

## Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal

Eduardo Valdés-Velarde<sup>1</sup>  
Laura Patricia Vázquez-Domínguez<sup>2</sup>  
Juan Ángel Tinoco-Rueda<sup>3</sup>  
Rufo Sánchez-Hernández<sup>4</sup>  
Eduardo Salcedo-Pérez<sup>5</sup>  
Erika Lagunes-Fortiz<sup>2§</sup>

<sup>1</sup>Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sustentable-Departamento de Fitotecnia-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, México. CP. 56230. (evaldesv@chapingo.mx). <sup>2</sup>Departamento de Fitotecnia-Universidad Autónoma Chapingo. (laurapvd@hotmail.com). <sup>3</sup>Centro Regional Universitario Oriente-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Huatusco-Jalapa km 6, Huatusco, Veracruz. CP. 94100. (jtinocor@chapingo.mx). <sup>4</sup>División Académica de Ciencias Agropecuarias-UJAT. Carretera Villahermosa-Teapa km 25, Ranchería La Huasteca, Centro, Tabasco, México. CP. 86280. (rufo.sanchez@ujat.mx). <sup>5</sup>Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuaria-Universidad de Guadalajara. Camino Ramón Padilla Sánchez núm. 2100, Nextipac, Zapopan, Jalisco. CP. 45200. (eduardo.salcedo@academicos.udg.mx).

§Autora para correspondencia: elagunesf@chapingo.mx.

### Resumen

Los sistemas agroforestales (SAF's) de café tienen un alto potencial en la captura de carbono (C) gracias a la gran diversidad de especies leñosas usadas como sombra. El objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial de captura de carbono en la biomasa vegetal aérea, mantillo y la materia edáfica en diferentes profundidades de suelo en cinco diferentes SAF's de café en la región cafetalera de Huatusco, Veracruz, México. Los sistemas agroforestales estudiados fueron: a pleno sol (03.PSC-MZ, 04.PSC-ZI), especializados (05.ESP-MZ, 06.ESP-MZ, 07.ESP-CH) y se compararon con un bosque mesófilo de montaña CRUO (02.BMM-CH) y un potrero (01.POT-TH). El SAF con el mayor contenido de C en biomasa aérea, estimado con ecuaciones alométricas, fue el 05.ESP-MZ, con 373.75 Mg ha<sup>-1</sup>, seguido del 07.ESP-CH con 231.88 Mg ha<sup>-1</sup>, 04.PSC-ZI con 123.96 Mg ha<sup>-1</sup>, 03.PSC-MZ con 61.08 Mg ha<sup>-1</sup>, 06.ESP-MZ con 45.95 Mg ha<sup>-1</sup>, 02.BMM-CH 456.64 Mg ha<sup>-1</sup> y 01.POT-TH 3.14 Mg ha<sup>-1</sup>. Respecto al C orgánico total el sistema 05.ESP-MZ obtuvo el mayor valor con 477.54 Mg ha<sup>-1</sup> y el 06.ESP-MZ el menor con 108 Mg ha<sup>-1</sup>. La implementación y conservación de los SAF del café es vital ya que contribuye a mitigar el impacto ambiental negativo como las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, compactación del suelo y pérdida de biodiversidad en flora y fauna que otros sistemas productivos han ocasionado.

**Palabras clave:** agroforestería, café, carbono.

Recibido: julio de 2022

Aceptado: agosto de 2022

## Introducción

El calentamiento global y el cambio climático son provocados por el aumento en la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera, principalmente el CO<sub>2</sub>, también conocido como gas carbónico, cuya producción y acumulación se relaciona directa o indirectamente con actividades humanas como la deforestación y el uso de combustibles fósiles (González *et al.*, 2003). Ante el creciente y preocupante deterioro ambiental, el interés por encontrar esquemas que permitan estimar y asignar valores objetivos a los bienes y servicios que los ecosistemas nos prestan toma mayor importancia, pues sólo de esta forma las acciones de conservación y restauración de la naturaleza surtirán el efecto deseado (SEMARNAT, 2004).

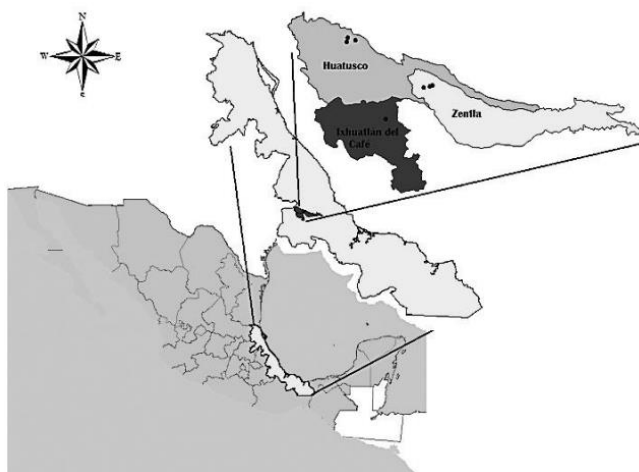
Estrategias productivas, ecológicas y económicamente sustentables como los sistemas agroforestales ayudan a mitigar los efectos ambientales derivados de la explotación y el uso inadecuado de los recursos naturales, pues al incluir prácticas donde árboles o arbustos interactúan de forma simultánea o secuencial se favorece la optimización y diversificación de la producción a fin de lograr un manejo sostenible (Nair, 2009; Casanova-Lugo *et al.*, 2011). La implementación de sistemas agroforestales ofrece múltiples bondades, como la protección del suelo por la erosión, la adición de materia orgánica al suelo, se favorecen y mantienen la biodiversidad, las reservas de carbono en la vegetación y suelos, promoviendo la recuperación de áreas degradadas, además de fomentar el almacenamiento de carbono y ayudan a mitigar el CO<sub>2</sub>, el cual es uno de los principales gases causantes del efecto invernadero (Nair, 2009; Rüginitz, 2009; Casanova-Lugo *et al.*, 2011).

La cafecultura se considera una actividad estratégica en el país, debido a que permite la integración de cadenas productivas, la generación de divisas y empleos, es el modo de subsistencia de muchos pequeños productores y alrededor de 30 grupos indígenas y en forma reciente, de enorme relevancia ecológica, pues más de 90% de la superficie cultivada con café se encuentra bajo sombra diversificada, lo que contribuye considerablemente a conservar la biodiversidad y provee de vitales servicios ambientales a la sociedad (Giovannucci y Juárez, 2006). Intervenciones productivas que tengan como meta la captura de carbono tiene el potencial de contribuir con la generación de ingresos en comunidades rurales y de los productores familiares (Rüginitz, 2009).

Para lograr la mitigación del cambio climático es indispensable contar con la información básica sobre el contenido de carbono en diferentes depósitos que puede tener un ecosistema (CONAFOR, 2008), por lo que el analizar el carbono almacenado en diferentes ecosistemas de la Región Central de Veracruz, importante región cafecultora de México, es de gran importancia pues contribuirá a ampliar el panorama sobre la captura de carbono en los sistemas agroforestales de la región. El objetivo principal de la presente investigación fue estimar el carbono capturado por la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas y la determinación del carbono orgánico del suelo (COS) en cuatro profundidades de suelo (0-10, 10-20, 20-30, y 30-60 cm) en siete diferentes SAF's de café: potrero (01.POT-TH), bosque mesófilo de montaña CRUO (02.BMM-CH), pleno sol, colonia Manuel González (03.PSC-MZ), pleno sol convencional, Zacamitla (04.PSC-ZI), especializado Roble Encino (05.ESP-MZ), especializado con cedro rojo (06.ESP-MZ) y especializado CRUO (07.ESP-CH), bajo la hipótesis de que el contenido total de carbono orgánico en los SAF's de café será menor que en el relicto de bosque mesófilo de montaña, pero mayor que el contenido en el potrero, el cual representa a los sistemas agropecuarios convencionales.

## Materiales y métodos

El área de estudio se localiza en la zona cafetalera en el estado de Veracruz. El relieve es montañoso de norte a sur y pertenece al eje Neovolcánico o Sistema Tarasco Nahua, las líneas de crestas se mantienen por arriba de los 2 200 msnm, INEGI (2009a) y se localizan en la región hidrológica Papaloapan en 96% (INEGI, 2009b). La variabilidad climática de las montañas está representada por seis tipos, de los cuales el semicálido subhúmedo y el templado húmedo (INEGI, 2009a) cubren 57 y 20% respectivamente. La precipitación promedio anual oscila entre 1 700 y 2 000 mm (SMN, 2017). Los suelos son de origen volcánico y el pH varía de 5.2 a 6 y las grandes pendientes varían de 3 a 60% (Pérez, 2004). La localización de los siete sistemas agroforestales estudiados se distribuyeron en los municipios de Huatusco, Ixhuatlán del Café y Zentla (Figura 1).



**Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.**

### Sistemas agroforestales evaluados (tratamientos)

Potrero (01.POT-TH): 90% integrado por pasto estrella africano (*Cynodon plectostachyus* Plinger), con gramas nativas (*Axonopus* spp., *Panicum* spp. y *Paspalum* spp.), pasto Kikuyo (*Penicetum clandestinum* Hochst. ex. Chiov.), trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y otras herbáceas de hoja ancha; incluye uizaches (*Acacia pennatula* Benth.) y ocozotes (*Liquidambar styraciflua* L.) a densidades menores a 3 árboles ha<sup>-1</sup>. Estos potreros se dedican desde hace 26 años al pastoreo de vacas Holstein, en un sistema de lechería semi-estabulada (Cuadro 1) (Torres *et al.*, 2007).

Bosque mesófilo de montaña, CRUO (02. BMM-CH): se ubica sobre tres condiciones de microrelieve: vega de río, ladera y meseta. Entre las especies de plantas vasculares existentes en dicho relicto destacan algunas por su importancia forestal: *Liquidambar styraciflua* L., Quiabis (*Meltosoma alba*) y aguacatillo (*Persea americana*), alimenticias: hierba mora (*Solanum muricatum*), tepejilote (*Chamaedorea tepejilote*), frutales, numerosas orquídeas, bromelias y helechos. En el lugar también se encuentran árboles de encino (*Quercus* sp.), aguacatillo (*Persea caerulea*, *Ampelocera hottlei*), ocelo (*Zyzygium* spp.), barrilillo (*Ilex quersetorum*), hincha huevos (*Comocladia engleriana* Loes), palo blanco (*Zinowiewia integerrima*), Liliana (*Eugenia* sp.), encino rojo (*Quercus acutifolia*) y guayabillo (*Terminalia chiriquensis* P.) (Cuadro 1) (Escamilla *et al.*, 1994).

**Cuadro 1. Características generales de los sistemas agroforestales estudiados.**

UM	Clave	LN/LO	Superficie (ha)	Pendiente	Año de establecimiento
UM1	01.POT-TH	LN 19° 10.556', LO 96° 57.344'	sd	0-55%	1981
UM2	02.BMM-CH	LN 19° 10.764', LO 96° 58.025'	1.1	35%	1980
UM3	03.PSC-MZ	LN 19° 06.437', LO 96° 51.273'	sd	0-29%	2008
UM4	04.PSC-ZI	LN 19° 03.683', LO 96° 54.660'	1.5	0-22%	1992
UM5	05.ESP-MZ	LN 19° 06.512', LO 96° 50.716'	1.5	18, 32, 34 y 49%	2004
UM6	06.ESP-MZ	LN 19° 06.602', LO 96° 50.462'	2	2.5, 6, 7 y 8%	2008
UM7	07.ESP-CH	LN 19° 10.421' LO 96° 58.103'	sd	0-22%	2004

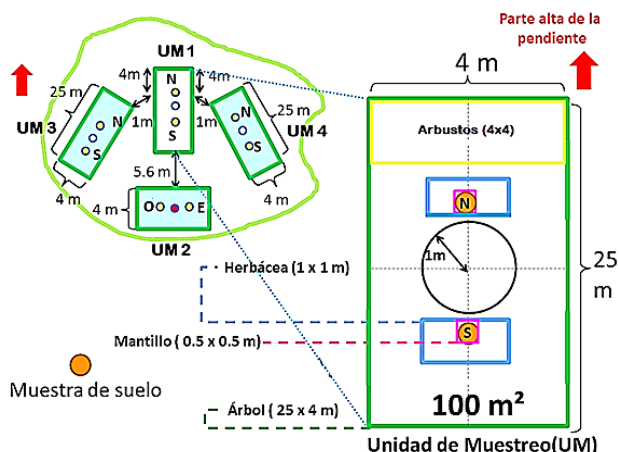
01.POT-TH= potrero; 02.BMM-CH= bosque mesófilo de montaña CRUO; 03.PSC-MZ= pleno sol, colonia Manuel González; 04.PSC-ZI= pleno sol convencional, Zacamitla; 05.ESP-MZ= especializado roble encino; 06.ESP-MZ= especializado con cedro rojo; 07.ESP-CH= especializado CRUO; UM= unidad de muestreo; LN= latitud norte; LO= latitud oeste; sd= sin dato.

Pleno sol, Colonia Manuel González (03.PSC-MZ): plantación de cafetos (2 a 3 m de altura) de la variedad 'Costa Rica' bajo monocultivo y a plena exposición solar, combinada con árboles de vainillo (24 m de altura), cedro rojo (0.5 m hasta 4 m de altura), ixpepe (18 m de altura), guarumbo y encinos (Cuadro 1). Pleno sol convencional, Zacamitla (04. PSC-ZI): plantación de cafetos (de 1 a 1.5 m de altura) de las variedades 'Garnica' y 'Bourbón' a plena exposición solar, combinada con árboles de tesguate, vainillo, listoncillo, encino y ixpepe, éstos dos últimos con alturas de hasta 14 m de altura (Cuadro 1).

Especializado roble encino (05.ESP-MZ): plantación de cafetos (de 3 a 3.7 m de alto) que se combinan con árboles de roble encino (*Quercus xalapensis*) de hasta de 23 m de alto (Cuadro 1). Especializado con cedro rojo (06. ESP-MZ): plantación de cafetos (de 2 a 2.5 m de alto) de la variedad 'Costa Rica' combinados con árboles de cedro rojo (*Cedrela odorata*) que alcanzan alturas de hasta de 17 m (Cuadro 1). Especializado CRUO (07. ESP-CH): plantación de cafetos (de 1 a 3 m de altura) de la variedad Colombia que se combinan principalmente con árboles de chalahuite (*Inga vera* W.) que llegan a alcanzar hasta 28.

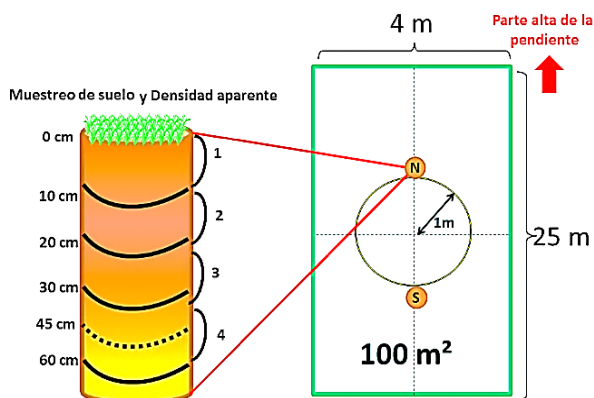
### Muestreo del suelo y la medición de biomasa

El diseño de las unidades de muestreo (UM) fue sistemático, se colocaron tres UM en sentido nortesur (UM 2, 3 y 4) y una en sentido este-oeste (UM 1) en cada sistema de estudio (Figura 2). Las UM fueron marcos rectangulares de 25 x 4 m (100 m<sup>2</sup>) (Etchevers *et al.*, 2005). Para obtener el valor promedio de las UM se tomaron en cuenta los valores de los puntos N y S de cada una de las unidades (UM 2, 3 y 4) y de los puntos E y O de la UM1 y así se obtuvieron muestras representativas de cada una de las UM que se utilizaron para calcular las características de la biomasa vegetal (arbustiva, herbácea y mantillo) y del suelo a cuatro diferentes profundidades (0-10, 10-20, 20-30 y 30-60 cm) (Etchevers *et al.*, 2005; Rüginitz *et al.*, 2008).



**Figura 2. Esquematación de la unidad de muestreo (UM) utilizada en el sistema agroforestal (Masuhara *et al.*, 2015).**

La medición del C edáfico en los sistemas estudiados se realizó a partir de muestras de suelo de dos pozos por UM (Figura 3), siguiendo la metodología descrita por Rüginitz *et al.* (2008); Masuhara *et al.* (2015).



**Figura 3. Esquematación de las profundidades del muestreo del suelo (Masuhara *et al.*, 2015).**

La densidad aparente ( $\rho_b$ ) se determinó según la metodología citada por Masuhara *et al.* (2015), en cada uno de los cuatro niveles de profundidad (0-10, 10-20, 20-30 y 30-60 cm). Para calcular la Biomasa arbórea (BA) se utilizó toda el área disponible de la UM (25x4 m) según Etchevers *et al.* (2005); Rüginitz *et al.* (2008). Tanto para especies arbustivas como arbóreas se utilizaron ecuaciones alométricas según la especie (Cuadro 2) y se convirtieron los  $\text{kg C ha}^{-1}$  a  $\text{Mg C ha}^{-1}$ .

Para estimar la biomasa de troncos caídos (BTC)  $> 5$  cm de diámetro y  $> 50$  cm de largo se utilizó la ecuación alométrica correspondiente (Cuadro 2). Para calcular la cantidad de biomasa por ha, se sumó la biomasa de todos los troncos caídos medidos (1).  $\text{BTC (Mg ha}^{-1}) = \text{BAC} \times 10^{-4}$  (1). Donde: BAC= biomasa total (g) en la UM de 25 x 4 m a (Hairiah *et al.*, 2001). Para evaluar la biomasa herbácea (BH) se utilizó un marco de 1x1 m (1  $\text{m}^2$ ), colocado a 1 m del centro de UM y dentro de subcuadrante de 4 x 4 m, se utilizó la fórmula:  $\text{BH} = ((\text{PSM}/\text{PFM}) \times \text{PFT}) \times 0.01$ . Donde: BH=

biomasa herbácea; materia seca ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )= PSM= peso seco (g) de la muestra colectada, PFM= peso fresco (g) de la muestra colectada; PFT= peso fresco total (g) por metro cuadrado y se usa 0.01 como factor de conversión.

**Cuadro 2. Modelos alométricos utilizados en la estimación de biomasa arbórea y arbustiva, en sistemas agroforestales de café.**

Especie	Ecuación	Cita
Café	$Y = 10^{(-1.113 + 1.578 * \text{LOG}_{10}(D) + 0.581 * \text{LOG}_{10}(D))}$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Plátano	$Y = 0.03 * (D)^{2.13}$	Van Noordwijk <i>et al.</i> (2002)
Cedro rojo	$Y = \exp(-1.17 + (2.119 * \ln(D)))$	Brown (1997)
Árboles en general	$Y = 10^{(-0.834 + 2.223 * \log_{10}(D))}$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Troncos caídos	$Y = \pi * r^2 * L * 0.43$	Hairiah <i>et al.</i> (2001)
Biomasa de raíces	$Y = \exp(-1.0587 + 0.8836 * \ln(A + a + H))$	Ayala <i>et al.</i> (2001)
<i>Inga</i> spp.	$Y = 10^{(-0.889 + 2.317 * (\log_{10}(D)))}$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Encino	$Y = 1.91 * (D)^{(1.782)}$	Ayala <i>et al.</i> (2001)
Biomasa arbórea de BMM	$Y = \exp(-2.289 + 2.649 * \ln(D) - 0.021 * (\ln(D))^2)$	Brown (1997)

Y= biomasa arriba del suelo en kilogramos; D= Dap en cm a 1.3 cm (árboles) y 15 cm (arbustos);  $\log_{10}$ = logaritmo en base 10; exp= exponente; ln= logaritmo natural.

El muestreo de la biomasa de mantillo (BM) se realizó en forma sistemática con subcuadrantes de  $0.5 \times 0.5 \text{ m}$  ( $0.25 \text{ m}^2$ ) colocados en el centro del marco para muestreo de biomasa herbácea. Para estimar la biomasa de las raíces (BR), el cálculo se realizó con la siguiente ecuación (Cairns *et al.*, 1997)=  $BR = \exp[-1.0587 + 0.8836 * \ln(BAE)]$ . Donde: BR= biomasa de raíces, materia seca ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); exp= exponencial; ln= logaritmo natural; y BAE= biomasa arbórea, arbustiva y herbácea, materia seca ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Para estimar la cantidad de C en la biomasa vegetal total se manejó la siguiente ecuación:  $CBV = BVT * 0.5$ . Donde: CBV= carbono en la biomasa vegetal total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); BVT= biomasa vegetal total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y 0.5 como constante.

### Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un análisis de varianza (Anova) bajo un diseño completamente al azar y se realizó la comparación de medias de Tukey ( $p < 0.05$ ) con el programa Statistical Analysis Sistem (SAS) para determinar la diferencia estadística en los SAF's.

## Resultados y discusión

### Carbono almacenado en los árboles

El comportamiento del componente arbóreo resaltó en el sistema 02.BMM-CH con un contenido de C de  $386.21 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Beristain (2000) describe este sistema como un relicto de bosque natural que ha permanecido sin disturbio por 32 años, fungiendo como un jardín botánico natural, en la presente investigación dicho sistema contó con un mayor número de árboles 3 175 por hectárea; es decir, diez veces más que en los otros sistemas agroforestales evaluados.



En el sistema 05.ESP-MZ se obtuvieron 302.54 Mg ha<sup>-1</sup> y 900 árboles ha<sup>-1</sup> y aunque el C es similar al obtenido en el 02. BMM-CH el número de árboles es menor, debido a que en un sistema especializado con roble encino los árboles son de gran altura y tienen un diámetro considerable, por tanto, la biomasa obtenida en el componente arbóreo es alta. El sistema 04.PSC-ZI aportó 95.96 Mg ha<sup>-1</sup> con 1 400 árboles ha<sup>-1</sup>, aunque posee una cantidad considerable de árboles es necesario recalcar que estos estaban en crecimiento por lo que no proporcionaban una sombra adecuada a los cafetos de ahí que se haya tomado como pleno sol.

### **Carbono almacenado en los arbustos (cafetos)**

Con 11.97 Mg ha<sup>-1</sup> el sistema 06.ESP-MZ fue el que obtuvo mayor almacenamiento de C en los arbustos, seguido del 03.PSC-MZ con 8.88 Mg ha<sup>-1</sup> y 05.ESP-MZ con 8.28 Mg ha<sup>-1</sup>. El 02.BMM-CH fue el que presentó el menor valor con 1.46 Mg ha<sup>-1</sup> lo cual se atribuye a que no hay cafetos en este sistema y que los 41 árboles (64 m<sup>2</sup>) considerados arbustos por tener un dap < 5 cm tienen una biomasa de 2.92 Mg ha<sup>-1</sup>. El 02.BMM-CH destaca de los sistemas agroforestales por la densidad de arbustos (6 406 arbustos por hectárea). Masuhara *et al.* (2015) reporta valores semejantes para el bosque mesófilo de montaña con 1.5 Mg ha<sup>-1</sup> y con 6 719 arbustos por hectárea y para el sistema especializado reportó 2.8 Mg ha<sup>-1</sup>. Por otro lado, Guerrero (2011) en Chiapas obtiene 11.37 Mg ha<sup>-1</sup> en el monocultivo bajo sombra, para el café natural y el policultivo tradicional reportó 11.03 y 8.83 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

### **Carbono almacenado en los troncos caídos**

La biomasa de troncos caídos sólo se manifiesta en dos de los sistemas agroforestales estudiados, 03.PSC-MZ con 225 troncos caídos por ha y 06.ESP-MZ con 150 troncos caídos por ha, cabe recalcar que el sistema 03.PSC-MZ el largo de los troncos fue tres veces más largo. La diferencia en el número de troncos entre los sistemas agroforestales puede estar influenciada por la pendiente, ya que 02.BMM-CH presenta una pendiente de 35% y el sistema 05.ESP-MZ presenta pendientes pronunciadas de hasta 49%, por lo que los troncos pudieron haber rodado hacia la parte baja y en los sistemas 03 y 06 que presentan troncos caídos la pendiente no supera 22%.

### **Carbono almacenado en herbáceas y mantillo**

El sistema 07.ESP-CH, presentó la mayor cantidad de C en relación con el estrato herbáceo con 4.27 Mg ha<sup>-1</sup>. El sistema 02.BMM-CH tuvo un valor nulo esto puede ser debido a que el componente arbóreo y arbustivo impiden la entrada adecuada de luz hasta el suelo para el crecimiento de las hierbas. El 01.POT-TH resultó con 2.06 Mg ha<sup>-1</sup>, similar a lo observado por Espinoza-Domínguez *et al.* (2012) que reporta valores en el potrero de 1.7 Mg ha<sup>-1</sup> y para el bosque mesófilo de montaña 0.64 Mg ha<sup>-1</sup>.

### **Carbono en la capa del mantillo**

El sistema 05.ESP.MZ fue el que presentó más captura con un 8.64 Mg ha<sup>-1</sup>, seguido del 02.BMM-CH, 03.PSC-MZ y 06.ESP-CH con 5.04, 5.03 y 2.95 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, finalmente el 01.POT-TH y 07.ESP-CH que fueron los sistemas donde se encontró mayor cantidad de herbáceas y reportaron los más bajos contenidos de C en el mantillo con 0.42 y 0.05 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente. Estos resultados fueron superiores a los reportados por Delgadillo y Quechulpa (2006), para su sistema agroforestal el mantillo tiene 1.5 Mg ha<sup>-1</sup>, el sistema mejorado tropical y el subtropical con 0.65 y 2.19 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente.

## Carbono almacenado en las raíces

La cantidad mayor de carbono en raíces fue encontrada en el sistema 02.BMM-CH con 64.55 Mg ha<sup>-1</sup>, esto es proporcional a la cantidad de árboles encontrados en este sistema, es cual es alto si lo comparamos con los resultados obtenidos por Masuhara *et al.* (2015) que reporta un contenido de carbono en raíces de 48.15 Mg ha<sup>-1</sup>. En el sistema 05.ESP-MZ se obtuvo 54.23 Mg ha<sup>-1</sup>, esto debido probablemente al tipo de árboles con los que está asociado el café, pues el roble encino (incluye la cantidad aportada por arbustos y herbáceas) almacena 11.36% del carbono capturado en el sistema en sus raíces.

## Contenido de carbono orgánico del suelo

En el 02.BMM-CH obtuvieron 108 Mg ha<sup>-1</sup> de COS resultando el sitio de mayor retención de C en el suelo, los sistemas 06.ESP-MZ y 07.ESP-CH fueron los que reportan menor contenido con 62 Mg ha<sup>-1</sup>. Los resultados obtenidos en el presente estudio se pueden relacionar con los reportados por Mena *et al.* (2011), quienes reportan para el carbono orgánico del suelo de los pisos altitudinales y los sistemas de uso de Tierra en Costa Rica como el bosque secundario (Bo) valores de 113.1 Mg ha<sup>-1</sup> y para los sistemas agroforestales de café especializados con laurel y poró (*Erythrina poeppigiana*) con valores de 84.9 y 108.1 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Existen variaciones muy contrastantes en el carbono arbóreo de los SAF's (Cuadro 3) debido en cierta forma al manejo agronómico de cada cafetal, a la densidad de plantación y a la edad de los árboles y arbustos, pero sobre todo a la compleja heterogeneidad de especies presentes. Cabe mencionar que el potrero está sometido a un proceso semi-estabulado con ganado bovino, en cual se permite el crecimiento de los pastos y pocos árboles.

**Cuadro 3. Contenido promedio de carbono orgánico en el suelo (Mg ha<sup>-1</sup>).**

Prof (cm)	01.POT-TH	02.BMM-CH	03.PSC-MZ	04.PSC-ZI	05.ESP-MZ	06.ESP-MZ	07.ESP-CH
0-10	20.8 ±4.9a	33.2 ±9.33ab	18.14 ±7.07a	23.95 ±6.3ab	25.59 ±5.99a	12.7 ±3.98ab	13.55 ±3.6ab
10-20	25.1 ±9.5a	17.21 ±4.08a	23.77 ±10.6a	16.71 ±5.31a	23.65 ±7.42a	12.01 ±3.02a	16.98 ±4.68a
20-30	24.1 ±6ab	26.76 ±2.51a	22.05 ±6.6ab	15.5 ±3.98ab	26.5 ±5.65ab	11.05 ±1.4ab	10.24 ±5.26b
30-60	25.8±9.1 a	30.84 ±4.82a	7.46a	25.56 ±8.41a	28.06 ±8.81a	26.3 ±4.33a	21.07 ±4.59a

Prof= profundidad; 01.POT-TH= potrero; 02.BMM-CH= bosque mesófilo de montaña CRUO; 03.PSC-MZ= pleno sol, colonia Manuel González; 04.PSC-ZI= pleno sol convencional, Zacamitla; 05.ESP-MZ= especializado roble encino; 06.ESP-MZ= especializado con cedro rojo; 07.ESP-CH= especializado CRUO. Letras iguales indican diferencias no significativas ( $p < 0.05$ ).

## Distribución del contenido de carbono por componentes del sistema

En el sitio de potrero (01.POT-MF), la mayor concentración de carbono almacenado fue en el suelo (0- 60 cm de profundidad), se detectaron 95.89 Mg ha<sup>-1</sup>, lo que representa 96.83% del total seguido por el C ligado al estrato herbáceo con 2.06 Mg ha<sup>-1</sup> asociado a C almacenado en las raíces que fue de 0.66 Mg ha<sup>-1</sup> el mantillo reporto 0.42 Mg ha<sup>-1</sup> (0.43%) (Cuadro 4).



**Cuadro 4. Contenido promedio de carbono almacenado en el estrato aéreo (Mg ha<sup>-1</sup>, árboles, arbustos, herbáceas mantillo, troncos caídos y raíces).**

Estrato	01POT-MF	02BMM-CH	03PSC-MZ	04PSC-ZI	05ESP-MZ	06ESP-MZ	07ESP-CH
Arbórea	0 b	385.58 a	26.83 a	95.56 a	302.54 a	22.28 a	188.06 a
Arbustiva	0 c	1.46 c	8.88 ab	4.9 abc	8.28 abc	11.97 a	4.6 abc
Herbácea	2.06 cd	0 b	0.18 b	0.17 bc	0.06 a	0.05 c	4.27 a
Mantillo	0.42 a	5.04 a	5.03 a	3.32 a	8.64 a	2.95 cbd	0.05 d
Raíz	0.66 b	64.55 b	8.16 a	20.02 b	54.23 b	7.8 a	34.9 a
T. caídos	0 b	0.06 c	12.01 c	0 c	0 c	0.91 b	0 b
Suelo **	95.89	107.99	85.57	79.12	103.79	62.05	61.85
Total	99.03	564.63	146.65	203.09	477.54	108	293.73

01.POT-TH= potrero; 02.BMM-CH= bosque mesófilo de montaña CRUO; 03.PSC-MZ= pleno sol; colonia Manuel González; 04.PSC-ZI= pleno sol convencional, Zacamitla; 05.ESP-MZ= especializado Roble Encino; 06.ESP-MZ= especializado con cedro rojo; 07.ESP-CH= especializado CRUO; T. caídos= troncos caídos; \*\* = profundidad de 0 a 60 cm. Letras iguales indican diferencias no significativas entre sistemas por estrato ( $p < 0.05$ ).

## Conclusiones

En el presente estudio se evaluaron diferentes sistemas agroforestales (SAF's) de los más representativos de la zona cafetalera de Huatusco. Los sistemas agroforestales basados en el cultivo del café capturan en promedio 245.08 Mg ha<sup>-1</sup>, son sistemas con un manejo más conservacionista y con el uso de especies perennes que se aprovechan en su totalidad, incluso los residuos de los árboles son incorporados al suelo, lo que garantiza carbono almacenado.

Respecto a la biomasa aérea de los sistemas agroforestales de café, se determinó que estos pueden almacenar desde 3, 45, 61, 124, 231, 373 y 456.64 Mg ha<sup>-1</sup>, en el 01.POT-TH, 06.ESP-MZ, 04.PSC-MZ, 03.PSC-ZI, 07.ESP-CH, 05.ESP-MZ y 02.BMM-CH, respectivamente. En el 02.BMM-CH acumuló la mayor biomasa aérea pues al ser bosque no perturbado, ni aclareado mantiene la mayor cantidad de carbono almacenado en su estrato arbóreo, mientras que la biomasa aérea en el potrero (01.POT-TH) fue la menor debido a que no cuenta con un estrato arbóreo ni arbustivo, únicamente herbáceo. Los sistemas agroforestales de café en la región de Huatusco tienen un alto potencial de captura de carbono, por ello resulta fundamental proporcionar a los cafecultores conocimientos básicos que les permitan aprovechar los recursos disponibles en sus sistemas agroforestales.

## Agradecimientos

Los autores(as) agradecen a la línea prioritaria de investigación núm. 1 (LPI-1): Manejo Sustentable de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados y a la Dirección General de Investigación y Postgrado (DGIP) de la Universidad Autónoma Chapingo, por el financiamiento otorgado para la realización de la presente investigación.

## Literatura citada

- Ayala, L. R.; De Jong, B. H. y Ramírez, M.H. 2001. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. Forest. Amb.* 7(2):153-157.
- Brown, A. S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Forestry Paper 134. Roma, Italy. 55 pp. <https://www.fao.org/3/w4095e/w4095e00.htm>.
- Cairns, M. A.; Brown, A. S.; Helmer, E. H. and Baumgardner, G. A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia.* 111(1):1-11.
- Casanova, L. F.; Petit, A. J. y Solorio, S. J. 2011. Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. Forest. Amb.* 17(1):133-143. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.047>.
- CONAFOR. 2008. Comisión Nacional Forestal. Catálogo de contenido de carbono en especies forestales de tipo arbóreo del noreste de México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Zapopan, Jalisco. 1-3 pp.
- Delgadillo, R. M. y Quechulpa, M. S. 2006. Manual de monitoreo de carbono en sistemas agroforestales. Chiapas, México. CONAFOR-AMBIO, SC de RL. 43 p.
- Escamilla, P. E.; Licona, A. L.; Díaz, V. S.; Santoyo, C. H. V.; Sosa, C. R. y Rodríguez, R. L. 1994. Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México; un análisis tecnológico. *Rev. de Historia.* 30(1):41-67.
- Espinoza, D. W.; Krishnamurthy, L. X.; Vázquez, A. A. y Torres, R. A. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. Forest. Amb.* 18(1):57-70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>.
- Etchevers, B. J. D.; Monreal, C. M.; Hidalgo, M. C.; Acosta, M. M.; Padilla C. J. y López, R. R. M. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. 12-25 pp.
- Giovannucci, D. y Juárez, C. R. 2006. Análisis prospectivo de política cafetalera. México, Proyecto Evaluación Alianza para el Campo. 2005. FAO. SAGARPA. 74 p.
- González, E. M.; Jurado, Y. E.; González, E. S.; Aguirre, C. O. A.; Jiménez, P. J. y Navar, C. J. J. 2003. Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL.* 6(3):377-385.
- Hairiah, K.; Sitompul, S. M.; Van, N. M. and Palm, C. 2001. Methods for sampling carbon stocks above and below ground. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). Bogor, Indonesia. 17-23 pp.
- Masuhara, A.; Valdés, V. E.; Pérez, J.; Gutiérrez, D.; Vázquez, J. C.; Salcedo, E.; Juárez, M. J. y Merino, A. 2015. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Rev. Amazónica Ciencia y Tecnología.* 4(1):66-93.
- Mena, V. E.; Andrade, H. J. y Navarro, C. M. 2011. Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios y un gradiente altitudinal en Costa Rica. CATIE-Costa Rica. *Agroforestería Neotropical.* 1(1):3-20.
- Nair, P. K.; Kumar, B. M. and Nair, V. D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172(1):10-23. Doi: 10.1002/jpln.200800030.
- Pérez, P. J. R. 2004. Colecciones *ex situ* de la Universidad Autónoma Chapingo en Huatusco, Veracruz. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 126 p.

- Rügnitz, T. M.; Chacón, L. M. y Porro, R. 2008. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Consorcio iniciativa amazónica (IA) y Centro Mundial Agroforestal (ICRAF). Belém, Brasil. 63 p.
- Rügnitz, M. T.; Chacón, M. L.; Porro, R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. (Ed.). Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). Lima, Perú. 28-37 p.
- Segura, M.; Kanninen, M. and Suárez, D. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of 285 shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*. 68(2):143-150.
- SEMARNAT. 2004. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Saber para proteger, Introducción a los servicios ambientales. México, DF. 71-82 pp.
- SMN. 2017. Servicio Meteorológico Nacional. Normales climáticas (1951-2010). <http://smn.cna.gob.mx/es/climatología/información-climatologica>.
- Torres, J. A.; Mayorga, B. X.; May, V. N.; Fernández, M. X. y Gaytán, J. A. 2007. Captación en diferentes sistemas de manejo del suelo en el CRUO (época de lluvias). En INIFAP, UV, CP, UACH, ITUG, ITBOCA y UNAM (Ed.). Avances en la investigación agrícola, pecuaria, forestal y acuícola en el trópico mexicano 2007. Libro científico núm. 4. IBSN: 978-970-43-0240-5. Veracruz, México. 357-363 pp.
- Van, N. M.; Rahayu, S.; Hairiah, K.; Wulan, Y. C.; Farida, A. and Verbist, B. 2002. Carbon stock assessment for a forest to coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China*. 45(1):75-86.