

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

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

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

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

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

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

‡ Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

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

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

ABSTRACT

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

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

INTRODUCCIÓN

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

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

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

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

MATERIALES Y MÉTODOS

Campaña de muestreo en Sierra Madre de Chiapas

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

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

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

Tipología de cafetales bajo sombra

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

Cubierta forestal

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

Las imágenes se tomaron con una cámara Canon Eos Rebel T5 configurada con la máxima resolución espacial (17 915 904 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 2).

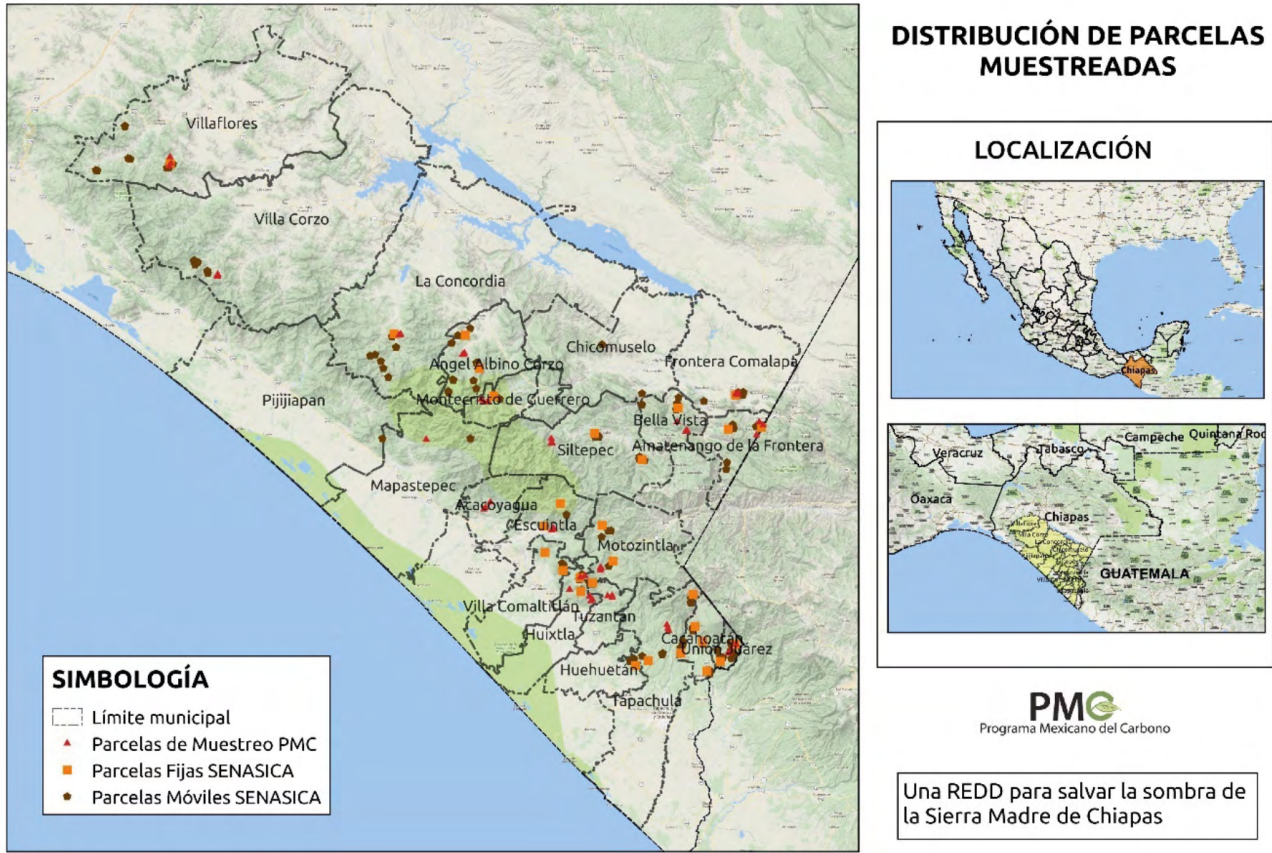


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo del PMC y SENASICA.

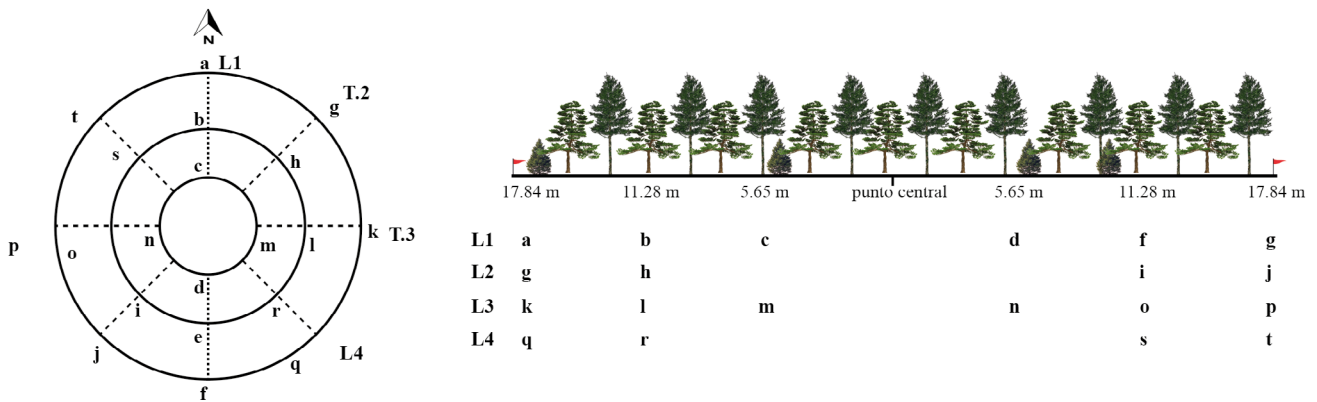


Figura 2. Ubicación de los puntos para la toma de fotografías dentro del sitio de muestreo. Fuente: Salas-Aguilar *et al.* (2017).

Relación biomasa aérea viva y cobertura proyectiva foliar

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

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

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

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

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

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

Coefficiente de escurrimiento y erosión del suelo

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

El modelo de Q/P está definido por:

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

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

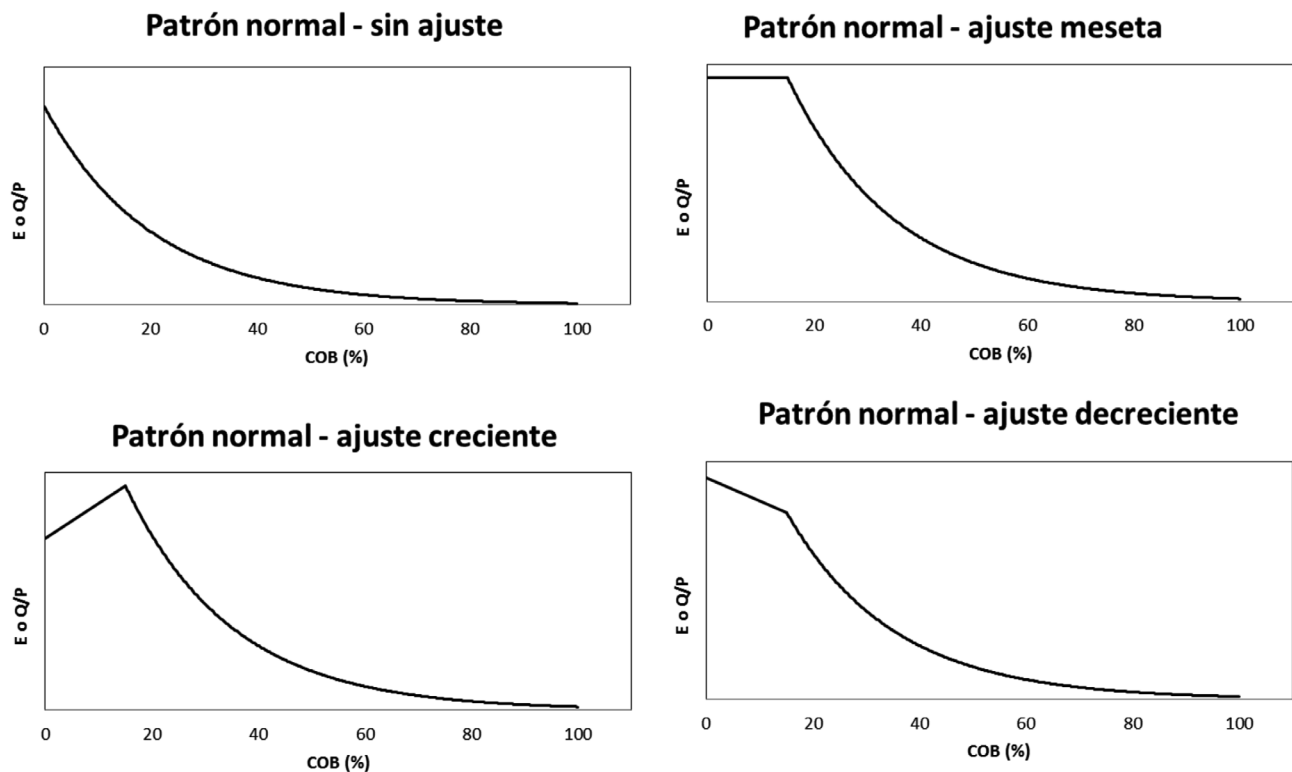


Figura 3. Patrones hipotéticos entre COB-E o COB-(Q/P). Adaptada de Rogers y Schumm (1991), donde E = erosión del suelo, Q/P = coeficiente de escurrimiento y COB = cobertura aérea del follaje.

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

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

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

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

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

Balance hídrico

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

RESULTADOS

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

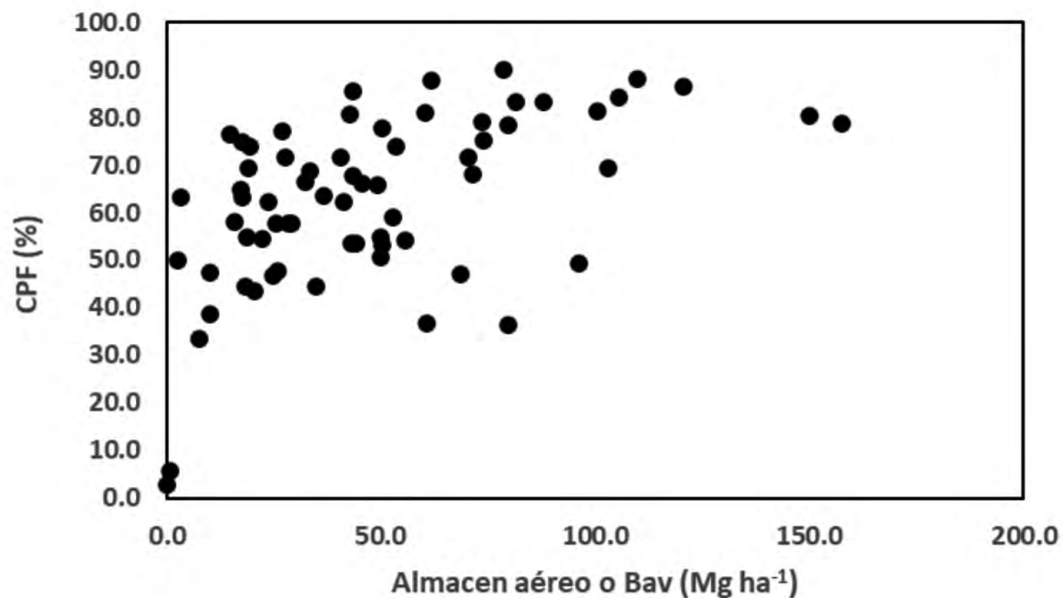


Figura 4. Relación entre Bav y CPF para todos los sitios de muestreo, donde CPF es la cobertura proyectiva del follaje.

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

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

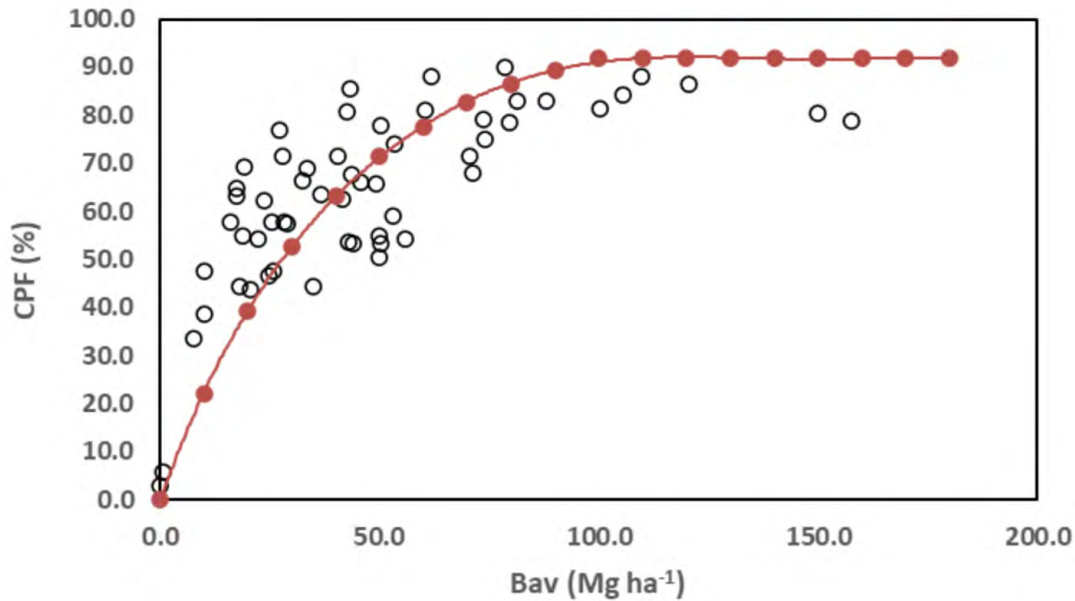


Figura 5. Relación entre Bav y CPF depurada, donde Bav es la biomasa aérea viva y CPF es la cobertura proyectiva del follaje.

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

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

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

DISCUSIÓN

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

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

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

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

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

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

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

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

RECONOCIMIENTO

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

LITERATURA CITADA

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

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

