateral o isocéntrico
		<i>de</i>	Caducifolio
		<i>ct</i>	Córtico (tallo fotosintético)
		<i>ac</i>	Aclorófilo (sin clorofila)
	Morfotipo foliar	<i>ro</i>	Roseta
		<i>so</i>	Sólido tridimensional
		<i>su</i>	Suculento
		<i>pv</i>	Nervadura paralela
		<i>fi</i>	Filicoide (helechos)
Estructura vascular de soporte	Forma de vida	<i>ca</i>	Insectívoro
		<i>ph</i>	Fanerofita
		<i>ch</i>	Caméfito
		<i>hc</i>	Hemicriptófita
		<i>cr</i>	Criptófita
	Tipo de raíz	<i>th</i>	Terófita
		<i>li</i>	Lianoide
		<i>ad</i>	Adventicia (e.g. contrafuertes)
		<i>ae</i>	Aérea (e.g. neumatóforos)
		<i>ep</i>	Epifítica (e.g. <i>Tillandsia</i> spp.)
	<i>hy</i>	Hidrofítica (e.g. <i>Nymphaea</i> spp.)	
	<i>pa</i>	Parasítica (e.g. <i>Cuscuta</i> spp.)	

Modelos riqueza – área

Entre los principales modelos de la relación riqueza-área se encuentra el modelo potencial (Arrhenius, 1921, 1923a):

$$S = cA^z \tag{1}$$

$$Sg = c_g A^{z_g} \tag{2}$$

y el modelo logarítmico (Gleason, 1922, 1925):

$$S = c + z \ln(A) \tag{3}$$

$$Sg = c_g + z_g \ln(A) \tag{4}$$

Cinética de orden n de la relación riqueza – área

He y Legrende (1996) propusieron una cinética definida por:

$$\frac{dS}{dA} = \frac{f(S)}{A} \tag{5}$$

con $f(S) = \alpha + \beta S + \gamma S^2 + o(S^3)$, donde el cuarto término representa el resto de la expansión de la serie de Taylor alrededor de $S = 0$ para $f(S)$. El modelo logarítmico se genera de $f(S) = \alpha$, el modelo potencial de $f(S) = \alpha + \beta S$ y el modelo de Archibald (1949) de $f(S) = \alpha + \beta S + \gamma S^2$.

Un modelo alternativo propuesto para $f(S)$ está dado por:

$$\frac{dS}{dA} = \frac{k_n S^n}{A} \tag{6}$$

donde k_n es una tasa de cambio y n es el orden de la cinética, cuya solución general, $n \neq 1$, está dada por:

$$S = \{ [S_0^{1-n} - k_n(1-n) \ln \ln(A_0)] + k_n(1-n) \ln(A) \}^{\frac{1}{1-n}} \tag{7}$$

Para el caso $n = 0$, la solución de la relación (6) está dada por:

$$S = [S_0 - k_0 \ln(A_0)] + k_0 \ln(A) \tag{8}$$

que es el modelo logarítmico.

Para el caso $n = 1$, la solución de la relación (6) está dada por:

$$S = \left(\frac{S_0}{A_0^{k_1}} \right) A^{k_1} \tag{9}$$

que es el modelo potencial.

Para el caso de la relación S-Sg, ambas con soluciones definidas por la relación (7) para S-A y Sg-A (parámetros S_{0g} , A_{0g} , k_{ng} y n_g), que al igualarlas se obtiene:

$$S = (a + bSg^d)^e \tag{10}$$

con:

$$a = S_0^{1-n} - k_n(1-n) \ln(A_0) - \left[\frac{k_n(1-n)}{k_{ng}(1-n_g)} \right] S_{0g}^{1-n_g} + k_n(1-n) \ln(A_{0g}) \tag{11}$$

$$b = \left[\frac{k_n(1-n)}{k_{ng}(1-n_g)} \right] \tag{12}$$

$$d = 1 - n_g \tag{13}$$

$$e = \frac{1}{1-n} \tag{14}$$

Localización de sitios de muestreo en Sierra Madre de Chiapas

El programa de muestreo en los cafetales y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas se llevó a cabo durante el año 2016. Inicialmente se propusieron 82 sitios (PMC), con 29 de ellos asociados a parcelas de muestreo para la vigilancia epidemiológica de la roya del café del Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria en el Cultivo del Café por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). La Figura 1 muestra la distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

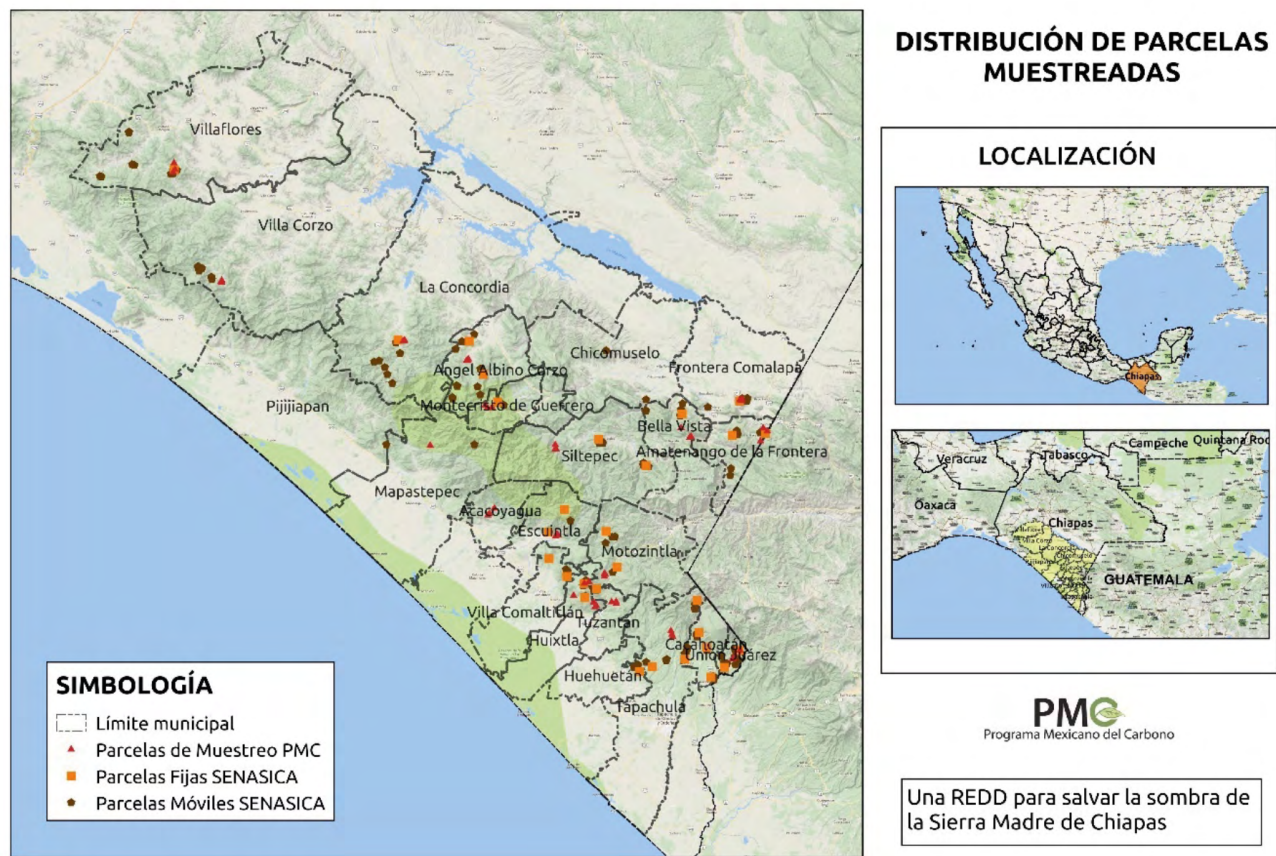


Figura 2. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

El programa de muestreo de almacenes de carbono y diversidad vegetal del PMC se orientó a evaluar los efectos de la roya en el manejo de los cafetales. Después de revisar la consistencia de los 82 sitios de muestreos permitió una selección final de 72 sitios, el resto no fue considerado en los análisis.

RESULTADOS

El ajuste estadístico del modelo S-A de la cinética de orden n (Ecuación 7), en la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos de las estimaciones, realizadas minimizando el error cuadrático de estimación en un proceso no lineal.

Para el caso de Sg-A, mismo proceso de estimación que S-A, en la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos del proceso de estimación no lineal.

En el caso S-A y Sg-A se obtuvieron ajustes estadísticos buenos ($R^2 > 0.98$), por lo que se considera que el modelo de cinética de orden n es adecuado para realizar estimaciones.

Para construir las relaciones mostradas en las Figuras 3 y 4 se utilizaron todos los datos de los cafetales bajo sombra y vegetación natural para S-A, no se utilizaron datos de seis sitios, dado que el ajuste no convergió hacia valores positivos de n .

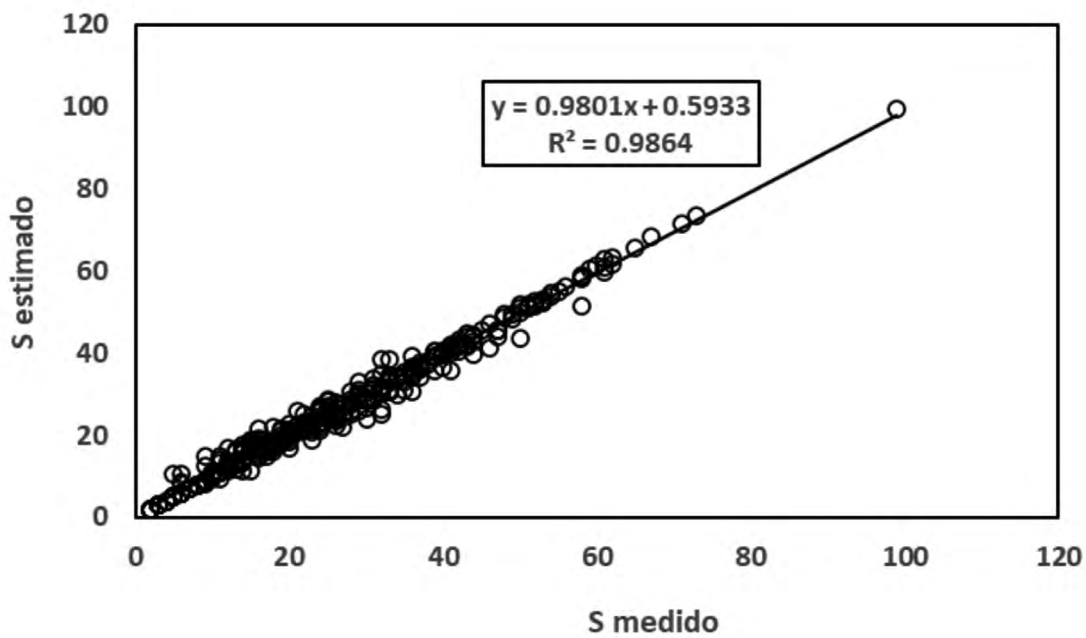


Figura 3. Resultados del ajuste de la cinética de orden n para S-A.

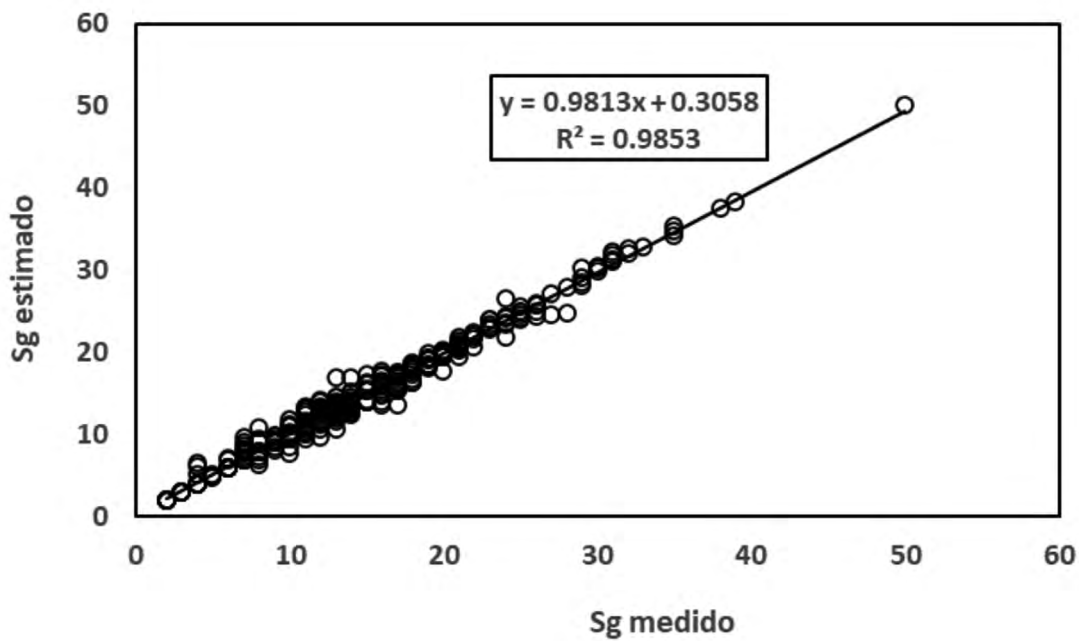


Figura 4. Resultados del ajuste de la cinética de orden n para Sg-A.

La relación entre los parámetros k_n-n y k_{ng-ng} se muestra en las Figuras 5 y 6, en las que se observa que los resultados son buenos ($R^2 > 0.95$). Para el

caso de Sg no se utilizaron los datos de seis sitios de muestreo, aunque se pueden aproximar para valores de n positivos.

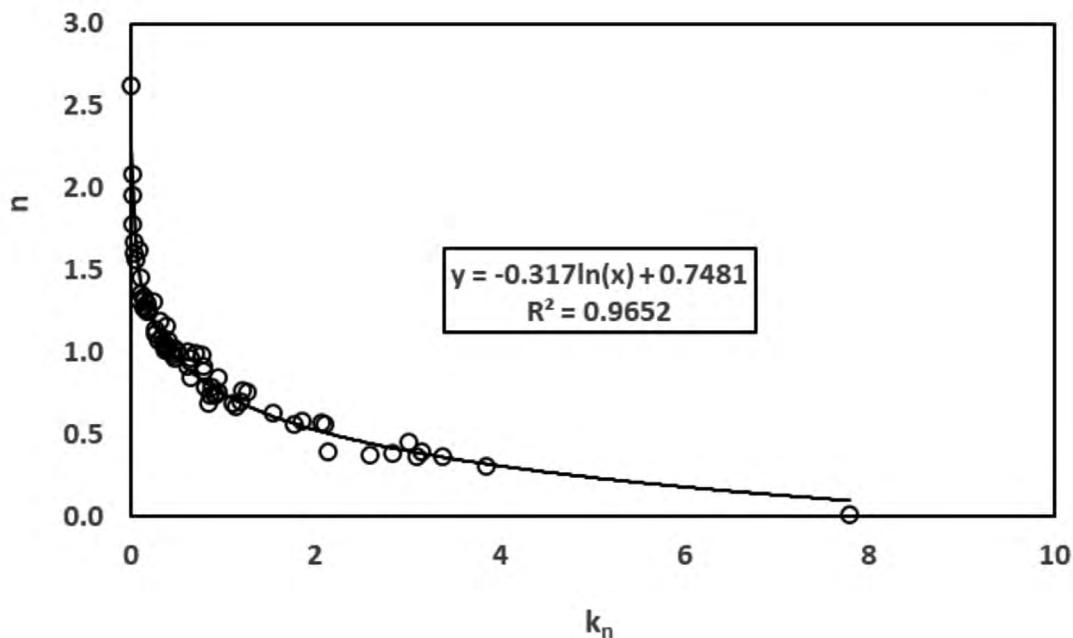


Figura 5. Parámetros de la cinética de orden n de la relación S-A.

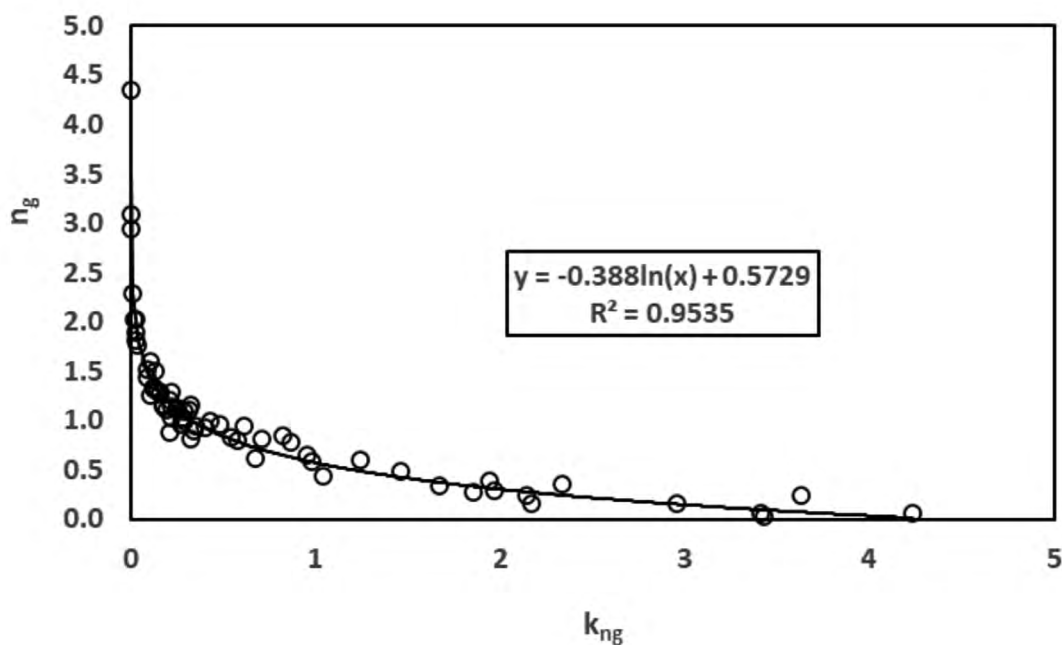


Figura 6. Parámetros de la cinética de orden n de la relación Sg-A.

Finalmente, para la relación Sg-S (Ecuación 10), con el uso de los parámetros estimados de los ajustes de S-A y Sg-A (Ecuaciones 11 a 14), los resultados se

muestran en la Figura 7, en la que se aprecia que los resultados obtenidos son buenos ($R^2 > 0.98$).

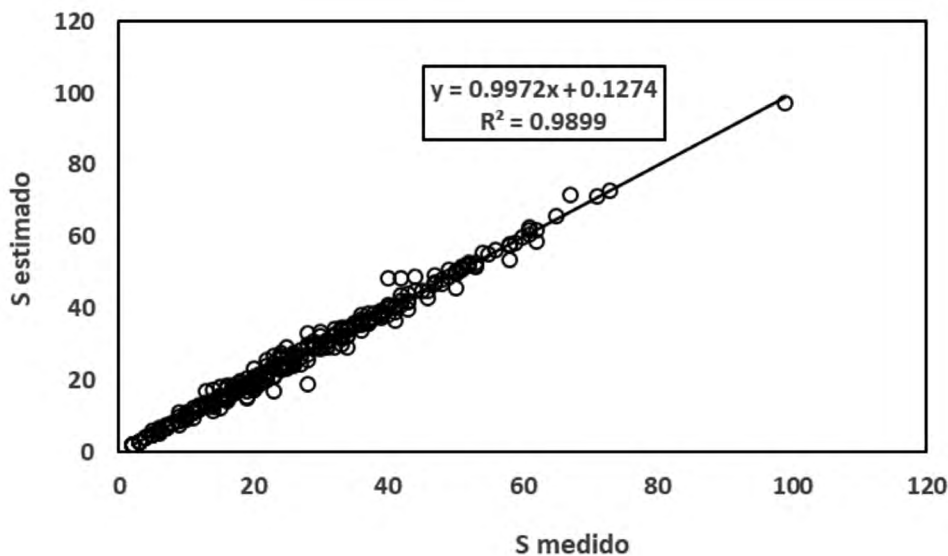


Figura 7. Resultados de la relación Sg-S utilizando parámetros definidos de las relaciones S-A y Sg-A.

DISCUSIÓN

Para analizar la flexibilidad del modelo de cinética de orden n , en lo siguiente se presenta un ejemplo de ajustes empíricos con el uso de datos de Gleason (1922). En la Figura 8 se muestran los ajustes estadísticos del ejemplo, en la que se observa el ajuste del modelo para $n \neq 1$. En los casos de los modelos logarítmico

y potencial ($n = 1$) se observan malos ajustes para valores grandes de A , por lo que la propuesta modificada de He y Legendre (1996) para dS/dA es lo suficientemente flexible para ajustarse, para analizar los casos donde los modelos logarítmico y potencial sobre o subestiman. De esta manera, es suficiente el ajuste de la cinética de orden n para evaluar los modelos potencial y logarítmico alternativos.

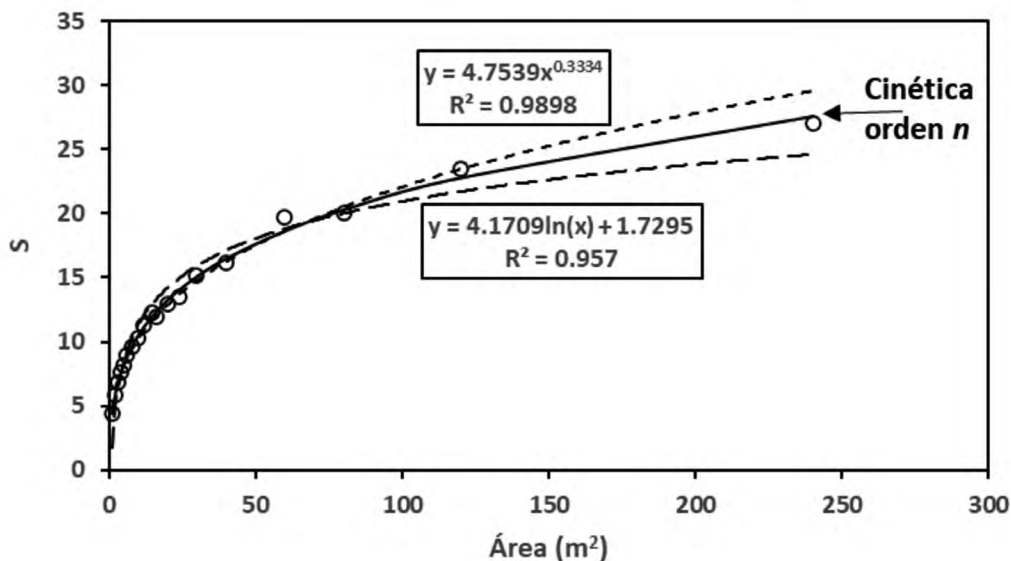


Figura 8. Ajuste del modelo de cinética de orden n a los datos de Gleason (1922).

La ventaja del modelo de cinética de orden n es que, dada la relación de sus parámetros, es posible caracterizarlo con solo un dato (A , S o A , Sg), lo cual simplifica el proceso de estimación.

Los ajustes estadísticos del modelo de cinética de orden n para S - A y Sg - A utilizaron los valores del primer punto de medición, para definir los valores los parámetros: A_0 , S_0 y Ag_0 y Sg_0 , lo que implica la necesidad de contar con un dato adicional en una pequeña área (e.g. 12.56 m²), tarea relativamente simple de ejecutar.

CONCLUSIONES

Las relaciones entre los parámetros de S - A y Sg - A del modelo de cinética de orden n permiten simplificar el proceso de estimación de un solo dato (A , S o A , Sg). Esto requiere contar con un dato de áreas pequeñas, el cual puede obtenerse fácilmente.

El modelo propuesto, y su parametrización, permite establecer un área A cualquiera de referencia para todas las relaciones, estandarizando las estimaciones de diversidad vegetal.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

APG IV. 2016. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 181: 1-20.

Archibald, E. E. A. 1949. The Specific Character of Plant Communities: II. A Quantitative Approach. *Journal of Ecology* 37:274-288.

Arrhenius, O. 1921. Species and Area. *Journal of Ecology* 9:95-99.

Arrhenius, O. 1923a. Statistical Investigations in the Constitution of Plant Associations. *Ecology* 4:68-73.

Arrhenius, O. 1923b. On the relation between species and area: a reply. *Ecology* 4:90-91.

Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A. J. Hruska and C.

Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321.

Bolaños-González, M. A., A. Libert-Amico, F. Paz-Pellat, V. Salas-Aguilar, G. Villalobos-Sánchez, E. Escamilla-Prado, A. S. Velázquez-Rodríguez y E. I. Morales-Reyes. 2021. Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas. pp. 633-638. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.

CEDRSSA. 2019. Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-2024. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Cámara de Diputados - LXIV Legislatura 19 p.

Croezen, H., Bergsma, G., Clemens, A., Sevensteen, M., and B. Tulleners. (2011). Biodiversity and land use- A search for suitable indicators for policy use. CE Delft, Delft. https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/8250_finalreportHCEV.pdf.

Dengler, J. 2009. Which function describes the species-area relationship best? A review and empirical evaluation. *Journal of Biogeography* 36:728-744.

Díaz, S. and Cabido, M. 2001. Vive la difference: Plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology and Evolution* 16:646-655.

Gillison, A. N. 1981. Towards a functional vegetation classification. pp. 30-41. In: A. N. Gillison, and D.J. Anderson (eds). *Vegetation Classification in Australia*. CSIRO and Australian National University Press. Canberra, Australia.

Gillison, A. 2002. A Generic, Computer-assisted Method for Rapid Vegetation Classification and Survey: Tropical and Temperate Case Studies. *Conservation Ecology* 6:3.

Gillison A. 2006. A field manual for rapid vegetation classification and survey for general purposes. Jakarta, Indonesia: Center for International Forestry Research. <http://www.cifor.org/publications/pdf_files/vegclass/vegman2006.pdf> (Acceso en mayo, 2021).

Gillison, A. N. 2013. Plant functional type and traits at the community, ecosystem and world level. pp. 347-386. In: E. van der Marrel and J. Franklin (eds.) *Vegetation Ecology*. Second Edition. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.

Gillison A.N., D. E. Bignell, K. R. W. Brewer, E. C. M. Fernandes, D. T. Jones, D. Sheiz, P. H. May, A. D. Watt, R. Constantino, E. G. Couto, K- Hairiah, P. Jepson, A. P. Kartono, I. Maryauto, G. G. Neto, M. van Noordwisk, E. A. Silveira, F. X. Susilo, S. A. Vosti, and P. C. Nunes. 2013. Plant functional types and traits as biodiversity indicators for tropical forests: two biogeographically separated case studies including birds, mammals and termites. *Biodiversity and Conservation* 22:1909-1930.

- Gillison, A. N. and G. Carpenter. 1997. A generic plant functional attribute set and grammar for dynamic vegetation description and analysis. *Functional Ecology* 11:775–783.
- Gillison, A. N., D. T Jones, F. X. Susilo and D. E. Bignell. 2003. Vegetation indicates diversity of soil macroinvertebrates: a case study with termites along land-use intensification gradient in lowland Sumatra. *Organisms Diversity and Evolution* 3:111–126.
- Gillison, A. N. and N. Liswanti. 2004. Assessing biodiversity at landscape level in northern Thailand and Sumatra (Indonesia): the importance of environmental context. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 104:75–86.
- Gleason, H. A. 1922. On the Relation Between Species and Area. *Ecology* 3:158–162.
- Gleason, H. A. 1925. Species and Area. *Ecology* 6:66–74.
- Harvey, C. A., A. A. Pritts, M. J. Zwetsloot, K. Jansen, M. M. Pullleman, I. Armbrrecht, J. Avelino, J. F. Barrera, C. Bunn, J. Hoyos García, C. Isaza, J. Munoz-Ucros, C. J. Pérez-Alemán, E. Rahn, V. Robiglio, E. Somarriba and V. Valencia. 2021. Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. doi:10.1007/s13593-021-00712-0.
- He, F. and Legendre, P. 1996. On Species-Area Relations. *The American Naturalist* 148:719–737.
- Lavorel, S., S. McIntyre, J. Landeberg and T. D. A. Forbes. 1997. Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends Ecol. Evol.* 12:474–478.
- Libert-Amico, A. 2017. Paisajes bioculturales ante el cambio climático: carbono y agrobiodiversidad en cafetales bajo sombra en Chiapas. pp. 94-99. En: F. Paz, R. Torres y A. Velázquez (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017*. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A., C. Ituarte-Lima and T. Elmqvist. 2020. Learning from social-ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science* 15:485-501.
- Libert-Amico, A., J.C. Wong-González y F. Paz-Pellat. 2016. Impacto de la roya del café en los almacenes de carbono en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 219-225. En: F. Paz y R. Torres (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Lot, A y F. Chiang. (Comp.). 1986. *Manual de herbario: Administración y manejo de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos*. Consejo Nacional de Flora de México. D.F., México 122 p.
- Missouri Botanical Garden. 2018. Herbario virtual del Jardín Botánico de Missouri. Disponible en: <http://www.tropicos.org> (Acceso en septiembre de 2017).
- Moguel, P. and V.M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13:11-21.
- NRC. 2000. *Ecological indicators for the National Committee to Evaluate Indicators for Monitoring Aquatic and Terrestrial Environments*, Board on Environmental Studies and Toxicology, Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C. 180 p.
- Perfecto, I., M. E. Jiménez-Soto and J. Vandermeer. 2019. Coffee landscapes shaping the Anthropocene, forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology*. doi: 10.1086/7703413
- Phillips, O. L., A. H. Gentry, P. Hail, S.A. Sawyer and R. Vazquez. 1994. Dynamics and species richness of tropical rain forests. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 91:2805-2809.
- PMC. 2015a. Manual de procedimientos inventario cuantitativo de carbono+. Estudio de factibilidad Técnica para el pago de bonos de carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Fabiola Rojas-García, Julio Cesar Wong y José Ignacio Pulido Ponce. Texcoco, Estado de México, México 69 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>.
- PMC. 2015b. Una REDD para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas. Manual de Procedimientos Inventario de Biodiversidad. Coordinador: Fernando Paz Pellat. Colaboradores: Antoine Libert Amico, Julio César Wong González y Cristóbal Daniel Sánchez-Sánchez. Texcoco, Estado de México. 77 p. Disponible en: http://pmcarbono.org/pmc/descargas/proyectos/redd/MANUAL_Inventario_de_Biodiversidad_1.0_Cafetales.pdf.
- Rosenzweig, M. 1995. *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge: Cambridge University Press doi:10.1017/CBO9780511623387.
- SAGARPA. 2017. *Cierre de la Producción Agrícola*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México: SAGARPA. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx> (Acceso en diciembre de 2017).
- Sánchez-Sánchez, C. D. 2018. Biodiversidad y cobertura aérea en cafetales bajo distinto manejo en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 644-651. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México.

-
- Tilman, D., J. Knops, D. Wedin and P. Reich. 2002. Plant diversity and composition: effects on productivity and nutrient dynamics of experimental grasslands. pp. 21-35. *In*: M. Loreau, S. Naeem and P. Inchausti (eds.) Biodiversity and Ecosystem Functionals. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Tjørve, E. 2009. Shapes and functions of species-area curves (II): a review of new models and parameterizations. *Journal of Biogeography* 36:1435-1445.
- Tjørve, E. and K.M.C. Tjørve. 2021. Mathematical expressions for the species–area relationship and the assumptions behind the models. pp. 157–184. *In*: T. J. Matthews, K. A. Triantis and R. J. Whittaker (eds.), *The Species–Area Relationship: Theory and Application*. chapter, Cambridge: Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/9781108569422.012>.
- Williams, M. R., B. B. Lamont and J. D. Henstridge. 2009. Species-area functions revisited. *Journal of Biogeography* 36:1994-2004.

MERCADOS DE CARBONO PARA LOS CAFETALES BAJO SOMBRA DE LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS

CARBON MARKETS FOR SHADE-GROWN COFFEE PLANTATIONS IN THE SIERRA MADRE OF CHIAPAS

Fernando Paz^{1†}, Víctor Salas², Alma S. Velázquez³, Antoine Libert⁴ y Martín A. Bolaños⁵

¹Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México

²Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³Facultad de Ciencias, *campus* El Cerrillo, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México.

⁴Programa Mexicano del Carbono, Estado de México, México,

⁵Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, Estado de México, México.

†Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

En el contexto internacional se han negociado diversos mecanismos para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero del sector forestal y la distribución de sus beneficios. Los mercados voluntarios de carbono han implementado transacciones que han permitido ganar experiencia dentro del sector privado. El Programa Mexicano del Carbono en el 2016 instrumentó una campaña para conocer los almacenes de carbono de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, región que contiene el 54% de la superficie del café en el estado, que es el principal productor de café en el país. La evaluación de los almacenes de carbono en los cafetales bajo sombra y vegetación natural, se extiende en este trabajo al considerar los datos de numerosos autores para su análisis, bajo la perspectiva de los mercados del carbono. Las evaluaciones realizadas para el caso de deforestación primaria (de bosques/selvas a otros usos del suelo), degradación forestal (cambios en los tipos de cafetales) y cambios de cafetales a otros usos del suelo (milpas y potreros), permitieron evaluar las ganancias y pérdidas de carbono y, en consecuencia, los costos económicos asociados a tales acciones. Los resultados muestran que las compensaciones financieras por mantener a los bosques y la sombra de los cafetales son competitivas respecto a los pagos por servicios ambientales instrumentados por la Comisión Nacional Forestal, por lo que la propuesta de pagos por conservación de los bosques/selvas y la sombra de los cafetales son viables y atractivos.

Palabras clave: *tipología de cafetales; almacenes de carbono; cambios de uso del suelo; ganancias y pérdidas de carbono; pagos por conservación.*

ABSTRACT

In the international context, various mechanisms have been negotiated for the reduction of greenhouse gas emissions from the forestry sector and the distribution of its benefits. Voluntary markets have implemented carbon market transactions to facilitate gaining experience within the private sector. The Mexican Carbon Program in 2016 implemented a campaign to learn about the carbon stocks of coffee plantations under shade and natural vegetation in the Sierra Madre de Chiapas, a region that contains 54% of the coffee surface in the state, that is the main producer of coffee in the country. The evaluation of carbon stocks in coffee plantations under shade and natural vegetation is extended in this work by considering the data of numerous authors, for analysis from the perspective of carbon markets. The evaluations carried out for the case of primary deforestation (from forests/jungles to other land uses), forest degradation (changes in the types of coffee plantations) and changes from coffee plantations to other land uses (milpas and pastures), allowed evaluating the profits and carbon losses and hence the economic costs associated with such actions. The results show that the financial compensation for maintaining the

forests and the shade of the coffee plantations is competitive with respect to payments for environmental services implemented by the National Forestry Commission, for which the proposal of payments for the conservation of the forests/jungles and the shade of coffee plantations are viable and attractive.

Keywords: *typology of coffee plantations; carbon stocks; land use changes; carbon gains and losses; conservation payments.*

INTRODUCCIÓN

Los mecanismos de la distribución de beneficios de los mercados del carbono han sido tema de discusión dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), asociada a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Sin considerar el Protocolo de Kioto, los mecanismos asociados al sector forestal iniciaron en el 2005 con la propuesta de Papúa Nueva Guinea y Costa Rica (UNFCCC, 2005) para Reducción de Emisiones por Deforestación evitada (RED) y posteriormente, con el denominado “Plan de Acción Bali” (UNFCCC, 2007) se agregó la degradación forestal, para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada (REDD). Actualmente, el mecanismo REDD+ (Reducción de emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada más la conservación e incremento de los almacenes de carbono y el manejo forestal sustentable) (UNFCCC, 2009) está en proceso de negociación entre las partes de la CMNUCC. En México, la CONAFOR (2017a) definió la estrategia nacional para REDD+, donde menciona la propuesta de mecanismos de distribución de beneficios, en proceso de implementación con la Iniciativa de Reducción de Emisiones (IRE) (CONAFOR, 2017b).

Aparte de los mercados regulados (CMNUCC), se han abierto mercados voluntarios (Donofrio *et al.*, 2021; Natzler *et al.*, 2022) que realizan transacciones (compra y venta) del mercado del carbono entre entes privados, facilitando los procesos de emergencia de mercados voluntarios y contribuyendo a la experiencia de las implementaciones, a través de negociaciones para pactar precios del carbono (t CO₂). Los compradores son generalmente empresas privadas que tratan de mitigar su huella del carbono con fines ambientales y de imagen.

Para realizar transacciones en los mercados del carbono, es necesario cumplir una serie de requisitos

(línea base, adicionalidad, fugas, permanencia, entre otros), lo que las hace costosas, tanto en tiempo como en recursos económicos, además de basarse en una situación hipotética (línea base). La implementación de REDD+ no ha sido tan exitosa como se pensaba (Angelsen *et al.*, 2021). La propuesta del Banco Mexicano del Carbono (Paz-Pellat, 2022a) consiste fundamentalmente en simplificar y abaratar las transacciones utilizando mecanismos flexibles, en base a la conceptualización de las reducciones evitadas como procesos de conservación de los almacenes de carbono (Paz-Pellat, 2022b).

La cafeticultura bajo sombra se localizada principalmente en el sureste de México, siendo Chiapas el principal productor del país de café arábigo (SAGARPA, 2017). El estado de Chiapas produce el 41% del total nacional (CEDRSSA, 2019), en condiciones de bajo desarrollo socioeconómico y pobreza, que hace a los productores altamente vulnerables ante impactos externos, tales como la epidemia de la roya que se presentó a partir del 2012 (Avelino *et al.* 2015; Libert-Amico *et al.*, 2020). La región de la Sierra Madre de Chiapas, que alberga el 54% de la superficie cafetalera del estado (SAGARPA, 2017), presenta condiciones de alta vulnerabilidad a los riesgos climáticos, donde las comunidades rurales e indígenas y equiparables resienten los eventos hidrometeorológicos extremos que ponen en riesgo los medios de vida de los productores (Libert-Amico *et al.*, 2020). La epidemia de la roya ha provocado deforestación (cambio de cafetales a milpas y potreros) y degradación forestal (reducción de la sombra), además de la pérdida de la diversidad vegetal (Libert-Amico *et al.*, 2016; Perfecto *et al.*, 2019; Harvey *et al.*, 2021).

El Programa Mexicano del Carbono implementó en la región de la Sierra Madre de Chiapas, en el 2016, la campaña “Una REDD+ para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas”, orientada a caracterizar los almacenes de carbono de los cafetales bajo sombra y

la vegetación natural en la región, además de evaluar los impactos de la roya del café. Esta campaña fue la base para el proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” (Bolaños *et al.*, 2021), actualmente financiado por el CONACYT, el cual tiene como objetivo caracterizar los almacenes de carbono de las componentes (biomasa viva aérea, carbono orgánico del suelo, mantillo, madera muerta, biomasa viva subterránea) de los cafetales.

Los cafetales bajo sombra tienen un alto potencial de captura de carbono (Pineda-López *et al.*, 2005), por lo que son susceptibles de recibir pagos económicos por su conservación (de Jong *et al.*, 1997; Aguirre Dávila, 2006; Davalos Sotelo *et al.*, 2008; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018; Paz-Pellat, 2020) con el uso de los mercados de carbono (Williams-Guillén y Otterstrom, 2014).

Por esta razón, este documento tiene como objetivo evaluar los mercados del carbono para los cafetales bajo sombra en la Sierra Madre de Chiapas (México) al establecer una primera aproximación a los beneficios por conservar los almacenes del carbono, ampliando las evaluaciones de los almacenes de carbono en los cafetales bajo sombra y vegetación natural, para considerar un amplio número de trabajos adicionales; además del recientemente realizado por el grupo de investigación (Paz *et al.*, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

La tipología de cafetales definida por Moguel y Toledo (1999) usa un sistema de clasificación orientado a grandes divisiones: (a) un primer criterio consiste en discriminar entre la existencia o no de la sombra, para establecer el cafetal a pleno sol del resto. (b) el segundo criterio, para los cafetales bajo sombra, consiste en la separación entre mono y policultivos, analizando el número de especies de la sombra y, finalmente (c) un tercer criterio consiste en separar entre policultivos comerciales de policultivos tradicionales o rústicos. Para esto es necesario analizar la composición de árboles no nativos o no originales en la sombra. Los policultivos comerciales tienen una alta proporción de este tipo de árboles. De acuerdo a Moguel y Toledo (1999), los policultivos tradicionales presentan una altura promedio de 20-30 m y los comerciales una altura de no más de 15 m. La abundancia de epífitas puede separar también los policultivos y discriminar a los cafetales rústicos.

Los policultivos tradicionales y rústicos tienen una abundancia de especies de herbáceas que es dos a cuatro veces mayor que las especies arbóreas.

En el caso de cafetales bajo sombra y sus almacenes de carbono, es necesario diferenciar el tipo predominante de la composición arbórea. El uso de especies maderables (*e.g.* cedro, caoba, entre otras) incrementa el valor del almacén de la biomasa viva aérea (Nelson y de Jong, 2003; Soto-Pinto *et al.*, 2006; Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012) con relación al uso de árboles leguminosos o frutales.

La tipología de cafetales está circunscrita al axioma de “producir conservando y conservar produciendo” (Moguel y Toledo, 2004; Libert-Amico, 2017), como una estrategia de intervención con orientación a la conservación de la diversidad. El enfoque de paisajes bioculturales integra la diversidad cultural y el manejo (Libert-Amico, 2017) en el análisis de los diferentes tipos de cafetales. La resiliencia socio-ecológica analiza el potencial de transformación socio-ecológico ante eventos de perturbación (Libert-Amico, 2018).

Los tipos de cafetales, sin embargo, se deben analizar más allá de la perspectiva biológica e incluir, entre otras cosas, las dimensiones de sostenibilidad: economía, paisaje y hogar (Toledo y Moguel, 2012).

La tipología de los cafetales bajo sombra mostrada en la Figura 1, propuesta por Moguel y Toledo (1999) y discutida en Escamilla-Prado y Díaz-Cárdenas (2016) y Libert-Amico (2020), tiene cinco tipos de cafetales, donde se han modificado dos de ellos para considerar la sombra de especies forestales y el manejo orgánico. De esta manera, la tipología está definida por: (a) “rústico” o “de montaña”, el cual asemeja a un bosque o selva que ha sido aclarado en su estrato inferior (sotobosque) y sustituido por plantas de café, manteniendo los árboles de sombra originales. (b) “policultivo tradicional” o “jardín de café”. El estrato inferior es sustituido por cafetos y la sombra está compuesta por árboles naturales e introducidos de diferentes usos: especies maderables y frutales, entre otros. (c) “policultivo comercial”. La sombra original es removida totalmente, para generar sombra con dos o tres especies de árboles de tipo comercial y otros para la subsistencia local. La remoción total de la sombra usando árboles introducidos reduce la complejidad estructural y diversidad de la sombra. La sombra puede ser forestal o no forestal (frutales, cítricos, entre otros.) y el manejo puede ser orgánico o no. (d) “monocultivo bajo sombra” o “especializado”. Después de la remoción de la sombra, se plantan

árboles, muchas veces de una sola especie (por ejemplo, *Inga*). La sombra puede ser forestal o no forestal (frutales, cítricos, entre otros) y el manejo puede ser orgánico o no. (e) “monocultivo sin sombra”

o “a pleno sol”. No tiene sombra y está expuesto al sol, en altas densidades de cafetos. Las mayores cosechas de café se obtienen de este sistema.

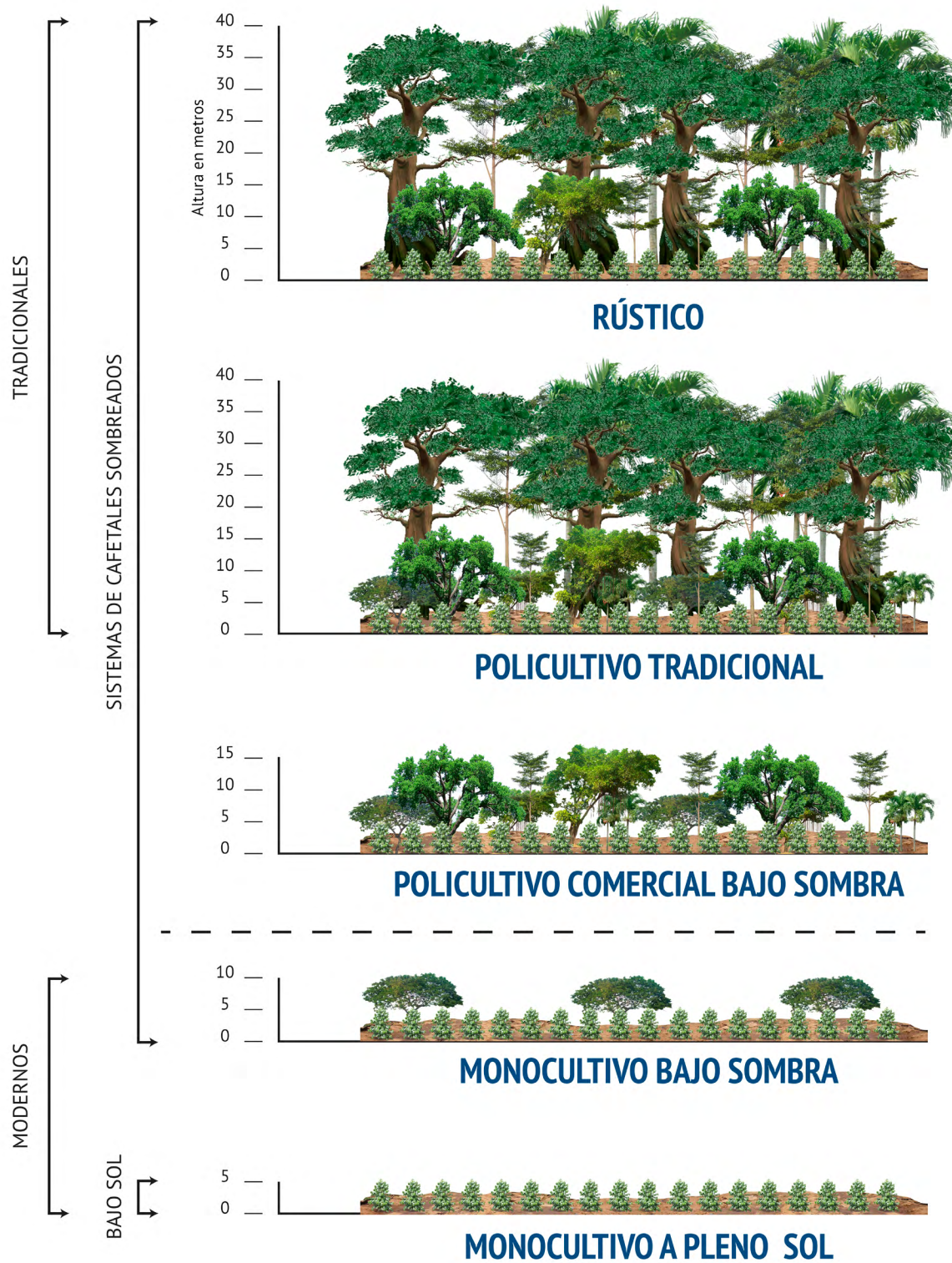


Figura 1. Tipología de cafetales bajo sombra. Adaptado de Moguel y Toledo (1999).

Para evaluar los almacenes de carbono de los cafetales bajo sombra y vegetación natural, se revisó la literatura nacional, principalmente de Chiapas y Veracruz (Nelson y de Jong, 2003; Aguirre Dávila, 2006; Soto-Pinto *et al.*, 2005 y 2006; Roncal, 2006; Aguilar, 2007; Delgadillo y Quechulpa, 2007; Dávalos Sotelo *et al.*, 2008; Jiménez-Ferrer *et al.*, 2008; Roncal-García *et al.*, 2008; Soto-Pinto *et al.*, 2008 y 2010; Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012; Vargas Guillén *et al.*, 2012; Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013; Soto-Pinto *et al.*, 2013; Valdez-Velarde *et al.*, 2014a y b; Cuevas-Trejo *et al.*, 2014; Masuhara *et al.*, 2015; Soto-Pinto y Aguirre-Dávila, 2015; Soto-Pinto *et al.*, 2015; Villanueva-López *et al.*, 2015; Bautista-Calderón *et al.*, 2016; Raj Aryal *et al.*, 2018; Salgado Mora *et al.*, 2018; Salas-Aguilar *et al.*, 2018; Velázquez-Rodríguez y Paz-Pellat, 2020; Tinoco-Rueda *et al.*, 2021; Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2021; Morales-Ruiz *et al.*, 2021). A la par, se revisaron los meta-análisis de los almacenes de carbono en cafetales y otros tipos de uso del suelo (Ávila Vargas, 2000; Morales Coutiño, 2010; Covalada *et al.*, 2012 y 2019; Rikxoort *et al.*, 2014; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018; Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018; Paz-Pellat, 2020; Paz-Pellat *et al.*, 2022).

En términos monetarios, los pagos (valores negativos) por la conservación de un uso del suelo con relación a un cambio específico, estarán dados de acuerdo a los precios recientemente registrados en los mercados voluntarios del carbono. Para estimar los pagos, es necesario convertir los almacenes en Mg C ha⁻¹ a Mg CO₂ ha⁻¹ multiplicando los primeros valores de carbono por un factor relacionado con los pesos moleculares del CO₂ y el C (44/12). El precio de 1 Mg CO₂ que se utilizó en los cálculos fue de \$8.0 dólares (Donofrio *et al.*, 2021), con una conversión de \$ 20.0 pesos por dólar.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis realizados en la evaluación de los almacenes de carbono por componentes, de los cafetales bajo sombra y otros usos del suelo, se muestran en el Cuadro 1, a nivel de promedios. No se muestran las métricas de incertidumbre para no sobre cargar con información los cuadros.

Cuadro 1. Almacenes de carbono por componentes, en Mg C ha⁻¹

Uso del suelo	Biomasa aérea viva	Biomasa subterránea viva	Mantillo	Material muerto	Suelo	Total
Selva mediana	105.5	21.3	6.1	3.4	118.3	261.5
Bosque mesófilo	242.2	58.9	9.1	4.7	157.4	472.1
Bosque de pino-encino-liquidámbar	137.2	35.7	9.4	3.5	179.4	365.0
Bosque de pino	91.3	24.9	3.7	2.4	123.4	245.9
Bosque de encino	98.0	26.5	3.2	1.7	115.4	244.7
Bosque de pino-encino	105.9	28.4	8.7	3.2	116.6	262.7
Agricultura de temporal	2.6	1.1	1.6	0.2	75.3	80.8
Agricultura de temporal con labranza de conservación	3.0	1.2	1.7	0.3	82.3	88.5
Agricultura de temporal más árboles dispersos	9.0	3.2	1.9	0.8	98.7	113.6

Cuadro 1. Almacenes de carbono por componentes, en Mg C ha⁻¹ (Continuación).

Uso del suelo	Biomasa aérea viva	Biomasa subterránea viva	Mantillo	Material muerto	Suelo	Total
Maíz intercalado con árboles frutales	15.7	3.0	1.8	0.6	95.4	116.5
Pastizal	2.3	1.0	2.0	0.2	92.1	97.5
Pastizal más árboles dispersos	9.4	3.3	1.8	1.4	97.0	112.8
Pastizal más cercos vivos	13.4	4.6	0.3	1.0	89.7	109.0
Cafetal a pleno sol	8.1	2.9	2.0	2.1	123.4	113.6
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	28.5	8.9	4.8	4.5	111.0	157.7
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	47.7	14.0	3.6	1.3	132.1	198.6
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	98.7	26.7	6.0	2.7	112.5	246.6
Cafetal policultivo comercial no forestal	34.4	10.5	6.4	3.1	100.2	154.5
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	39.1	11.7	3.7	2.7	106.8	163.9
Cafetal policultivo comercial forestal	88.6	24.2	6.8	3.4	105.3	228.3
Cafetal policultivo tradicional	49.2	14.4	3.9	3.1	112.3	182.9
Cafetal rústico	60.3	17.2	4.5	1.5	120.2	203.7

Los cambios de los almacenes de carbono que resultan de pasar de un estado inicial (primera columna) a uno final (primer renglón) se muestran en los Cuadros

2 y 3 para el caso de deforestación primaria (de bosques/selvas a cafetales y de bosques/selvas a uso agropecuarios).

Cuadro 2. Cambios del total de C al pasar de bosques/selva a cafetales, en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Selva mediana	-148.0	-103.8	-62.9	-15.0	-107.0	-97.6	-33.3	-78.6	-57.8
Bosque mesófilo	-358.6	-314.4	-273.5	-225.6	-317.6	-308.2	-243.9	-289.2	-268.4
Bosque de pino-encino-liquidámbar	-251.5	-207.3	-166.4	-118.5	-210.5	-201.2	-136.8	-182.1	-161.4
Bosque de pino	-132.3	-88.2	-47.3	0.6	-91.4	-82.0	-17.6	-63.0	-42.2
Bosque de encino	-131.1	-86.9	-46.0	1.9	-90.1	-80.8	-16.4	-61.7	-41.0
Bosque de pino-encino	-149.1	-105.0	-64.1	-16.1	-108.1	-98.8	-34.4	-79.8	-59.0

Cuadro 3. Cambios del total de C al pasar de bosques/selva a usos agropecuarios, en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	109.0
Selva mediana	-180.7	-173.0	-148.0	-145.0	-164.0	-152.5
Bosque mesófilo	-391.3	-383.6	-358.6	-355.6	-374.6	-363.2
Bosque de pino-encino-liquidámbar	-284.2	-276.5	-251.5	-248.5	-267.5	-256.1
Bosque de pino	-165.1	-157.4	-132.3	-129.4	-148.4	-136.9
Bosque de encino	-163.8	-156.1	-131.1	-128.2	-147.2	-135.7
Bosque de pino-encino	-181.9	-174.2	-149.1	-146.2	-165.2	-153.7

Los cambios de carbono de los usos del suelo tienen signo negativo para las pérdidas y positivo para las ganancias.

En el Cuadro 4 se muestran los cambios en el total de C para el caso de degradación forestal (cambios en la sombra).

Cuadro 4. Cambios del total de C asociados a los tipos de cafetales (cambios en la sombra), en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	C	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
	total									
Cafetal a pleno sol	113.6	0.0	44.1	85.1	133.0	41.0	50.3	114.7	69.4	90.1
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	157.7	-44.1	0.0	40.9	88.9	-3.2	6.2	70.6	25.2	46.0
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	198.6	-85.1	-40.9	0.0	47.9	-44.1	-34.7	29.6	-15.7	5.1
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	246.6	-133.0	-88.9	-47.9	0.0	-92.0	-82.7	-18.3	-63.6	-42.9
Cafetal policultivo comercial no forestal	154.5	-41.0	3.2	44.1	92.0	0.0	9.3	73.7	28.4	49.1
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	163.9	-50.3	-6.2	34.7	82.7	-9.3	0.0	64.4	19.0	39.8
Cafetal policultivo comercial forestal	228.3	-114.7	-70.6	-29.6	18.3	-73.7	-64.4	0.0	-45.3	-24.6
Cafetal policultivo tradicional	182.9	-69.4	-25.2	15.7	63.6	-28.4	-19.0	45.3	0.0	20.8
Cafetal rústico	203.7	-90.1	-46.0	-5.1	42.9	-49.1	-39.8	24.6	-20.8	0.0

En el Cuadro 5 se muestran los cambios del contenido de C total al pasar de cafetales a usos agropecuarios.

Cuadro 5. Cambios del total de C de cafetales a usos agropecuarios, en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	C total	Agricultura de temporal	Agricultura temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
Cafetal a pleno sol	113.6	-32.7	-25.1	0.0	2.9	-16.1	-4.6
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	157.7	-76.9	-69.2	-44.1	-41.2	-60.2	-48.7
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	198.6	-117.8	-110.1	-85.1	-82.1	-101.1	-89.6
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	246.6	-165.7	-158.0	-133.0	-130.1	-149.1	-137.6
Cafetal policultivo comercial no forestal	154.5	-73.7	-66.0	-41.0	-38.0	-57.0	-45.6
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	163.9	-83.1	-75.4	-50.3	-47.4	-66.4	-54.9
Cafetal policultivo comercial forestal	228.3	-147.4	-139.7	-114.7	-111.8	-130.8	-119.3
Cafetal policultivo tradicional	182.9	-102.1	-94.4	-69.4	-66.4	-85.4	-73.9
Cafetal rústico	203.7	-122.9	-115.2	-90.1	-87.2	-106.2	-94.7

En el Cuadro 6 se muestran los pagos totales (\$ pesos ha⁻¹) por conservar los almacenes de carbono en bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales.

Cuadro 6. Pagos (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales, en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico		
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	228.3	182.9	203.7		
Selva mediana	261.5	-\$86 802.96	-\$60 911.20	-\$36 904.03	-\$8 785.50	-\$62 760.40	-\$57 282.11	-\$19 515.56	-\$46 109.28	-\$33 928.83
Bosque mesófilo	472.1	-\$210 359.72	-\$184 467.96	-\$160 460.79	-\$132 342.26	-\$186 317.16	-\$180 838.88	-\$143 072.32	-\$169 666.05	-\$157 485.60
Bosque de pino-encino-liquidambar	365.0	-\$147 536.07	-\$121 644.31	-\$97 637.14	-\$69 518.61	-\$123 493.51	-\$118 015.23	-\$80 248.67	-\$106 842.40	-\$94 661.94
Bosque de pino	245.9	-\$77 638.87	-\$51 747.11	-\$27 739.94	\$378.59	-\$53 596.31	-\$48 118.03	-\$10 351.47	-\$36 945.20	-\$24 764.75
Bosque de encino	244.7	-\$76 901.77	-\$51 010.01	-\$27 002.84	\$1 115.69	-\$52 859.21	-\$47 380.93	-\$9 614.37	-\$36 208.10	-\$24 027.64
Bosque de pino-encino	262.7	-\$87 481.32	-\$61 589.56	-\$37 582.39	-\$9 463.86	-\$63 438.76	-\$57 960.48	-\$20 193.92	-\$46 787.65	-\$34 607.19

En el Cuadro 7 se muestran los pagos totales (\$ pesos ha⁻¹) por conservar bosques/selvas con relación a usos agropecuarios, con diferentes tipos de manejo.

Cuadro 7. Pagos (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a usos agropecuarios, en pesos.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal de más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	112.8	109.0
Selva mediana	-\$106 015.71	-\$101 500.12	-\$86 802.96	-\$85 082.70	-\$96 229.35	-\$87 228.69	-\$89 492.36
Bosque mesófilo	-\$229 572.48	-\$225 056.88	-\$210 359.72	-\$208 639.47	-\$219 786.12	-\$210 785.46	-\$213 049.12
Bosque de pino-encino-liquidambar	-\$166 748.83	-\$162 233.23	-\$147 536.07	-\$145 815.81	-\$156 962.47	-\$147 961.81	-\$150 225.47
Bosque de pino	-\$96 851.63	-\$92 336.03	-\$77 638.87	-\$75 918.62	-\$87 065.27	-\$78 064.61	-\$80 328.28
Bosque de encino	-\$96 114.53	-\$91 598.93	-\$76 901.77	-\$75 181.51	-\$86 328.17	-\$77 327.50	-\$79 591.17
Bosque de pino-encino	-\$106 694.08	-\$102 178.48	-\$87 481.32	-\$85 761.06	-\$96 907.72	-\$87 907.06	-\$90 170.72

Para el caso de pagos totales por degradación forestal (cambios en la sombra de los cafetales), el Cuadro 8 muestra los valores.

Cuadro 8. Pagos totales (valores negativos) por degradación forestal (cambios en la sombra de los cafetales), en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Cafetal a pleno sol	\$0.00	\$25 891.76	\$49 898.93	\$78 017.46	\$24 042.56	\$29 520.84	\$67 287.40	\$40 693.67	\$52 874.12
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	-\$25 891.76	\$0.00	\$24 007.17	\$52 125.70	-\$1 849.20	\$3 629.08	\$41 395.64	\$14 801.92	\$26 982.37
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	-\$49 898.93	-\$24 007.17	\$0.00	\$28 118.53	-\$25 856.37	-\$20 378.09	\$17 388.47	-\$9 205.26	\$2 975.20
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	-\$78 017.46	-\$52 125.70	-\$28 118.53	\$0.00	-\$53 974.90	-\$48 496.62	-\$10 730.06	-\$37 323.79	-\$25 143.34
Cafetal policultivo comercial no forestal	-\$24 042.56	\$1 849.20	\$25 856.37	\$53 974.90	\$0.00	\$5 478.28	\$43 244.84	\$16 651.12	\$28 831.57
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	-\$29 520.84	-\$3 629.08	\$20 378.09	\$48 496.62	-\$5 478.28	\$0.00	\$37 766.56	\$11 172.83	\$23 353.28
Cafetal policultivo comercial forestal	-\$67 287.40	-\$41 395.64	-\$17 388.47	\$10 730.06	-\$43 244.84	-\$37 766.56	\$0.00	-\$26 593.73	-\$14 413.27
Cafetal policultivo tradicional	-\$40 693.67	-\$14 801.92	\$9 205.26	\$37 323.79	-\$16 651.12	-\$11 172.83	\$26 593.73	\$0.00	\$12 180.45
Cafetal rústico	-\$52 874.12	-\$26 982.37	-\$2 975.20	\$25 143.34	-\$28 831.57	-\$23 353.28	\$14 413.27	-\$12 180.45	\$0.00

En el Cuadro 9 se muestran los pagos totales por conservar los cafetales con relación a los usos agropecuarios con distintos manejos.
Cuadro 9. Pagos totales (valores negativos) por conservar los cafetales con relación a los usos agropecuarios con distintos manejos, en pesos.

Uso del suelo	C	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	112.8	109.0	
Cafetal a pleno sol	113.6	-\$19 212.76	-\$14 697.16	\$0.00	\$1 720.25	-\$9 426.40	-\$425.74	-\$2 689.40
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	157.7	-\$45 104.52	-\$40 588.92	-\$25 891.76	-\$24 171.50	-\$35 318.16	-\$26 317.49	-\$28 581.16
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	198.6	-\$69 111.69	-\$64 596.09	-\$49 898.93	-\$48 178.67	-\$59 325.33	-\$50 324.67	-\$52 588.33
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	246.6	-\$97 230.22	-\$92 714.62	-\$78 017.46	-\$76 297.21	-\$87 443.86	-\$78 443.20	-\$80 706.86
Cafetal policultivo comercial no forestal	154.5	-\$43 255.32	-\$38 739.72	-\$24 042.56	-\$22 322.30	-\$33 468.96	-\$24 468.29	-\$26 731.96
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	163.9	-\$48 733.60	-\$44 218.00	-\$29 520.84	-\$27 800.59	-\$38 947.24	-\$29 946.58	-\$32 210.24
Cafetal policultivo comercial forestal	228.3	-\$86 500.16	-\$81 984.56	-\$67 287.40	-\$65 567.14	-\$76 713.80	-\$67 713.13	-\$69 976.80
Cafetal policultivo tradicional	182.9	-\$59 906.43	-\$55 390.84	-\$40 693.67	-\$38 973.42	-\$50 120.07	-\$41 119.41	-\$43 383.08
Cafetal rústico	203.7	-\$72 086.88	-\$67 571.29	-\$52 874.12	-\$51 153.87	-\$62 300.52	-\$53 299.86	-\$55 563.53

La iniciativa de Banco Mexicano del Carbono (Paz-Pellat, 2022a) del carbono es el pago anual por servicios ambientales de la Comisión plantea pagos anuales con el uso del concepto “ton-años”, donde los Nacional Forestal (DOF, 2021), el cual se estableció en \$ 1100 pesos por pagos anuales van del 0.9% al 3.2% del total (Paz-Pellat, 2022a), por lo hectárea.

El Cuadro 10 muestra los pagos anuales (3.2% del pago total) por que se puede utilizar el pago máximo para evaluar los pagos anuales. Una conservación de bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales. referencia para comparar los pagos anuales por conservar los almacenes

Cuadro 10 Pagos anuales (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales, en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Selva mediana	261.5	-\$2 777.69	-\$1 949.16	-\$281.14	-\$2 008.33	-\$1 833.03	-\$624.50	-\$1 475.50	-\$1 085.72
Bosque mesófilo	472.1	-\$6 731.51	-\$5 902.97	-\$4 234.95	-\$5 962.15	-\$5 786.84	-\$4 578.31	-\$5 429.31	-\$5 039.54
Bosque de pino-encino-liquidámbar	365.0	-\$4 721.15	-\$3 892.62	-\$2 224.60	-\$3 951.79	-\$3 776.49	-\$2 567.96	-\$3 418.96	-\$3 029.18
Bosque de pino	245.9	-\$2 484.44	-\$1 655.91	\$12.11	-\$1 715.08	-\$1 539.78	-\$331.25	-\$1 182.25	-\$792.47
Bosque de encino	244.7	-\$2 460.86	-\$1 632.32	\$35.70	-\$1 691.49	-\$1 516.19	-\$307.66	-\$1 158.66	-\$768.88
Bosque de pino-encino	262.7	-\$2 799.40	-\$1 970.87	-\$302.84	-\$2 030.04	-\$1 854.74	-\$646.21	-\$1 497.20	-\$1 107.43

En el Cuadro 11 se muestran los pagos anuales por conservación de bosques/selvas con relación a su conversión a usos agropecuarios con diferentes manejos.

Cuadro 11. Pagos anuales (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a usos agropecuarios con diferentes manejos, en pesos.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	109.0
Selva mediana	-3 392.50	-3 248.00	-2 777.69	-2 722.65	-3 079.34	-2 791.32
Bosque mesófilo	-7 346.32	-7 201.82	-6 731.51	-6 676.46	-7 033.16	-6 745.13
Bosque de pino-encino-liquidámbar	-5 335.96	-5 191.46	-4 721.15	-4 666.11	-5 022.80	-4 734.78
Bosque de pino	-3 099.25	-2 954.75	-2 484.44	-2 429.40	-2 786.09	-2 498.07
Bosque de encino	-3 075.66	-2 931.17	-2 460.86	-2 405.81	-2 762.50	-2 474.48
Bosque de pino-encino	-3 414.21	-3 269.71	-2 799.40	-2 744.35	-3 101.05	-2 813.03

Para el caso de la degradación forestal (cambios en la sombra de los cafetales), el Cuadro 12 se muestran los pagos anuales.

Cuadro 12. Pagos anuales (valores negativos) por cambios en la sombra de los cafetales, en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Cafetal a pleno sol	\$0.00	\$828.54	\$1 596.77	\$2 496.56	\$769.36	\$944.67	\$2 153.20	\$1 302.20	\$1 691.97
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	-\$828.54	\$0.00	\$768.23	\$1,668.02	-\$59.17	\$116.13	\$1 324.66	\$473.66	\$863.44
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	-\$1 596.77	-\$768.23	\$0.00	\$899.79	-\$827.40	-\$652.10	\$556.43	-\$294.57	\$95.21
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	-\$2 496.56	-\$1 668.02	-\$899.79	\$0.00	-\$1 727.20	-\$1 551.89	-\$343.36	-\$1 194.36	-\$804.59
Cafetal policultivo comercial no forestal	-\$769.36	\$59.17	\$827.40	\$1 727.20	\$0.00	\$175.31	\$1 383.83	\$532.84	\$922.61
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	-\$944.67	-\$116.13	\$652.10	\$1 551.89	-\$175.31	\$0.00	\$1 208.53	\$357.53	\$747.31
Cafetal policultivo comercial forestal	-\$2 153.20	-\$1 324.66	-\$556.43	\$343.36	-\$1 383.83	-\$1 208.53	\$0.00	-\$851.00	-\$461.22
Cafetal policultivo tradicional	-\$1 302.20	-\$473.66	\$294.57	\$1 194.36	-\$532.84	-\$357.53	\$851.00	\$0.00	\$389.77
Cafetal rústico	-\$1 691.97	-\$863.44	-\$95.21	\$804.59	-\$922.61	-\$747.31	\$461.22	-\$389.77	\$0.00

Para el caso de los pagos anuales por cambios de cafetales a usos agropecuarios con diferentes manejos, el Cuadro 13 muestra los valores.
Cuadro 13. Pagos (valores negativos) por conservar los cafetales con relación a los usos agropecuarios con distintos manejos, en pesos.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	112.8	109.0
Cafetal a pleno sol	-\$614.81	-\$470.31	\$0.00	\$55.05	-\$301.64	-\$13.62	-\$86.06
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	-\$1 443.34	-\$1 298.85	-\$828.54	-\$773.49	-\$1 130.18	-\$842.16	-\$914.60
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	-\$2 211.57	-\$2 067.07	-\$1 596.77	-\$1 541.72	-\$1 898.41	-\$1 610.39	-\$1 682.83
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	-\$3 111.37	-\$2 966.87	-\$2 496.56	-\$2 441.51	-\$2 798.20	-\$2 510.18	-\$2 582.62
Cafetal policultivo comercial no forestal	-\$1 384.17	-\$1 239.67	-\$769.36	-\$714.31	-\$1 071.01	-\$782.99	-\$855.42
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	-\$1 559.48	-\$1 414.98	-\$944.67	-\$889.62	-\$1 246.31	-\$958.29	-\$1 030.73
Cafetal policultivo comercial forestal	-\$2 768.00	-\$2 623.51	-\$2 153.20	-\$2 098.15	-\$2 454.84	-\$2 166.82	-\$2 239.26
Cafetal policultivo tradicional	-\$1 917.01	-\$1 772.51	-\$1 302.20	-\$1 247.15	-\$1 603.84	-\$1 315.82	-\$1 388.26
Cafetal rústico	-\$2 306.78	-\$2 162.28	-\$1 691.97	-\$1 636.92	-\$1 993.62	-\$1 705.60	-\$1 778.03

DISCUSIÓN

Los métodos de muestreo del carbono en los bosques/selvas del país se han estandarizado (CONAFORW 2009), así como los métodos de estimación de los almacenes de carbono (IPCC, 2003 y 2006). No obstante, numerosos autores que han evaluado los almacenes de carbono usan métodos diferentes a los estandarizados, tanto para el muestreo como para la estimación del carbono, lo que hace difícil la integración de las estimaciones.

Para el caso de los almacenes de carbono de la biomasa aérea viva, el uso de diferentes modelos alométricos (e.g. Brown *et al.*, 1997 y Rojas-García *et al.*, 2015) produce diferentes valores de los almacenes estimados de carbono. En el caso del carbono orgánico de los suelos, la corrección o no por fragmentos gruesos del suelo (>2 mm) produce resultados diferentes en los valores estimados del carbono (Poeplau *et al.*, 2017).

Una aproximación a la variación (desviación estándar) de los promedios se basa en la relación promedio y desviación estándar de los usos del suelo (Covaleda *et al.*, 2012 y 2019):

Biomasa aérea viva (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = 1.5295 + 0.3503Promedio \quad (1)$$

Biomasa subterránea viva (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = 0.5130 + 0.8163Promedio \quad (2)$$

donde la biomasa subterránea viva se estima de acuerdo a Cairns *et al.* (1997).

Mantillo (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = 0.2459 + 0.4125Promedio \quad (3)$$

Material leñoso muerto (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = -0.3921 + 1.9428Promedio \quad (4)$$

Suelo (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = -42.132 + 0.7959Promedio \quad (5)$$

A pesar del conocimiento de la desviación estándar, no es posible estimar el intervalo de confianza al no contar con los valores del número de muestras en las diferentes estimaciones de los promedios.

Los resultados de los pagos anuales por conservación y no conversión plantean valores mayores a los pagos por servicios ambientales de la CONAFOR, lo que hace que la estrategia sea competitiva, aunque hay casos con pagos menores o nulos (valores positivos). No obstante, los valores estimados pueden usarse como una referencia para los pagos anuales.

Para los pagos de anualidades (periodo de 20 a 30 años), la referencia del pago de la CONAFOR permite analizar su relevancia e impacto en la conservación de los almacenes de carbono.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La valoración de los cambios en los almacenes de carbono asociados a la conservación o cambios de los usos del suelo permite la estimación de los pagos totales o anuales que pueden recibir los productores de acuerdo a sus estrategias de cambios y manejos. La referencia del pago por servicios ambientales de la CONAFOR establece un plano de comparación del impacto de los pagos anuales.

La implementación de la estrategia de conservación de los almacenes de carbono del Banco Mexicano del Carbono puede generar incentivos financieros generalmente mayores a los pagos por servicios ambientales de la CONAFOR, aunque en algunos casos estos son menores o nulos. Los pagos anuales por conservación son competitivos.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

- Aguilar, V. 2007. Servicios ambientales: captura de carbono en sistemas de café bajo sombra Chiapas, México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México 90 p.
- Aguirre Dávila, C. M. 2006. Servicios ambientales: captura de carbono en sistemas de café bajo sombra en Chiapas, México. Tesis de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sustentable. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México 84 p.
- Angelsen, A., C. Martius, V. De Sy, A. E. Duchelle, A. M. Larson and P. T. Thuy (eds.). 2021. REDD+: La Transformación. Lecciones y Nuevas Direcciones. CIFOR. Bogor, Indonesia.
- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A. J. Hruska and C. Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321.
- Ávila Vargas, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica 99 p.
- Bautista-Calderón, E. A., V. M. Ordaz-Chaparro, E. V. Gutiérrez-Castorena, C. Hidalgo-Moreno y E. Valdés-Velarde. 2016. Carbono en sistemas agroforestales de café, bosque mesófilo de montaña y potrero en Huatusco, Veracruz. pp. 454-461. En: F. Paz Pellat y R. Torres Alamilla (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Bolaños-González, M. A., A. Libert-Amico, F. Paz-Pellat, V. Salas-Aguilar, G. Villalobos-Sánchez, E. Escamilla-Prado, A. S. Velázquez-Rodríguez y E. I. Morales-Reyes. 2021. Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas. pp. 633-638. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- Brown, S., P. Schroeder, and R. Birdsey. 1997. Aboveground biomass distribution of US eastern hardwood forests and the use of large trees as an indicator of forest development. *For. Ecol. Manage.* 96: 37-47.
- Cairns, M., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- CEDRSSA. 2019. Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-2024. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Cámara de Diputados - LXIV Legislatura 19 p.
- CONAFOR. 2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo (Re-Muestreo 2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México 140 p.
- CONAFOR. 2017a. Estrategia Nacional para REDD+ (ENAREDD+). Comisión Nacional Forestal. Jalisco 107 p.
- CONAFOR. 2017b. Iniciativa de Reducción de Emisiones (IRE). Comisión Nacional Forestal. Jalisco.
- Covaleda, S., F. Paz y B. de Jong. 2012. Parametrización de modelos de estados y transiciones para el carbono y caracterización de la incertidumbre. pp. 29-34. En: Paz, F., M. Bazán y V. Saynes (eds.). *Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono*. Texcoco, Estado de México, México.
- Covaleda-Ocón, S., F. Paz-Pellat y B. de Jong. 2019. Modelos de estados y transiciones para los almacenes de carbono de las principales regiones de Chiapas, México. *Elementos para Políticas Públicas* 3:183-221.
- Cuevas-Trejo, S., M. López-Velasco, E. Valdés-Velarde, V. Ordaz-Chaparro, J. Ayala-Arreola, L. Krishnamurthy, E. Salcedo-Pérez, J. F. Gallardo-Lancho y J. I. Valdez-Hernández. 2014. Contenido de carbono en sistemas agroforestales de café en tres municipios de la región de "Las Montañas" (Veracruz, México). pp. 71-77. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Texcoco, Estado de México, México.
- Dávalos Sotelo, R., M. I. Rodríguez Morato y E. Martínez Piniillos-Cueto. 2008. Almacenamiento de carbono. pp. 223-233. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehltreter (eds.). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. INECOL e INE-SEMARNAT, México.
- de Jong, B., L. Soto, G. Montoya, K. Nelson, J. Taylor and R. Tipper. 1997. Forestry and agroforestry alternatives for carbon mitigation: an analysis from Chiapas, Mexico. pp. 263-284. *In: W. Adger, D. Pettenella and M. C. Whitby (eds). Climate Change Mitigation and European Land Use Policies*. CAB International. Wallingford, UK
- Delgadillo, M. y S. Quechulpa. 2007. Inventario de Carbono y Caracterización de Tres Sistemas Agroforestales en Localidades de los Municipios Salto de Agua, Chilón y Comitán del Estado de Chiapas, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México 95 p.
- D.O.F. 2021. Reglas de Operación del Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2022. Diario Oficial de la Federación del 28/12/2021.

- Donofrio, S., P. Maguire, K. Myers, C. Daley and K. Lin. 2021. State of the Voluntary Carbon Markets 2021. Ecosystem Market Place Insights Report. Washington, DC. 40 p.
- Escamilla Prado, E. y S. Díaz Cárdenas. 2016. Sistemas de Cultivo de Café en México. Centro Nacional de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café. Huatusco, Veracruz 61 p.
- Espinoza-Domínguez, W., L. Krishnamurthy, A. Vázquez-Alarcón y A. Torres-Rivera. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18:57-70.
- Harvey, C. A., A. A. Pritts, M. J. Zwetsloot, K. Jansen, M. M. Puller, I. Armbrrecht, J. Avelino, J. F. Barrera, C. Bunn, J. Hoyos García, C. Isaza, J. Muñoz-Ucros, C. J. Pérez-Alemán, E. Rahn, V. Robiglio, E. Somarriba and V. Valencia. 2021. Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. Doi:10.1007/s13593-021-00712-0.
- Hernández-Martínez, G. 2008. Clasificación agroecológica pp. 15-34. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (eds.). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. Instituto de Ecología A.C. – INECOL e Instituto Nacional de Ecología – SEMARNAT. México.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Jiménez-Ferrer, G. A. V. Aguilar and L. Soto-Pinto. 2008. Livestock and carbon sequestration in the Lacandon rainforests, Chiapas, Mexico. pp. 195-197. In: P. Rowlinson, M. Steele and A. Nefzaoui (eds.). *Proceedings International Conference Livestock and Global Climate Change 2008*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Libert-Amico, A. 2017. Paisajes bioculturales ante el cambio climático: carbono y agrobiodiversidad en cafetales bajo sombra en Chiapas. pp. 94-99. En: F. Paz, R. Torres y A. Velázquez (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017*. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A. 2018. Resiliencia socio-ecológica ante la crisis del café en la Sierra Madre de Chiapas, México. pp. 149-155. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A. 2020. La clasificación de sistemas agroforestales: las contribuciones del café bajo sombra a la sustentabilidad. pp. 65-71. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020*. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A., C. Ituarte-Lima and T. Elmqvist. 2020. Learning from social-ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science* 15:485-501.
- Libert-Amico, A. y F. Paz-Pellat. 2018. Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*. doi:10.21829/myb.2018.2401914.
- Libert-Amico, A., J. C. Wong-González y F. Paz-Pellat. 2016. Impacto de la roya del cafeto en los almacenes de carbono en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 219-225. En: F. Paz y R. Torres (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Masuhara, A., E. Valdéz, J. Pérez, D. Gutiérrez, J. C. Vázquez, E. Salcedo, M. J. Juárez y A. Merino. 2015. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica de Ciencia y Tecnología* 4:69-93.
- Moguel, P. and V. M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13:11-21.
- Moguel, P. y V. M. Toledo. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* 55:2-7.
- Morales Coutiño, T. A. 2010. Carbono en Sistemas Ganaderos en un Paisaje de Conservación REBIMA Chiapas, México. Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. 61 p.
- Morales-Ruiz, D. E., R. Aryal-Deb, R. Pinto-Ruiz, F. Guevara-Hernández, F. Casanova-Lugo, G. Villanueva-López, J. A. Venegas-Venegas, M. Reyes-Soto y J. C. López-Hernández. 2021. Almacenamiento y tasa de acumulación de carbono en sistemas silvopastoriles en Chiapas, México. pp. 577-582. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- Natzler, B., D. Jameson, R. Gregg, C. Stark, M. Thompson and V. Scott. 2022. Voluntary Carbon Markets and Offsetting. *Climate Change Committee*. Westminster, U.K. 102 p.

- Nelson, K. C. and B. H. J. de Jong. 2003. Making global initiatives local realities: carbon mitigation projects in Chiapas, Mexico. *Global Environmental Change* 13:19-30.
- Nolasco, M. 1985. *Café y sociedad en México*. Centro de Ecodesarrollo. D.F., México 454 p.
- Orihuela-Belmonte, E., B. H. J. de Jong, J. Mendoza-Vega, J. Van der Wal, F. Paz-Pellat, L. Soto-Pinto y A. Flamenco-Sandoval. 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.
- Paz-Pellat, F. 2020. Costo de las políticas públicas asociadas al manejo de la roya en los cafetales bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas pp. 81-86. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020*. Texcoco, Estado de México, México.
- Paz-Pellat, F. 2022a. Iniciativa del banco mexicano del carbono: elementos constitutivos y rasgos principales. *Elementos para Políticas Públicas* 6(1):1-12.
- Paz-Pellat, F. 2022b. Derechos del carbono y servicios ambientales: la doble negación. *Elementos para Políticas Públicas* 6(1):13-20.
- Paz, F., V. Salas, C. Sánchez, A. Libert y M. A. Bolaños. 2022. Caracterización de los almacenes de carbono, estructura y diversidad de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas. *Elementos para Políticas Públicas* 6(2):101-121
- Perfecto, I., M. E. Jiménez-Soto and J. Vandermeer. 2019. Coffee landscapes shaping the Anthropocene, forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology*. doi: 10.1086/703413.
- Perfecto, I., J. Vandermeer, A. Mas and L. Soto Pinto. 2005. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics* 54:435-446.
- Pineda-López, M. R., G. Ortiz-Ceballos y L. R. Sánchez-Velázquez. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio Ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11:3-14.
- Poeplau, C., C. Vos and A. Don. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameter's bulk density and rock fragment content. *Soil* 3:61-66.
- Raj Aryal, D., H. Gómez Castro, N. del Carmen García, O. J. José Ruiz, L. F. Molina Paniagua, J. A. Jiménez Trujillo, J. A. Venegas Venegas, R. Pinto Ruiz, A. Ley de Coss y F. Guevara Hernández. 2018. Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* doi:10.29298/rmcf.v48ii48.184.
- Rikxoort, G. Schroth, P. Läderach and B. Rodríguez-Sánchez. 2014. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agron. Sustain. Dev.* 34:887-897.
- Rojas-García, F., B. H. J. De Jong, P. Martínez-Zurimendi y F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72:835-864.
- Roncal, S. 2006. Almacenamiento de carbono y complejidad de sistemas agroforestales en comunidades indígenas de Chiapas, México. Tesis de Maestría. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas 51 p.
- Roncal-García, L. Soto-Pinto, J. Castellanos-Albores, N. Ramírez-Marcial y B. H. J. de Jong. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia* 33:200-206.
- SAGARPA. 2017. Cierre de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México: SAGARPA. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx>.
- Salas-Aguilar, V. M., F. Paz-Pellat, F. Rojas-García y M. Bolaños. 2018. Almacenes de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros de la Sierra Madre de Chiapas pp. 671-677. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México.
- Salgado Mora, M. G., C. Ruiz-Bello, J. L. Moreno-Martínez, B. Irena-Martínez y J. F. Aguirre-Medina. 2018. Captura de carbono en biomasa aérea de árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco Chiapas, México. *Agro Productividad* 11:120-126.
- Soto-Pinto, L. and C. M. Aguirre-Dávila. 2015. Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science* 7:117-128.
- Soto-Pinto, L., C. M. Aguirre-Dávila y M. J. Anzueto-Martínez. 2015. Almacenes de carbono en cafetales con distintos manejos en el Norte de Chiapas, México. pp. 256-263. En: F. Paz Pellat, J. Wong González y R. Torres Alamilla (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015*. Texcoco, Estado de México, México.
- Soto-Pinto, L., M. Anzuelo, J. Mendoza, G. Jiménez Ferrer and B. de Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest. Syst.* 78:39-51.
- Soto Pinto, L., C. Armijo Florentino y M. Anzueto Martínez. 2013. La Milpa con Árboles Ixim 'Te Taungya, Un Producto Agroforestal. ECOSUR y redISA. San Cristobal de las Casa, Chiapas, México 25 p.
- Soto Pinto, L., B. H. J. de Jong, E. Esquivel Bazán y S. Quechulpa. 2006. Potencial ecológico de captura de carbono en cafetales. pp. 373-380. En: J. Pohlan, L. Soto y Barrera (eds.). *El Cafetal del Futuro, Realidades y Visiones*. Shaker Verlag, Germany.

- Soto-Pinto, L. y G. Jiménez-Ferrer. 2018. Contradicciones socio-ambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosques* doi:10.21829/myb.2018.2401887.
- Soto Pinto, L., G. Jiménez Ferrer y T. Lerner Martínez. 2008. Diseño de Sistemas Agroforestales para la Producción y la Conservación, Experiencia y Tradición en Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de las Casas, Chiapas. 90 p.
- Soto-Pinto, L., G. Jiménez-Ferrer, A. Vargas Guillén. B. de Jong Bergsma y E. Esquivel-Bazán. 2005. Experiencia agroforestal para la captura de carbono en comunidades indígenas de México. *Revista Forestal Iberoamericana* 1:44-49.
- Tinoco-Rueda, J. A., E. Escamilla-Prado y M. Flores-Ordoñez. 2021. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo en cafetales orgánicos del centro de Veracruz, México. pp. 605-608. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021. Texcoco, Estado de México, México.
- Tlaxcala-Méndez, R. M., M. C. Pablo-Mendoza, M. Aquino-Ramírez, O. Santiago-Trinidad y N. López-Vázquez. 2021. Cuantificación del almacén de biomasa y carbono aéreo en un cafetal bajo sombra diversificada. pp. 599-604. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021. Texcoco, Estado de México, México.
- Toledo, V. M. and P. Moguel. 2012. Coffee and sustainability: the multiple values of traditional shaded coffee. *Journal of Sustainable agriculture* 36:353-377.
- UNFCCC. 2005. FCCC/CP/2005/MISC.1. Reducing emissions from deforestation in developing countries: approaches to stimulate action. Proposal from Governments of Papua New Guinea and Costa Rica.
- UNFCCC. 2007. FCCC/CP/2007/6/Add.1. Decision 1/CP.13. Bali Action Plan.
- UNFCCC. 2009. Decision 4/CP.15. Methodological guidance for activities relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries. Conference of the Parties.
- Valdés-Velarde, E., L. Rojas-Pérez, J. C. Vázquez-Rodríguez, V. M. Ordaz-Chaparro, J. Pérez-Nieto, J. C. Vázquez-Rodríguez, M. J. Juárez-Hernández, D. Gutiérrez del Pozo y A. Merino. 2014. Estudio del carbono en sistemas agroforestales de una región cafetalera de Veracruz. pp. 55-61. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Texcoco, Estado de México, México.
- Valdés-Velarde, E., Vázquez-Rodríguez, V. M. Ordaz-Chaparro, J. Pérez-Nieto, J. Ayala-Arreola, J. F. Gallardo-Lancho, E. Salcedo-Pérez y L. Krishnamurthy. 2014. Carbono capturado en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) en Chocomán (Veracruz, México). pp. 62-69. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México.
- Vargas Guillén, A., C. Tapia Velázquez, J. M. Trujillo Sánchez, J. C. de la Cruz Osorio, L. A. Mendoza Velázquez, M. Delgadillo Ramírez, M. A. Hernández Vázquez, S. Fournier and S. Quechulpa Montalvo. 2012. Fortalecimiento y Expansión de Proyectos de Captura de Carbono Forestal en Comunidades Cafetaleras de la Sierra Madre de Chiapas. AMBIO-Conservación Internacional México-CONANP. Chiapas, México 55 p.
- Velázquez-Rodríguez, A. S. y F. Paz-Pellat. 2020. Fertilidad de los suelos cafetaleros bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas, México. pp. 469-475. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Texcoco, Estado de México, México.
- Villanueva-López, G., P. Martínez-Zurimendi, F. Casanova-Lugo, L. Ramírez-Avilés y P. I. Montañez-Escalante. 2015. Almacenamiento de carbono en sistemas ganaderos con cercas vivas de *Gliricidia sepium* en Tacotalpa, Tabasco, México. pp. 248-255. En: F. Paz Pellat, J. Wong González y R. Torres Alamilla (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Texcoco, Estado de México, México.
- Williams-Guillén and S. Otterstrom. 2014. Market-based incentives for the conservation of ecosystem services in agricultural landscapes: examples from coffee cultivation in Latin America. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Volume 4, pp.172-185.



PMC
Programa Mexicano del Carbono