

Huella de agua y biodiversidad de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en Sierra Madre de Chiapas, México

Water and biodiversity footprint of coffee plantations under shade and natural vegetation in Sierra Madre de Chiapas, Mexico

Fernando Paz¹

¹Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México
Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

La cafecultura es una actividad importante en el sur-sureste de México, particularmente en Chiapas, donde la Sierra Madre es un área productora de café, principalmente bajo sombra y orgánico. La presentación de la roya del cafeto en 2012, afectó la producción de la cafecultura, promoviendo la degradación forestal (reducción de la sombra) y la deforestación (cambio de cafetales a milpas y potreros, principalmente). La determinación de la huella del carbono es una tarea crítica para los mercados del carbono asociados a mecanismos tipo REDD+. Los servicios hidrológicos y la biodiversidad de la huella de los cambios de uso del suelo de los cafetales bajo sombra complementan las estimaciones de carbono. A partir de una campaña de muestreo realizada en 2016, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la estimación de servicios hidrológicos (escurrimientos superficiales, evapotranspiración actual y recarga de agua subterránea, además de la erosión hídrica) ganados, o pérdidas evitadas, de estos servicios ambientales, estimados a través de la componente hidrológica del modelo MEJICO, más el uso de un balance hídrico. La huella directa y la huella diferencial son estimados para los distintos usos del suelo y sus cambios.

Palabras clave: modelo MEJICO, balance hídrico, escurrimiento superficial, recarga subterránea, erosión del suelo, riqueza de especies, huella directa y diferencial

ABSTRACT

Coffee growing is an important activity in the south-southeast of Mexico, particularly in Chiapas, where the Sierra Madre is a coffee-producing area, mainly shaded and organic coffee. The

appearance of coffee rust in 2012 affected coffee production, promoting forest degradation (reduction of shade) and deforestation (change from coffee plantations to cornfields and pastures, mainly). Determining the carbon footprint is a critical task for carbon markets associated with REDD+ type mechanisms. The hydrological services and biodiversity footprint of land use changes in shaded coffee plantations complement the carbon estimates. Based on a sampling campaign carried out in 2016, this work presents the results obtained in the estimation of hydrological services (surface runoff, current evapotranspiration and groundwater recharge, in addition to water erosion) gained, or losses avoided, of these environmental services, estimated through the hydrological component of the MEJICO model, plus the use of a water balance. The direct footprint and the differential footprint are estimated for the different land uses and their changes.

Key Words: MEXICO model, water balance, surface runoff, underground recharge, soil erosion, species richness, direct and differential footprint

INTRODUCCIÓN

La producción de café se realiza en 15 estados de México, con Chiapas siendo el principal productor a nivel nacional (CEDRSSA, 2019), con alto impacto en la provisión de servicios ecosistémicos (servicios ambientales hidrológicos, captura de carbono, etc.) y biodiversidad. La Sierra Madre de Chiapas representa el 54% de la superficie sembrada con café en el estado (CEDRSSA, 2019) y ha sido fuente preferencial de productos de calidad derivados de la variedad *C. arabica* comercializados en nichos de café gourmet del mercado internacional. el cultivo del café es una de las principales actividades de los pobladores en las ANP.

Las plantaciones de café de del sureste mexicano se caracterizan por tener cafetos viejos, prácticas de manejo marginales y baja producción, por lo que son altamente

vulnerables ante los embates de plagas y enfermedades, particularmente bajo el contexto del cambio climático. La crisis de la roya del cafeto (hongo *Hemileia vastatrix*) (Avelino *et al.*, 2015; Libert-Amico *et al.*, 2016), a partir del 2012, ha incidido en pérdidas de la producción de café en México, principalmente en la región sureste, principalmente con cafetales bajo sombra y manejo orgánico. Ante los impactos de la roya del cafeto, y bajos precios del café, los productores han degradado las plantaciones (reducción de la sombra) y deforestado sus predios para cambiar las plantaciones de café a milpas y potreros (Harvey *et al.*, 2021). Esta situación ha provocado una pérdida de los servicios ecosistémicos, los cuales requieren de su evaluación.

Los procesos de perturbación de cafetales son caracterizados por los impactos producidos durante su ciclo de vida del café. La evaluación de la huella de carbono (emisiones de gases efecto invernadero) en la producción y proceso de café (Tchibo, 2008; Killian *et al.*, 2013), incluyendo los diferentes tipos de preparación del café (Cibelli *et al.*, 2021), “de la mata a la taza”, es una práctica orientada al impulso de las acciones de mitigación nacionalmente apropiadas y los mercados del carbono. Adicionalmente al carbono, deben realizarse evaluaciones de la huella de agua y biodiversidad para tener información más completa, para su posible uso en los mercados de carbono tipo “premium”. Los análisis deben ser realizados para actividades de degradación forestal y deforestación.

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

resultados de la evaluación de servicios hidrológicos de cafetales bajo sombra de Chiapas, donde sus resultados obtenidos fueron reevaluados en este trabajo.

Para la evaluación de la biodiversidad se han usado diferentes métricas en comunidades vegetales, donde la riqueza (número) de plantas vasculares (S) es de los indicadores más utilizados (NRC, 2000; Croezem *et al.*, 2011). La utilización de plantas vasculares facilita su medición e interpretación, además de estar relacionada con otros grupos biológicos (Gao *et al.*, 2015) que facilitan los análisis.

Este trabajo fue realizado dentro del proyecto financiado por CONACYT “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” (Bolaños *et al.*, 2021).

MATERIALES Y METODOS

Campaña de muestreo en Sierra Madre de Chiapas

La campaña de muestreo de los cafetales y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas se realizó durante la campaña de muestreo del Programa Mexicano del Carbono (PMC) del 2016. Inicialmente se propusieron 82 sitios de muestreo (PMC), de los cuales 29 sitios fueron 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.

La campaña de muestreo de almacenes de carbono, cobertura aérea y diversidad vegetal del PMC estuvo orientada a caracterizar los cafetales y vegetación natural, así como otros usos del suelo. Después de revisar la consistencia de los 82 sitios de muestreos, se seleccionaron 72 sitios para su análisis, el resto no se incluyó.

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

Modelación hidrológica

El modelo MEJICO (Paz, 2022) tiene una componente de modelación hidrológica que define las relaciones para obtener el coeficiente de escurrimiento (Q/P) y la erosión del suelo (E).

El modelo para (Q/P) está definido por:

$$\frac{Q}{P} = (FCPF)(FP)(FG) \quad (1)$$

FCPF es un factor que se define en función de la CPF (cobertura proyectiva foliar). El factor de pendiente (FP) de la relación se estima en función de la pendiente del terreno

(Paz, 2022) y el factor de geoforma (FG) en función de las geoformas del terreno (Paz, 2022). En este caso se usó $FG = 1$, geoforma lineal uniforme.

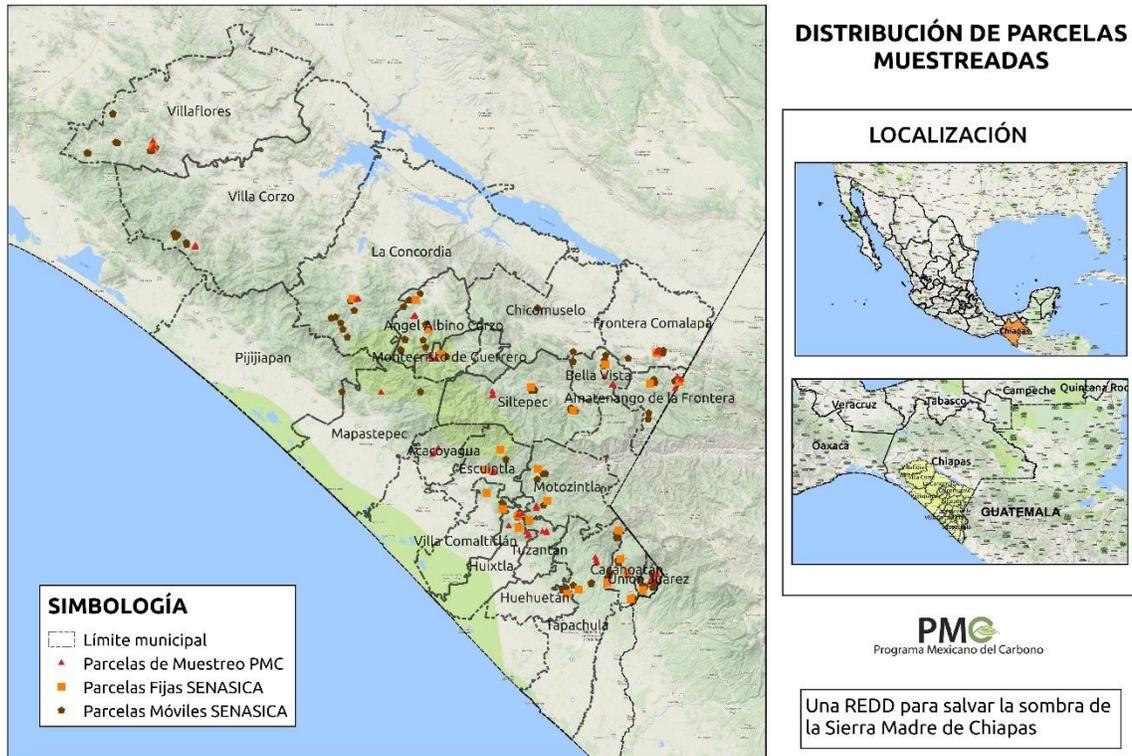


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

Para la relación del coeficiente de escurrimiento con la erosión ($t\ ha^{-1}$), se utilizó la relación de Maetens *et al.* (2012) adaptada:

$$E = 251.9 \left(\frac{Q}{P} \right)^{1.626} \quad (2)$$

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

$$R_s = P - ET_a - \left(\frac{Q}{P} \right) P \quad (3)$$

donde si $R_s < 0$, entonces $R_s = 0$. ET_a es la evapotranspiración actual (Allen *et al.*, 1998), la cual puede ser estimada de la evapotranspiración potencial (ET_0) (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_a = K_c ET_0 \quad (4)$$

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

Análisis hidrológicos realizados

Paz *et al.* (2022a) muestra la aplicación del modelo MEJICO y balance hídrico a cada uno de los sitios de muestreo en la Sierra Madre de Chiapas, donde para la precipitación anual (P) y evapotranspiración potencial anual (ET_0), los valores fueron extraídos de la base de datos mensual TerraClimate (Abatzoglou *et al.*, 2018) para el periodo 2011-2021. La evapotranspiración potencial se calculó usando el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). Los valores de P y ET_0 de todos los sitios de muestreo fueron utilizados para definir valores promedio generales ($P = 2,777.84$ mm y $ET_0 = 1,566.18$ mm), para ser usados en los análisis bajo condiciones meteorológicas medias en la Sierra Madre de Chiapas.

En el Cuadro 1 se muestran las características promedio de todos los sitios de muestreo analizados, para ser usados en la modelación bajo condiciones medias de los cafetales de la Sierra Madre de Chiapas.

Cuadro 1. Características promedio usadas de los suelos

| Uso del suelo | S (%) | M.O. (%) | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) |
|------------------------------------|-------|----------|-----------|----------|-------------|
| Cafetal A pleno sol | 31.0 | 6.3 | 43.0 | 27.3 | 29.7 |
| Cafetal Monocultivo | 27.2 | 5.9 | 36.7 | 29.5 | 33.8 |
| Cafetal Policultivo comercial | 26.0 | 5.7 | 37.3 | 31.2 | 31.5 |
| Cultivo Policultivo tradicional | 32.5 | 6.4 | 46.7 | 25.5 | 27.7 |
| Cafetal Rústico | 30.4 | 5.1 | 44.0 | 29.0 | 27.0 |
| Vegetación natural (bosque/selvas) | 27.5 | 6.0 | 42.8 | 30.4 | 26.9 |
| Agricultura de temporal | 8.0 | 1.6 | 78.0 | 11.0 | 11.0 |

El número de muestreos realizados en Sierra Madre de Chiapas por tipo de uso

del suelo esta mostrado en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Número de muestreos por uso del suelo

| Uso del suelo | No. |
|---|-----|
| Cafetal A pleno sol | 4 |
| Cafetal Monocultivo bajo sombra | 18 |
| Cafetal Policultivo comercial bajo sombra | 25 |
| Cafetal Policultivo tradicional | 11 |
| Cafetal Rústico | 5 |
| Bosque mesófilo | 3 |
| Selva mediana | 2 |
| Bosque de encino-pino | 3 |
| Agricultura de temporal | 1 |

Riqueza de plantas vasculares

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

Se registraron todas las especies de plantas vasculares presentes en cada sitio de muestreo, de acuerdo con el formato de campo. Se tomó registro fotográfico de todos los taxa y sólo se colectaron aquellos en floración o fructificación mediante los métodos

estándar (Chiang y Lot, 1986) y la identificación taxonómica de gabinete se llevó a cabo con ayuda de literatura especializada.

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

RESULTADOS

La evaluación de los servicios hidrológicos bajo condiciones medias de los cafetales y otros usos del suelo de la Sierra Madre de Chiapas esta mostrada en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Servicios hidrológicos evaluados en Sierra Madre de Chiapas.

| Uso del suelo | Q | ETa | Rs | E |
|-----------------------------------|--|--|--|--------------------------|
| | (m ³ /1000 m ²) | (m ³ /1000 m ²) | (m ³ /1000 m ²) | (t/1000 m ²) |
| Cafetal A pleno sol | 38.02 | 107.67 | 54.85 | 2.17 |
| Cafetal Monocultivo | 15.40 | 90.00 | 61.79 | 0.49 |
| Cafetal Policultivo comercial | 15.44 | 89.92 | 60.41 | 0.49 |
| Cultivo Policultivo tradicional | 12.22 | 96.00 | 59.29 | 0.34 |
| Cafetal Rústico | 12.16 | 96.10 | 62.59 | 0.33 |
| Vegetación natural (bosque/selva) | 10.31 | 99.59 | 63.45 | 0.26 |
| Agricultura de temporal | 40.19 | 80.27 | 53.16 | 2.42 |

En el caso de la riqueza de especies de plantas vasculares, el Cuadro 4 muestra los resultados promedio obtenidos de los muestreos realizados en Sierra Madre de Chiapas (Paz *et al.*, 2022b), El área de muestreo de la riqueza de especies es de 1000 m².

Cuadro 4. Riqueza promedio de especies por forma de vida de plantas

| Uso del suelo | Promedio especies arbóreas | Promedio especies arbustivas | Promedio especies herbáceas | Promedio especies lianoides y epifitas |
|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|
| Cafetal A pleno sol | 8.3 | 9 | 19 | 8.8 |
| Cafetal Monocultivo | 11.4 | 8.6 | 14.6 | 10.4 |
| Cafetal Policultivo comercial | 10.6 | 7.1 | 15.5 | 9.7 |
| Cafetal Policultivo tradicional | 10.4 | 7 | 13.5 | 8 |
| Cafetal Rústico | 11.4 | 7.2 | 13.2 | 11.6 |
| Vegetación natural (bosque/selva) | 11.3 | 4.9 | 7.3 | 7.8 |
| Bosque mesófilo | 22.7 | 7 | 8.7 | 17.7 |
| Selva mediana | 18 | 6 | 6.5 | 8 |
| Bosque de encino-pino | 11 | 6.7 | 10.3 | 8.3 |
| Agricultura de temporal | 5 | 2 | 5 | 7 |

HUELLA DE AGUA Y BIODIVERSIDAD

Para estimar la huella de agua y biodiversidad producto de cambios de uso del suelo es necesario restar los valores del uso del suelo nuevo con relación al uso del suelo base, en nuestro caso sería la Agricultura de temporal.

El mecanismo REDD+ (reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal evitada más la conservación e incremento de los almacenes de carbono y el manejo forestal sustentable) ha sido enfatizado como una estrategia para evitar emisiones de gases efecto invernadero (GEI), aunque su implementación no ha resultado lo exitosa que se esperaba (Angelsen *et al.*, 2021). En la perspectiva de REDD+, en el

Cuadro 5 se muestra la huella de agua (diferencial) para el caso de los escurrimientos superficiales, donde el signo negativo implica escurrimientos evitados en el cambio de uso.

Cuadro 5. Huella diferencial para Q.

| Uso del suelo | dQ |
|--------------------------------------|--|
| | (m ³ /1000 m ²) |
| Cafetal A pleno sol | -2.17 |
| Cafetal Monocultivo | -24.80 |
| Cafetal Policultivo comercial | -24.75 |
| Cultivo Policultivo tradicional | -27.98 |
| Cafetal Rústico | -28.03 |
| Vegetación natural (bosque/selva) | -29.88 |

Para el caso de la recarga de agua subterránea (Rs), el Cuadro 6 muestra la huella diferencial, donde los valores positivos muestran las ganancias obtenidas en el uso del suelo.

Cuadro 6. Huella diferencial para Rs.

| Uso del suelo | dRs |
|--------------------------------------|--|
| | (m ³ /1000 m ²) |
| Cafetal A pleno sol | 1.69 |
| Cafetal Monocultivo | 8.63 |
| Cafetal Policultivo comercial | 7.25 |
| Cultivo Policultivo tradicional | 6.14 |
| Cafetal Rústico | 9.43 |
| Vegetación natural (bosque/selva) | 10.30 |

Finalmente, para la erosión hídrica del suelo, el Cuadro 7 muestra las pérdidas evitadas de E.

Cuadro 7. Huella diferencial para E.

| Uso del suelo | dE |
|-------------------------------|--------------------------|
| | (t/1000 m ²) |
| Cafetal A pleno sol | -0.25 |
| Cafetal Monocultivo | -1.93 |
| Cafetal Policultivo comercial | -1.93 |

| | |
|----------------------------------|-------|
| Cultivo Policultivo tradicional | -2.08 |
| Cafetal Rústico | -2.09 |
| Vegetación natural(bosque/selva) | -2.16 |

Para el caso de la riqueza de especies, el Cuadro 8 muestra la huella diferencial para el caso de las especies herbáceas, donde se muestra la ganancia en riqueza de especies para los cambios de uso del suelo.

Cuadro 8. Huella diferencial para S de herbáceas.

| Uso del suelo | dS herbáceas (m ³ /1000 m ²) |
|-----------------------------------|--|
| Cafetal A pleno sol | 14 |
| Cafetal Monocultivo | 9.6 |
| Cafetal Policultivo comercial | 10.5 |
| Cultivo Policultivo tradicional | 8.5 |
| Cafetal Rústico | 8.2 |
| Vegetación natural (bosque/selva) | 2.3 |

En el Cuadro 9 se muestran las ganancias de especies arbustivas para los cambios de uso del suelo.

Cuadro 9. Huella diferencial para S de arbustivas.

| Uso del suelo | dS arbustivas (m ³ /1000 m ²) |
|-----------------------------------|---|
| Cafetal A pleno sol | 7 |
| Cafetal Monocultivo | 6.6 |
| Cafetal Policultivo comercial | 5.1 |
| Cultivo Policultivo tradicional | 5 |
| Cafetal Rústico | 5.2 |
| Vegetación natural (bosque/selva) | 2.9 |

Finalmente, en el Cuadro 10 se muestran las ganancias de especies arbóreas para los cambios de uso del suelo.

Cuadro 10. Huella diferencial para S de arbóreas.

| Uso del suelo | dS arbóreas (m³/1000 m²) |
|--------------------------------------|---|
| Cafetal A pleno sol | 3.3 |
| Cafetal Monocultivo | 6.4 |
| Cafetal Policultivo comercial | 5.6 |
| Cultivo Policultivo tradicional | 5.4 |
| Cafetal Rústico | 6.4 |
| Vegetación natural (bosque/selva) | 6.3 |

CONCLUSIONES

La utilización de la componente hidrológica del modelo MEJICO (Paz, 2022) permite la estimación del escurrimiento superficial y recarga subterránea, así como la erosión hídrica del suelo, usando un balance hídrico (Paz y Beltrán, 2014) para los distintos usos del suelo (huella directa), así como la huella diferencial de los cambios de uso del suelo.

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

Las huellas de la riqueza de especies, directa y diferencial, fue estimada de los promedios obtenidos en muestreos en parcelas circulares de 1000 m².

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de humanidades Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo

mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

- Abatzoglou, J.T., S.Z. Dobrowski, S.A. Parks and K.C. Hegewisch. 2018. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data* 5:170191 doi:10.1038/sdata.2017.191
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO. Rome 300 p
- Angelsen, A., C. Martius, V. De Sy, A. E. Duchelle, A. M. Larson and P. T. Thuy (eds.). 2021. *REDD+: La Transformación. Lecciones y Nuevas Direcciones*. CIFOR. Bogor, Indonesia
- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A.J. Hruska and C. Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321
- Bolaños-González, M.A., A. Libert-Amico, F. Paz-Pellat, V. Salas-Agular, 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.
- Chiang, F. y A. Lot (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.
- Cibelli, M., A. Cimini and M. Moresi. 2021. Carbon footprint of different coffee brewing methods. *Chemical Engineering Transactions* 87:373-378
- 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
- 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>
- Harvey, C.A., A.A. Pritts, M.J. Zwetsloot, K. Jansen, M.M. Pulleman, 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
- Killian, B., L. Rivera, M. Soto and D. Navichoe. 2013. Carbon footprint across the coffee supply chain: the case of Costa Rican coffee. *Journal of Agricultural Science and Technology B* 3:151-170
- 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.
- Maetens, W., M. Vanmaercke., J. Poesen., B. Jankauskas., G. Jankauskiene and I. Ionita. 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: a meta-analysis of plot data. *Progress in Physical Geography* 36:599-653.
- Missouri Botanical Garden. 2018. Herbario virtual del Jardín Botánico de Missouri. Disponible en: <http://www.tropicos.org> (Accesado en septiembre de 2018).
- Moguel, P. and V.M. Toledo. 1999, Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13:11-21
- NRC. 2000. Ecological indicators for the National Committee to Evaluate Indicators for Monitoring Aquatic and Terrestrial Environments, Board on Environmental Studies and Toxicology, Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C. 180 p.
- Paz, F. 2022. Modelo de estados y transiciones jerárquicos integrados y multiescalares del carbono y otros componentes (MEJICO). *Elementos para Políticas Públicas* 6: 69-99
- Paz, F. y A. Beltrán. 2014. Evaluación de los servicios ambientales hidrológicos de predios apoyados por PROBOSQUE en el Estado de México y su asociación al carbono forestal. pp. 492-500. *En*: Paz, F. y J. Wong (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.

Paz, F., V. Salas y M. A. Bolaños. 2022a. Servicios hidrológicos de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, México. Elementos para Políticas Públicas 6: 139-149

Paz, F., V. Salas, C. Sánchez, A. Libert y M.A. Bolaños. 2022b. Caracterización de los almacenes de carbono, estructura y diversidad de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, México. Elementos para Políticas Públicas 6: 101-121

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

Tchibo. 2008. Case study Tchibo privat kaffee rarity machare. PCF Pilot Project Geemany. Öko-Indtitut e. V, Berlín 60 p.