
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.

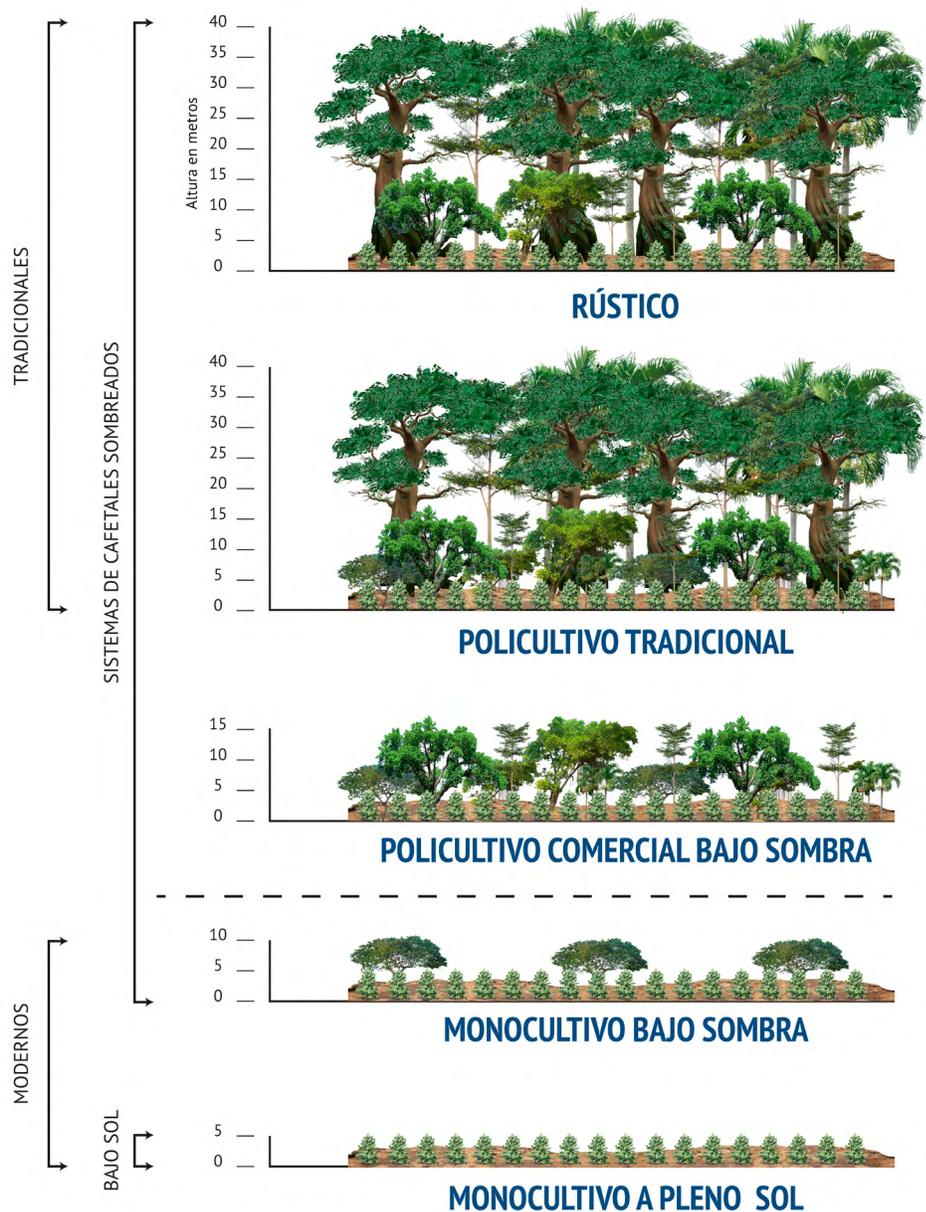


Figura 1. Tipología de cafetales bajo sombra. Adaptado de Moguel y Toledo (1999).

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).

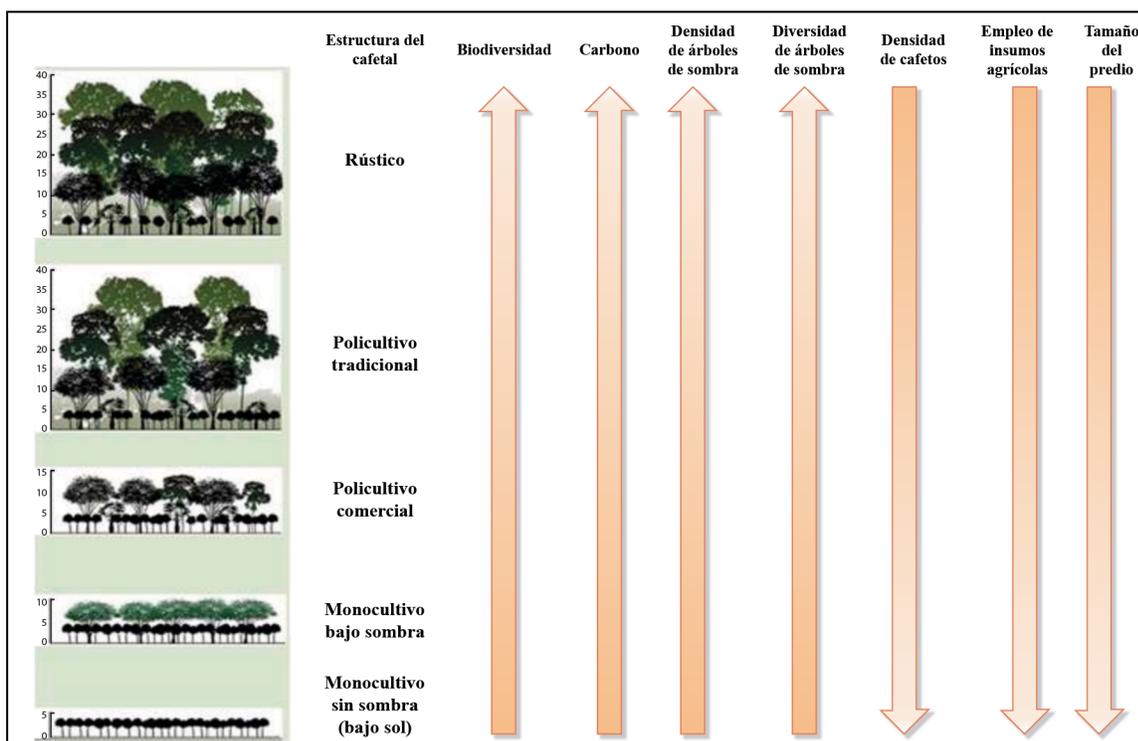


Figura 2. Patrones de las tendencias de algunos atributos de los tipos de cafetales. Fuente: Libert-Amico, 2020.

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; Tschardtke *et al.*, 2011; Goodall *et al.*, 2014, García Mayoral *et al.*, 2015). Los servicios ecosistémicos de la sombra también se analizaron (Tschardtke *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.

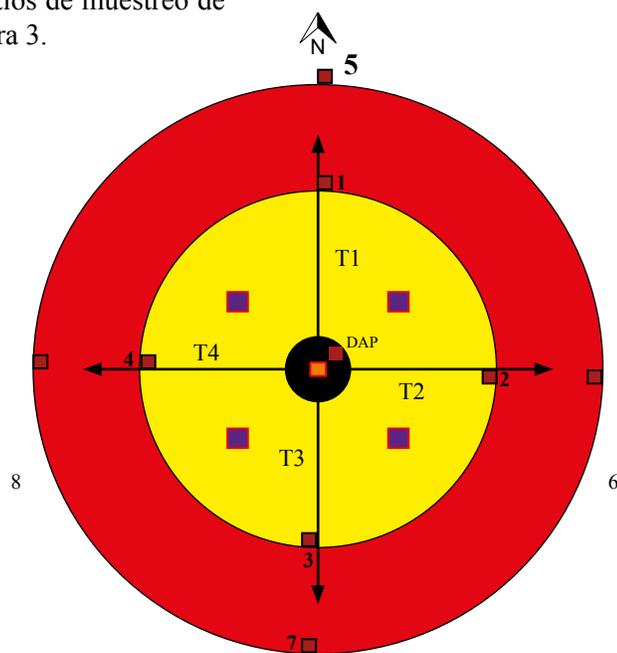


Figura 3. Arreglo geométrico de los sitios de muestreo de la vegetación.

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.

Círculo	Color	○	●	●
	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.
Cuadro	Color	■	■	■
	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
Transecto	Símbolo	T1		
	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).

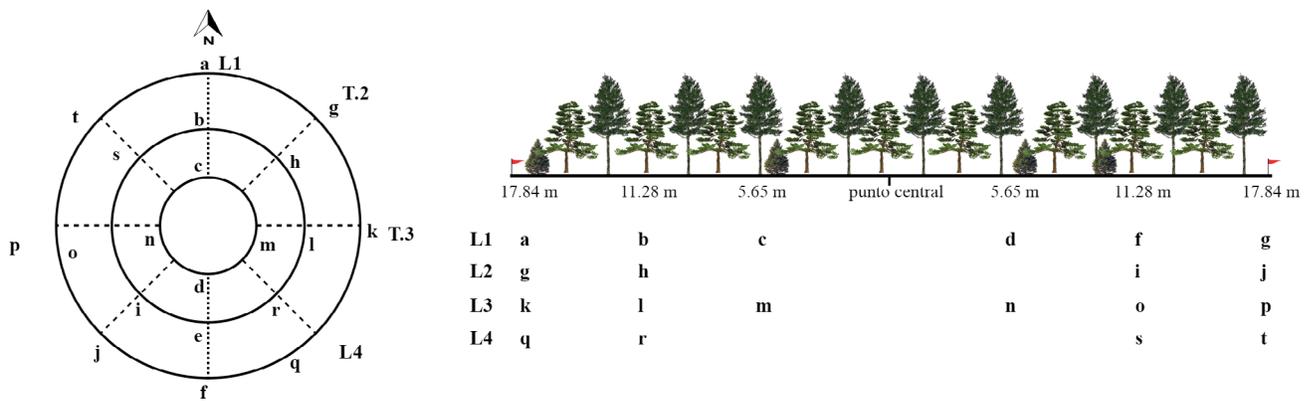


Figura 4. Ubicación de los puntos para la toma de fotografías dentro del sitio de muestreo. Fuente: Salas-Aguilar *et al.* (2017).

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.

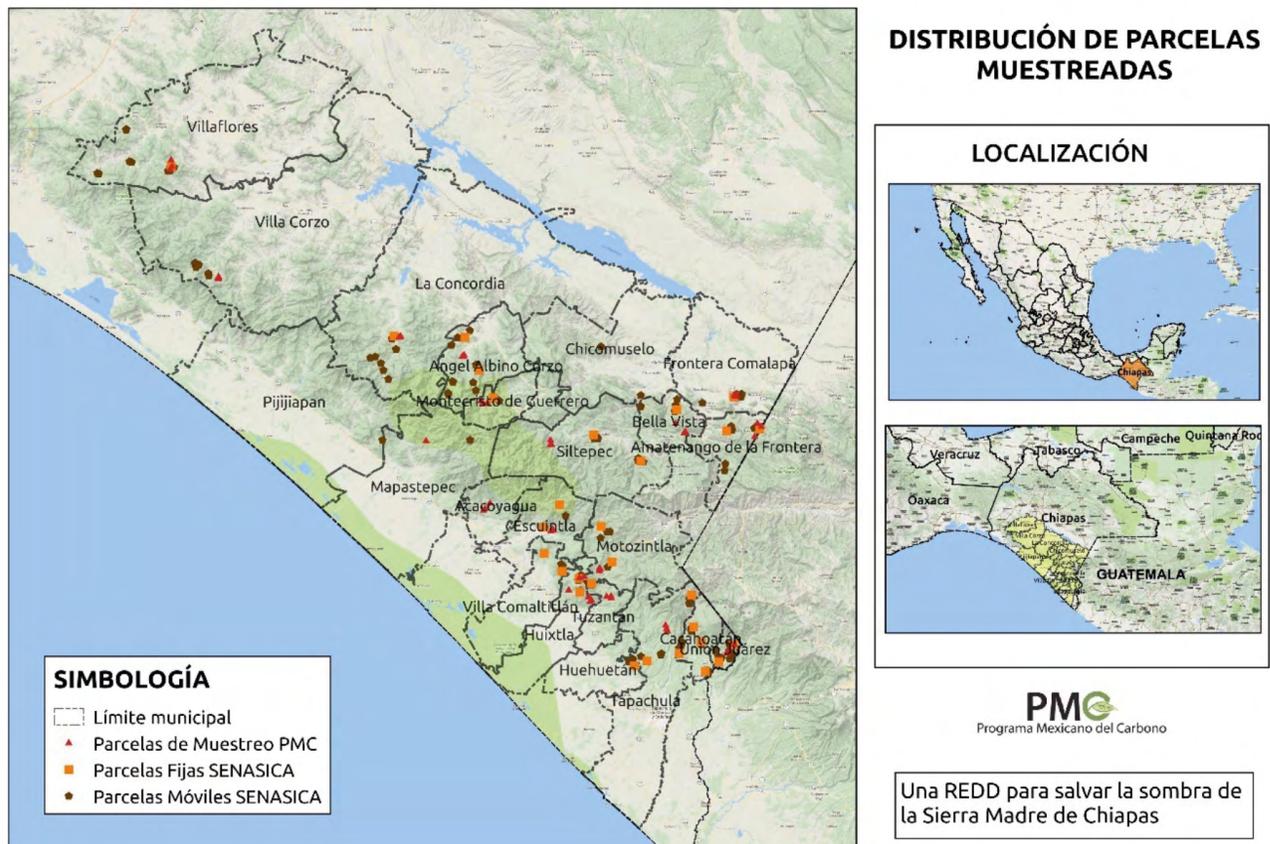


Figura 5. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

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 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.
- 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. Epífitas vasculares: bromelias y orquídeas. pp. 69-82. 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.
- 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. Mehltreter (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-Urbe, 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-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.
- 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.

