
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.

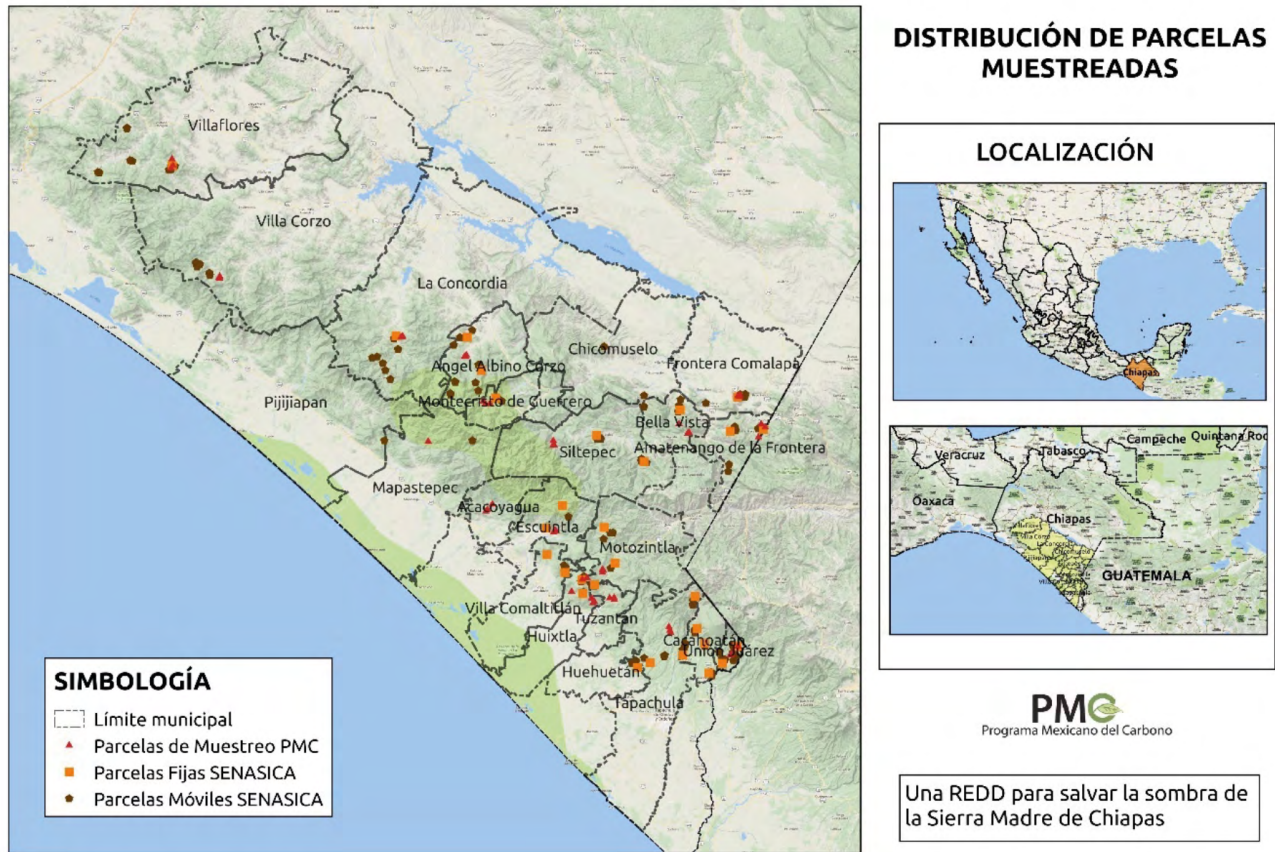


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

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.

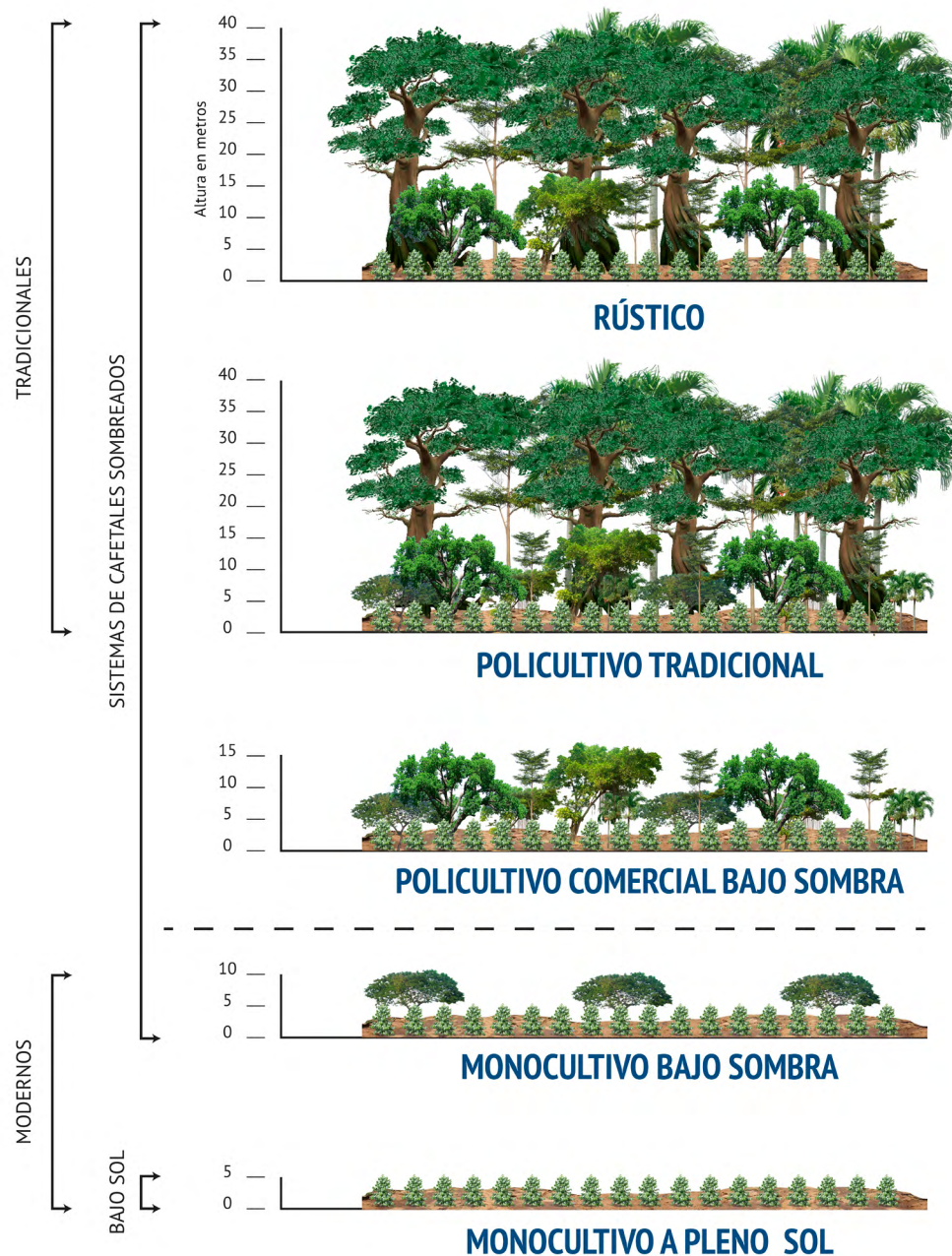


Figura 2. Tipología de cafetales bajo sombra. Adaptado de Moguel y Toledo (1999).

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
		<i>ad</i>	Adventicia (e.g. contrafuertes)
Tipo de raíz	<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.

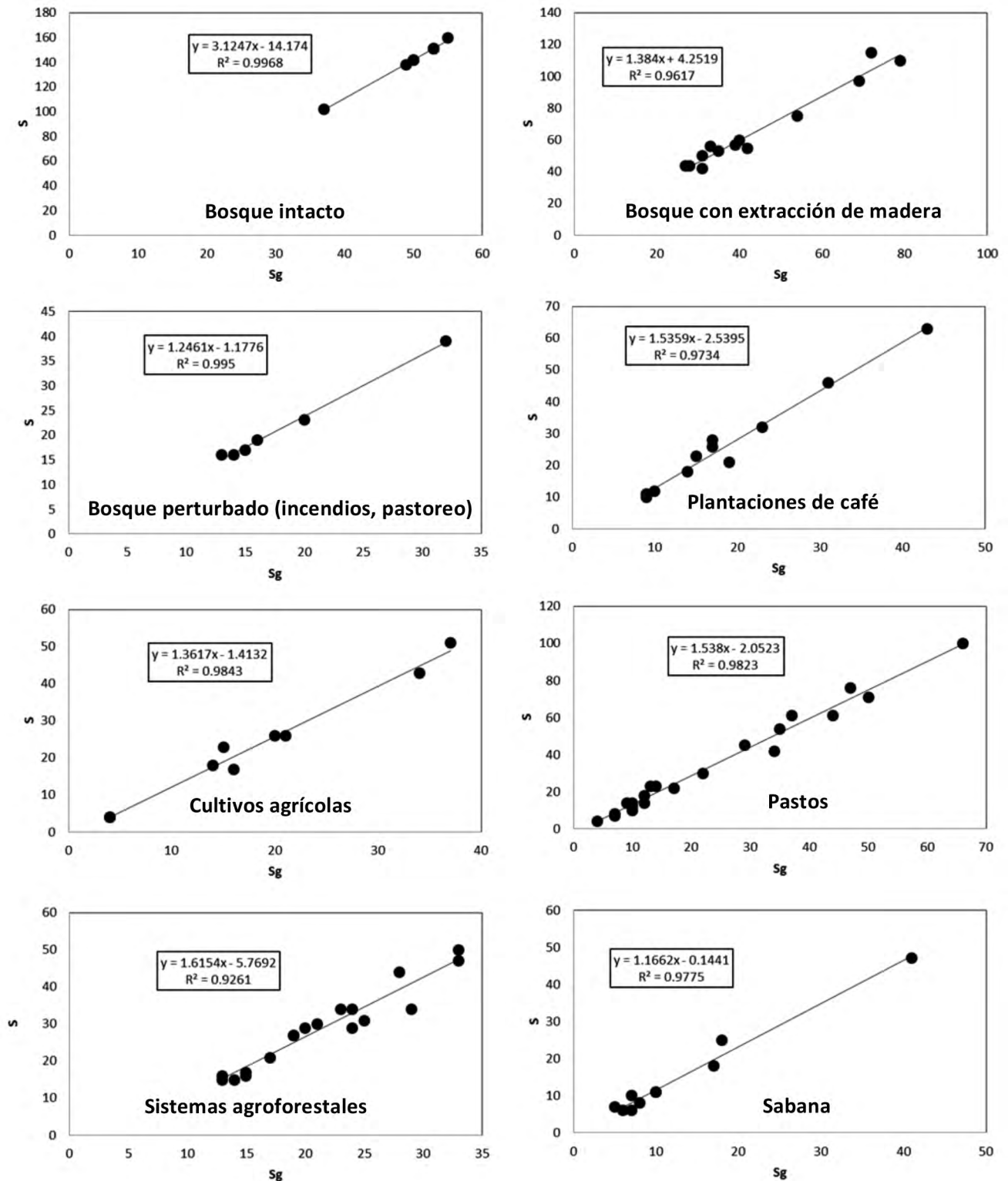


Figura 3. Relación S-Sg para diferentes usos del suelo. Fuente: Paz-Pellat *et al.* (2022).

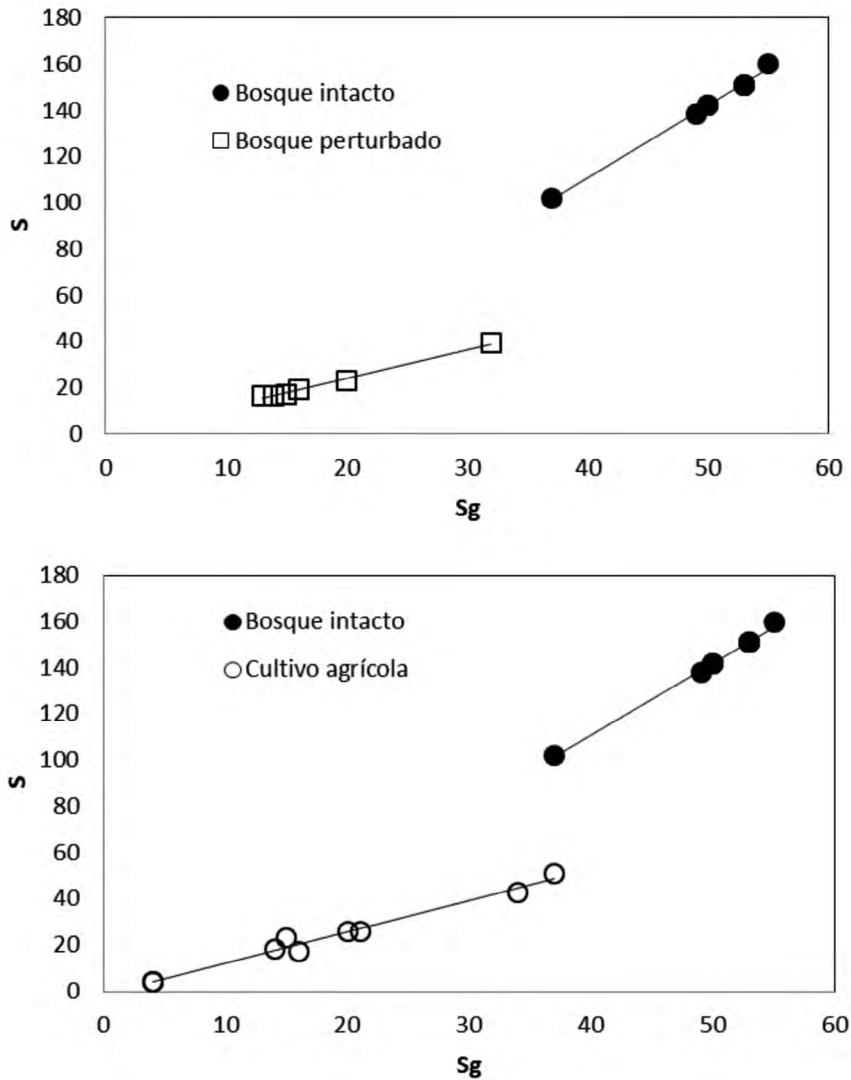


Figura 4. Relación S-Sg para vegetación natural y perturbada. Fuente: Paz-Pellat *et al.* (2022).

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.

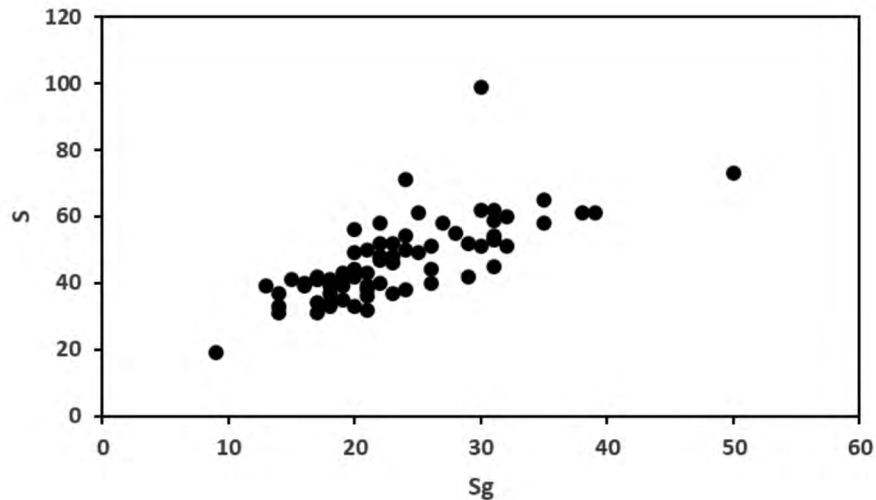


Figura 5. Distribución de los puntos Sg-S de todos los sitios de muestreo.

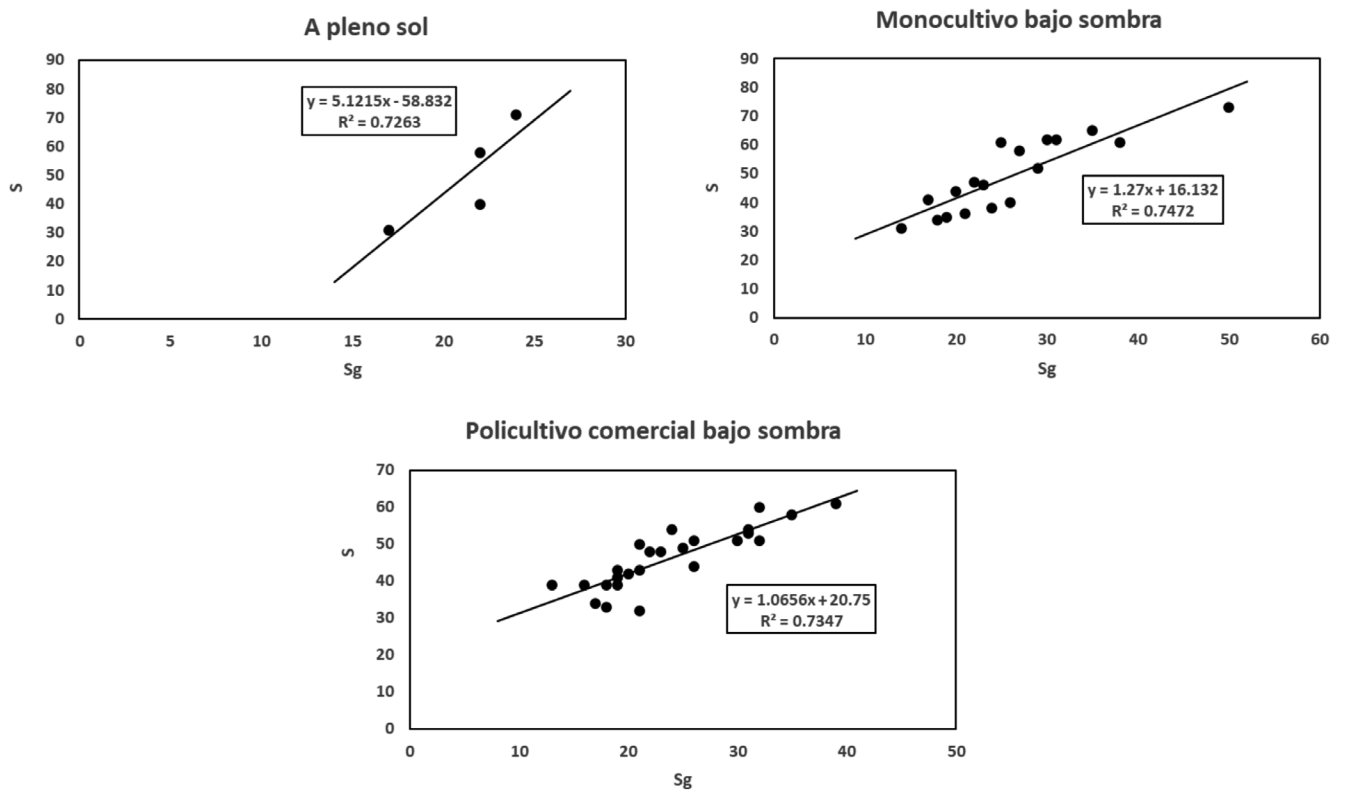


Figura 6. Ajustes de relaciones lineales para Sg-S para cafetales a pleno sol, monocultivos bajo sombra y policultivos comerciales bajo sombra.

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.

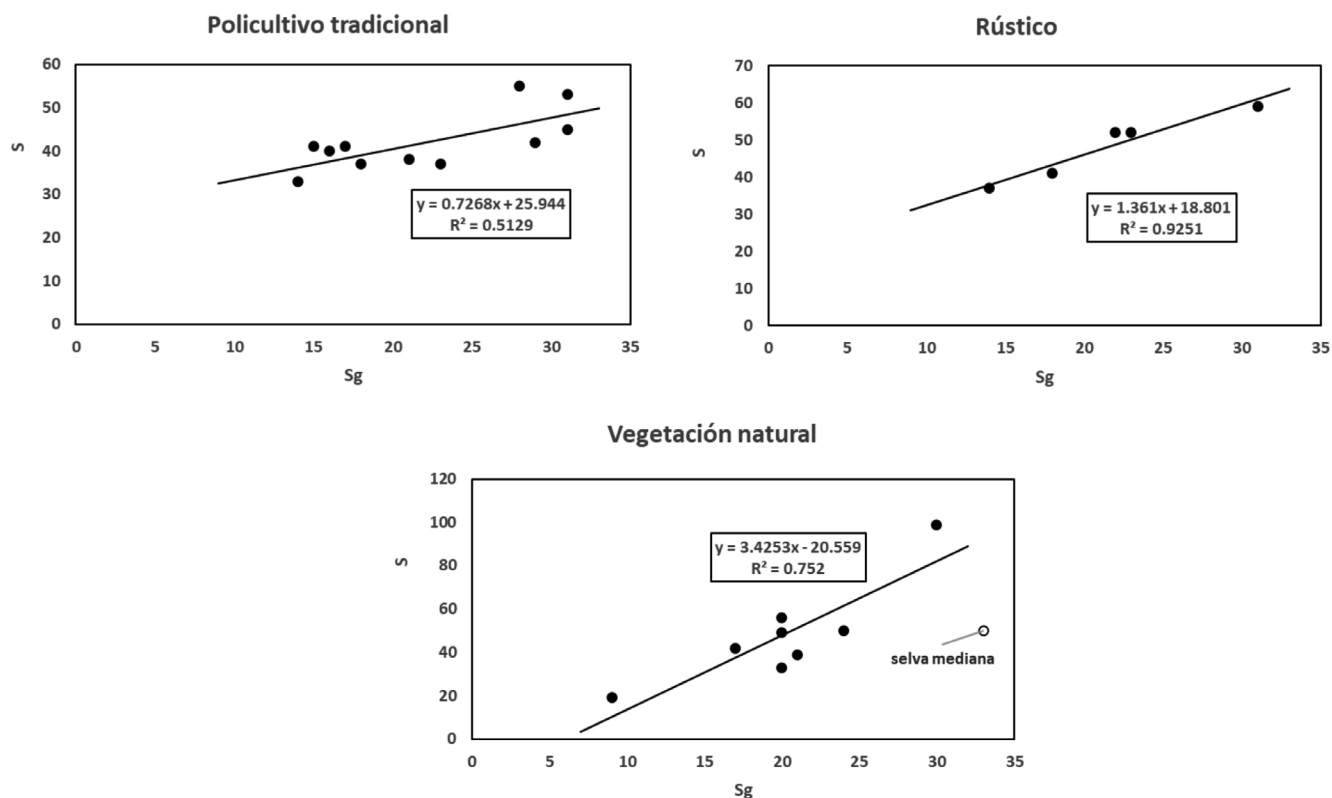


Figura 7. Ajustes de relaciones lineales para Sg-S para cafetales de policultivos tradicionales y rústicos, además de la vegetación natural.

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

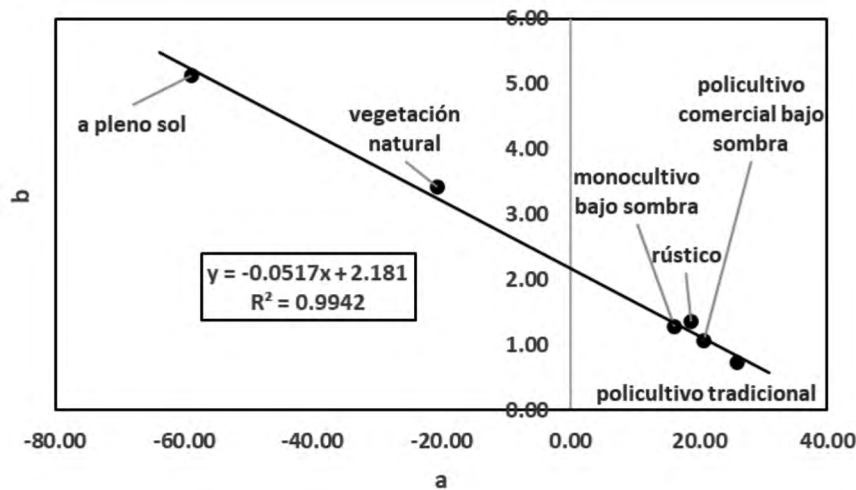


Figura 8. Relación lineal entre los parámetros a y b de las líneas entre Sg y S de los cafetales y vegetación natural.

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: 10.1086/703413.
- 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*.

