

## ALMACÉN DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ CARBON STOCKS IN AGROFORESTRY SYSTEMS WITH COFFEE PLANTATIONS

William Espinoza-Domínguez<sup>1</sup>; L. Krishnamurthy<sup>1\*</sup>; Antonio Vázquez-Alarcón<sup>2</sup>; Antonio Torres-Rivera<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. (\*Autor para correspondencia Correo-e: uach1854@gmail.com).

<sup>2</sup>Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C. P. 56230.

<sup>3</sup>Centro Regional Universitario de Oriente (CRUO), Universidad Autónoma Chapingo. Huatusco, Ver. México.

### RESUMEN

El presente estudio se realizó con el objetivo de estimar el almacén de carbono en sistemas agroforestales (SAF) con base en café en la región de Huatusco, zona de mayor producción de café (*Coffea arabica* L.) en el estado de Veracruz, México, a fin de obtener información cuantitativa sobre el potencial de mitigación de carbono en los SAF de la región. Para ello, se estimaron los reservorios de carbono en biomasa vegetal y la materia orgánica edáfica existentes en sistemas agroforestales de café-plátano, café-macadamia, café-cedro rosado, café-ganado ovino y café-chalahuite, y como referencia de una condición no agroforestal se incluyeron un bosque primario y un potrero con pradera natural. La recolección de muestras se hizo en parcelas de 4 x 25 m (100 m<sup>2</sup>), donde se colectó biomasa de vegetación herbácea y mantillo, y para el suelo la profundidad de muestreo fue de 0 a 30 cm. El sistema agroforestal que presentó la mayor cantidad de carbono aéreo, estimado con modelos alométricos, fue café-cedro rosado (Ca + Ce), con 114 Mg C·ha<sup>-1</sup>, seguido de los sistemas café-macadamia (Ca + Ma), con 34 Mg C·ha<sup>-1</sup>; café-chalahuite (Ca + Ch), con 29 Mg C·ha<sup>-1</sup>; café-plátano velillo (Ca + Pl), con 27 Mg C·ha<sup>-1</sup>; y por último el sistema silvopastoril (Sp), con 2 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Para el caso del carbono orgánico del suelo, el tratamiento (Ca + Ce) fue el que presentó mayor contenido de carbono fácilmente oxidable en el suelo, con 58 Mg C·ha<sup>-1</sup>, y el menor fue el tratamiento potrero (P), con 50 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Del carbono orgánico total entre los SAF el tratamiento Ca + Ce fue el que tuvo el mayor valor, con 172 Mg C·ha<sup>-1</sup>, y el tratamiento silvopastoril (Sp) presentó el menor, con 65 Mg C·ha<sup>-1</sup>. De los sistemas evaluados se concluye que, en promedio, los SAF almacenan 102 Mg C·ha<sup>-1</sup>, mientras que el potrero almacena 52 t C·ha<sup>-1</sup>, y el bosque primario es el sistema que más almacena carbono total, con un valor de 355 Mg C·ha<sup>-1</sup>.

Recibido: 01 de abril, 2011  
Aceptado: 15 de diciembre, 2011  
DOI: 10.5154/r.chscfa.2011.04.030  
<http://www.chapingo.mx/revistas>

**PALABRAS CLAVE:** Plantación de café, sistemas agroforestales, carbono del suelo, México.

### ABSTRACT

This study was conducted with the aim of estimating carbon stocks in coffee-based agroforestry systems (AFS) in the Huatusco region, a major coffee (*Coffea arabica* L.) producing area in the state of Veracruz, Mexico, in order to obtain quantitative data on the carbon mitigation potential of major agroforestry systems in that region. To this end, carbon stocks were estimated for plant biomass and soil organic matter in the following agroforestry systems: coffee-banana, coffee-macadamia, coffee-pink cedar, coffee-sheep and coffee-*Inga spuria*, as well as a primary forest and a grazing land for comparative purposes. The samples were collected from 4 x 25 m (100 m<sup>2</sup>) plots for tree biomass, herbs and litter; for soil, the sampling depth was 0 to 30 cm. The highest amount of aboveground carbon, estimated using allometric models, was recorded for coffee-pink cedar (Co + Ce), with 114 Mg C·ha<sup>-1</sup>, followed in descending order by: coffee-macadamia (Co + Ma), with 34 C Mg·ha<sup>-1</sup>; coffee-*Inga spuria* (Co + In), with 29 C Mg·ha<sup>-1</sup>; coffee-banana (Co + Ba), with 27 Mg C·ha<sup>-1</sup>; and lastly the grazing land (G) with 2 Mg C·ha<sup>-1</sup>. For soil organic carbon, the Co + Ce treatment had the highest amount with 58 Mg C·ha<sup>-1</sup>, while the grazing land (G) had the lowest with 50 Mg C·ha<sup>-1</sup>. As far as total organic carbon is concerned, the maximum amount of 172 Mg C·ha<sup>-1</sup> was found in Co + Ce and the minimum, 65 Mg C·ha<sup>-1</sup>, in the grazing land. In conclusion, among the coffee-based systems studied, the average carbon stock is 102 Mg C·ha<sup>-1</sup>, compared to 52 Mg C·ha<sup>-1</sup> for the grazing land and 355 Mg C·ha<sup>-1</sup> for the primary forest, which stores the most total carbon.

**KEYWORDS:** Carbon stock, coffee plantation, agroforestry systems, soil carbon, Mexico.

### INTRODUCCIÓN

Una forma de mitigar los efectos con que el CO<sub>2</sub> atmosférico participa en el cambio climático es a través de la captura del carbono, mediante la fotosíntesis, y man-

### INTRODUCTION

One way to mitigate the effects of atmospheric CO<sub>2</sub> on climate change is through carbon capture, by means of photosynthesis, and to keep it sequestered as long

tenerlo el mayor tiempo posible secuestrado, ya sea en el suelo o en forma de biomasa, la cual incluye todo tipo de vegetación y organismos animales. Mediante la fotosíntesis, la vegetación asimila  $\text{CO}_2$  atmosférico, forma carbohidratos y aumenta su volumen. Por su parte, los bosques del mundo capturan y conservan una alta cantidad de carbono y participan con 90 % del flujo anual de carbono de la atmósfera y de la superficie terrestre (De Jong *et al.*, 2004; Montoya *et al.*, 1995).

Los sistemas agroforestales (SAF), de acuerdo con Nair (1993), se definen como aquellos sistemas de uso de la tierra donde especies leñosas perennes se usan y manejan junto con cultivos agrícolas y animales, donde se producen interacciones ecológicas y económicas entre los componentes que son resultado de los arreglos espaciales y temporales. Los sistemas agroforestales también son importantes reservorios de carbono en el tiempo, mismos que dependen de la productividad, la finalidad para la cual se hayan diseñado y las condiciones ambientales bajo las que se desarrollan, además de ser una fuente de alimento para los dueños y proporcionar alimento para animales. La acumulación de carbono (C) secuestrado es más evidente en la biomasa de árboles y arbustos; las cantidades de almacenamiento de C en la biomasa dependen de la proporción de árboles presentes y del tamaño del árbol (Montagnini y Nair, 2004). De acuerdo con Young (1997), la producción de biomasa aérea en diferentes SAF y regiones ecológicas varía de  $2.3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  a  $48 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , dependiendo del número de componentes, estratos y arreglos espaciales y temporales. La producción de biomasa subterránea puede variar de  $1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  a  $4.5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica del suelo (MOS) y su estado de residencia, conciernen al tipo de vegetación presente, ingreso de residuos, composición química de los materiales, factores climáticos (temperatura y humedad) y propiedades del suelo, como textura, contenido y mineralogía de arcillas, y nivel de acidez presente (Stevenson, 1994).

Los sistemas agroforestales almacenan aproximadamente 9, 21, 50 y 63  $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ , en biomasa aérea y raíces de regiones semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas, respectivamente, y el carbono en todos los almacenes se estima entre 12 y 228  $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Schroeder, 1994). De acuerdo con Oelbermann *et al.* (2004), el potencial de almacenamiento de C en biomasa viva en SAF de zonas tropicales es de  $2.1 \times 10^9 \text{ Mg C} \cdot \text{año}^{-1}$ , mientras en zonas templadas es de  $1.9 \times 10^9 \text{ Mg C} \cdot \text{año}^{-1}$ .

Rajagopal (2004) realizó un estudio en Tlapacoyan, Veracruz, en el cual estimó la cantidad de C almacenado en SAF de cítricos en diferentes arreglos espaciales y componentes; los sistemas cítrico + café + plátano, cítrico + café, cítrico + potrero y cítrico + plátano almace-

as possible, either in the soil or in the form of biomass, which includes all types of vegetation and animal organisms. Through photosynthesis, vegetation assimilates atmospheric  $\text{CO}_2$ , forms carbohydrates and increases its biomass volume. For their part, the world's forests capture and retain a high amount of carbon and are involved in 90 % of the annual carbon flow from and to the atmosphere and land surface (De Jong *et al.*, 2004; Montoya *et al.*, 1995).

Agroforestry systems (AFS), according to Nair (1993), are defined as land-use systems where woody perennials are used and managed together with agricultural crops and animals, and where ecological and economic interactions are produced among the components that are the result of spatial and temporal arrangements. Agroforestry systems are also important carbon sinks over time, which depend on productivity, the purpose for which they were designed and the environmental conditions under which they develop, as well as being a food source for the owners and providing animal feed. The accumulation of sequestered carbon (C) is most evident in tree and shrub biomass; the amounts of C in standing biomass depend on the proportion of trees present and tree size (Montagnini and Nair, 2004). According to Young (1997), aboveground biomass production in different agroforestry systems and ecological regions ranges from  $2.3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$  to  $48 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ , depending on the number of components, layers and spatial and temporal arrangements. Underground biomass production can vary from  $1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$  to  $4.5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ .

The main factors affecting the evolution of soil organic matter (SOM) and its residence time include the type of vegetation present, litter input, the chemical composition of materials, climatic factors (temperature and humidity) and soil properties, such as texture, clay content and mineralogy and level of acidity present (Stevenson, 1994).

Agroforestry systems store approximately 9, 21, 50 and 63  $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$  in aboveground biomass and roots in semi-arid, sub-humid, humid and temperate areas, respectively, and carbon in all stocks is estimated between 12 and 228  $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Schroeder, 1994). According to Oelbermann *et al.* (2004), the potential to sequester C in living biomass in agroforestry systems is  $2.1 \times 10^9 \text{ Mg C} \cdot \text{year}^{-1}$  in tropical zones and  $1.9 \times 10^9 \text{ Mg C} \cdot \text{year}^{-1}$  in temperate zones.

Rajagopal (2004) conducted a study in Tlapacoyan, Veracruz, which estimated C stocks in citrus plantation-based AFS with different spatial arrangements and components. The citrus plantation + coffee + banana, citrus plantation + coffee, citrus plantation + grazing land and citrus plantation + banana systems stored 196, 186, 181 and 144  $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ , respectively. C content in aboveg-

naron 196, 186, 181 y 144 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El C contenido en la biomasa aérea varió entre 41 y 75 Mg C·ha<sup>-1</sup>; la mayor cantidad se encontró en los árboles, siendo cinco veces mayor al C almacenado por arbustos y hierbas. La distribución del C en este reservorio mostró amplias variaciones por el tipo de especies arbóreas, densidad, regímenes de manejo y edad de los sistemas.

Otras experiencias de captura de carbono se han desarrollado por el proyecto Scolel té, en las regiones Tzeltal y Tzotzil del estado de Chiapas. De Jong *et al.* (1997) estiman que el potencial de captura de carbono de sistemas agroforestales, en zonas subtropicales y tropicales, puede oscilar de 40 a 80 y de 60 a 140 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Balbontín *et al.* (2009) reportaron que el contenido de carbono orgánico del suelo, en diferentes grupos climáticos de México, varía desde 34.75 Mg C·ha<sup>-1</sup> (clima muy seco y semicálido) hasta 168.79 Mg·ha<sup>-1</sup> (clima tropical húmedo con lluvias todo el año).

Callo-Concha (2001), en un estudio realizado en la Amazonia peruana, reportó que la mayor cantidad de C se encontraba en el suelo. Los sistemas como huerto casero, café bajo sombra y silvopastura almacenaron 196, 193 y 120 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectivamente, de los cuales más de 58 % se ubicaba en el suelo. El autor concluyó, además, que los árboles son también un importante reservorio, con 30 % del C.

Ávila *et al.* (2001) realizaron evaluaciones sobre almacenamiento de C en cuatro SAF, en andisoles de Costa Rica. Reportaron que el sistema que almacenó más C fue café – *Erythrina poeppigiana*, de 10 años (195 Mg C·ha<sup>-1</sup>); seguido de café-*Eucalyptus deglupt*, de ocho años (169 Mg C·ha<sup>-1</sup>); *Brachiaria brizantha*-*Acacia mangium*, de tres años (96 Mg C·ha<sup>-1</sup>); y *B. brizantha*-*E. deglupta*, de tres años (95 Mg C·ha<sup>-1</sup>). Al comparar los reservorios de C de biomasa aérea y materia orgánica del suelo, a 0.25 m de profundidad, más de 90 % del C se encontró en este último. Concluyeron que el suelo es el principal reservorio y que la cantidad de C almacenado en cada SAF depende del clima, de las condiciones edáficas y del manejo que se brinde al sistema.

El presente estudio se realizó con el objetivo de estimar el almacén de carbono en sistemas agroforestales cuyo componente principal es el café en la región de Huatusco, Veracruz, México, a fin de obtener información cuantitativa acerca del potencial de mitigación de carbono por medio de los sistemas agroforestales de la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio la comprenden localidades del municipio de Huatusco. Además se realizaron muestreos en los municipios de Chocamán y Totutla todos en el estado de Veracruz, México.

round biomass ranged between 41 and 75 Mg C·ha<sup>-1</sup>, with the largest amount found in trees, which was five times greater than that stored by shrubs and herbs. C distribution in this sink showed wide variations by type of tree species, density, management regimes and system age.

Other carbon sequestration experiments have been developed by the Scolel té project in the Tzeltal and Tzotzil areas of Chiapas. De Jong *et al.* (1997) estimate that C-sequestration potential of agroforestry systems in subtropical and tropical zones may range from 40 to 80 and 60 to 140 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectively. Balbontín *et al.* (2009) reported that soil organic carbon content in different climatic groups in Mexico ranges from 34.75 Mg C·ha<sup>-1</sup> (very dry and semi-warm climate) to 168.9 Mg C·ha<sup>-1</sup> (wet tropical climate with rain all year).

Callo-Concha (2001), in a study conducted in the Peruvian Amazon, reported that the greatest C amount was found in the soil. Home garden, shade coffee and silvopastoral systems store 196, 193 and 120 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectively, of which over 58 % is in the soil. The author concluded, moreover, that trees are also an important sink, holding 30 % of stored C.

Ávila *et al.* (2001) assessed C levels in four AFS in andosols in Costa Rica. They reported that a 10-year-old coffee-*Erythrina poeppigiana* system stored the most C (195 Mg C·ha<sup>-1</sup>), followed by an eight-year-old coffee-*Eucalyptus deglupt* system (169 Mg C·ha<sup>-1</sup>), a three-year-old *Brachiaria brizantha*-*Acacia mangium* system (96 Mg C·ha<sup>-1</sup>) and a three-year-old *B. brizantha*-*E. deglupta* system (95 Mg C·ha<sup>-1</sup>). When comparing the C pools in aboveground biomass and soil organic matter up to 0.25 m in depth, over 90 % of the stored C was found in the latter. They concluded that the soil is the main sink and that the amount of C stored in each AFS depends on climate, soil conditions and management system used.

This study was conducted with the aim of estimating carbon stocks in coffee-based agroforestry systems in the Huatusco region of Veracruz, Mexico, in order to obtain quantitative data on the potential for carbon mitigation through agroforestry systems in the region.

## MATERIALS AND METHODS

The study area includes locations in the municipality of Huatusco, state of Veracruz, Mexico. In addition, samples were collected in the municipalities of Chocamán and Totutla, also located in Veracruz.

**Agroforestry systems selected.** The most common and important agroforestry systems, based on cultural, economic, ethnic and other criteria, were considered. According to Callo-Concha (2001), it was also necessary to conduct sampling in two undisturbed primary forest systems, which have untouched flora and thus provide

**Sistemas agroforestales seleccionados.** Se consideraron los SAF más frecuentes y relevantes (criterios culturales, económicos, étnicos, etc.). De acuerdo con Callo-Concha (2001), fue además necesario realizar un muestreo en dos sistemas bosque primario no intervenido, el cual mantiene su flora inalterada y da una idea de la cantidad de carbono que puede almacenar un ecosistema en condiciones clímax, y un terreno bajo roza-tumba-quema, que en el momento de realizar el estudio se encontraba en su última etapa con un uso para la producción pecuaria, el cual se denominará como potrero, cuyas características destacables eran deforestación, suelo compactado, con procesos de lixiviación y varios años de aprovechamiento. Ambos sistemas sirvieron de referencia, al compararlos con los otros sistemas agroforestales.

En los 12 sitios seleccionados, se evaluaron 24 parcelas con cuatro repeticiones de 100 m<sup>2</sup> cada una. De éstas, 18 fueron de sistemas agrosilvopastoriles, cuatro para bosque y dos para potrero.

**Muestreo.** El tamaño de los sitios de muestreo se representa en la Figura 1, donde el rectángulo mayor (4 m x 25 m) aplica al muestreo de especies arbóreas de tallos leñosos, el rectángulo mediano (1 m x 1 m) aplica a las herbáceas y en el cuadro menor (0.5 m x 0.5 m) se muestrean la vegetación de hojarascas y mantillo de suelo. La metodología empleada para el establecimiento de tales parcelas se ajustó según lineamientos técnicos descritos por diferentes autores para estudios ecológicos e inventarios de biomasa en bosques y sistemas agroforestales (IPCC, 2001; Lamprecht, 1990; MacDiken, 1997; Rüginitz et al., 2009; Woomeer y Palm, 1993).

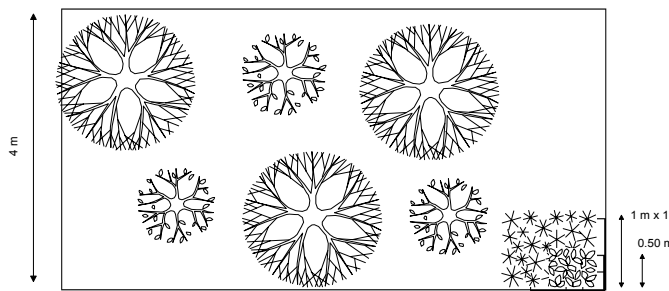


FIGURA 1. Tamaño de las parcelas de muestreo.

an idea as to how much carbon can be stored in a climax ecosystem, and a land tract under slash and burn, which at the time of the study was in its last stage, namely livestock production, and which will be referred to as grazing land, the most notable characteristics of which were deforestation, compacted soil with leaching and several years of use. Both systems were used as a reference, to compare them with the other agroforestry systems.

In the 12 sites selected, 24 plots with four replicates of 100 m<sup>2</sup> each were assessed. Of these, 18 were agrosilvopastoral systems, four forests and two grazing lands.

**Sampling.** The size of the sampling sites is depicted in Figure 1, where the large rectangle (4 m x 25 m) applies to the sampling of woody tree species, the medium rectangle (1 m x 1 m) to herbs and the small square (0.5 m x 0.5 m) to litter. The methodology for establishing these plots was adjusted according to technical guidelines described by different authors for ecological studies and biomass inventories in forests and agroforestry systems (IPCC, 2001; Lamprecht, 1990; MacDiken, 1997; Rüginitz et al., 2009; Woomeer and Palm, 1993).

**Carbon in trees (T) and shrubs (S).** In the 100 m<sup>2</sup> plots, tree diameters were measured at a height of 1.3 m, whose diameter value was equal to or greater than 2.5 cm at a height of 1.3 m; height was measured from the ground to the tip of each tree.

In 100 m<sup>2</sup> plots, coffee, which was taken as a shrub, was measured; tree and shrub biomass was calculated using allometric models developed by different authors (Table 1).

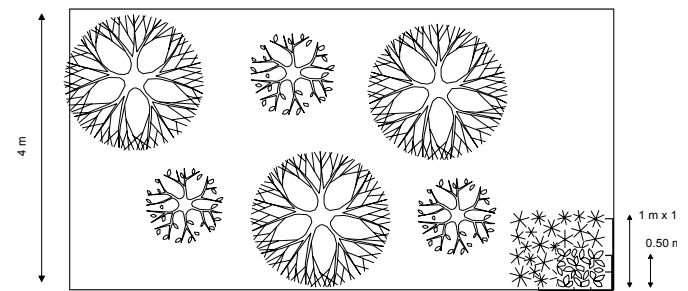


FIGURE 1. Size of sampling plots.

CUADRO 1. Modelos alométricos empleados en la estimación de biomasa arbórea y arbustiva, en sistemas agroforestales de café bajo sombra.

Especie	Ecuación alométrica	R <sup>2</sup>	Fuente
Mangle	$Y = \exp [-2.977 + \ln (r D^2 H)]$	0.99	Chave et al., 2005
Palmas	$Y = 10 + 6.4(H)$	0.96	Frangi y Lugo, 1985
<i>Musa</i> sp.	$Y = 0.0303D^{2.1345}$	0.99	Hairiah et al., 2001
<i>Citrus sinensis</i>	$Y = 6.64 + 0.279(AB) + 0.000514(AB)^2$	0.94	IPCC, 2001
<i>Coffea arabica</i>	$Y = 0.2811D^{2.0635}$	0.94	Hairiah et al., 2001

Y: biomasa, en kg·(árbol)<sup>-1</sup>; D: diámetro normal, en cm, a 1.3 m; H: altura total, en m.

r: densidad de la madera, en g·cm<sup>-3</sup>; AB: área basal, en cm<sup>2</sup>.

**TABLE 1. Allometric models used to estimate tree and shrub biomass in shaded coffee agroforestry systems.**

Species	Allometric equation	R <sup>2</sup>	Source
Mangrove	$Y = \exp [-2.977 + \ln (r D^2 H)]$	0.99	Chave <i>et al.</i> , 2005
Palms	$Y = 10 + 6.4(H)$	0.96	Frangi and Lugo, 1985
<i>Musa</i> sp.	$Y = 0.0303D^{2.1345}$	0.99	Hairiah <i>et al.</i> , 2001
<i>Citrus sinensis</i>	$Y = 6.64 + 0.279(AB) + 0.000514(AB)^2$	0.94	IPCC, 2001
<i>Coffea arabica</i>	$Y = 0.2811D^{2.0635}$	0.94	Hairiah <i>et al.</i> , 2001

Y: biomass, in kg·(tree)<sup>-1</sup>. D: diameter at breast height, in cm, at 1.3 m. H: total height, in m.  
r: wood density, in g·cm<sup>3</sup>. BA: basal area, in cm<sup>2</sup>.

**Carbono en árboles (A) y arbustos (arb).** En las parcelas de 100 m<sup>2</sup> se midieron los diámetros de los árboles a la altura de 1.3 m, cuyo valor de diámetro fuese igual o mayor de 2.5 cm a una altura de 1.3 m; la altura se midió desde la base del suelo hasta la punta de cada árbol.

En parcelas de 100 m<sup>2</sup> se midió el café, el cual se tomó como arbusto; la biomasa arbórea y arbustiva se calculó con los modelos alométricos desarrollados por diferentes autores (Cuadro 1).

Para el caso de plátano, se emplearon modelos alométricos específicos. Estos modelos usan las variables diámetro normal (DN), altura (h) y densidad de la madera (ρ); los datos de densidad se obtuvieron de Brown (1997) y Cordero y Boshier (2003). Se asumió,

For banana, specific allometric models were used. These models use the variables diameter at breast height (DBH), height (h) and wood density (ρ); density data were obtained from Brown (1997) and Cordero and Boshier (2003). It was assumed, by convention, the value 0.5 as the carbon factor for calculating total carbon content in tree and shrub biomass (IPCC, 2001). In this study, general formulas were used for cloud forest species, as shown in Table 2 (Brown *et al.*, 1989).

**Carbon in herbs (Hb).** Two 1 x 1 m quadrants were chosen randomly in each of the four 4 x 25 m subplots. All epigeal biomass was cut off from shrubs with a cover diameter of less than 2.5 cm, as was the biomass of the herbaceous vegetation. Samples were taken to the laboratory in plastic bags. At the laboratory, total fresh weight

**CUADRO 2. Modelos alométricos para estimar la biomasa sobre el suelo del componente leñoso, con datos de inventarios forestales (Brown *et al.*, 1989).**

Tipo de clima	Ecuación	R <sup>2</sup> ajustado
Seco (< 1500 mm·año <sup>-1</sup> )	$y = 34,4703 - 8,0671 D + 0,6589 D^2$	0.67
Húmedo (1500 – 4000 mm·año <sup>-1</sup> )	$y = 38,4908 - 11,7883 D + 1,1926 D^2$	0.78
	$y = \exp [-3,1141 + 0,9719 \ln(D^2H)]$	0.97
	$y = \exp [-2,4090 + 0,9522 \ln(D^2HS)]$	0.99
Lluvioso (> 4000 mm·año <sup>-1</sup> )	$y = 13,2579 - 4,8945 D$	0.90
	$y = \exp [-3,3012 + 0,9439 \ln(D^2H)]$	0.90

y : biomasa sobre el suelo, (kg MS·árbol<sup>-1</sup>), H: altura (m), D: diámetro a la altura del pecho (1.3 m) (cm), S : densidad de la madera (t·m<sup>-3</sup>).

**TABLE 2. Allometric models for estimating aboveground biomass in the woody component, with forest inventory data (Brown *et al.*, 1989).**

Climate type	Equation	Adjusted R <sup>2</sup>
Dry (< 1500 mm·year <sup>-1</sup> )	$y = 34,4703 - 8,0671 D + 0,6589 D^2$	0.67
Humid (1500 – 4000 mm·year <sup>-1</sup> )	$y = 38,4908 - 11,7883 D + 1,1926 D^2$	0.78
	$y = \exp [-3,1141 + 0,9719 \ln(D^2H)]$	0.97
	$y = \exp [-2,4090 + 0,9522 \ln(D^2HS)]$	0.99
Rainy (> 4000 mm·year <sup>-1</sup> )	$y = 13,2579 - 4,8945 D$	0.90
	$y = \exp [-3,3012 + 0,9439 \ln(D^2H)]$	0.90

y: aboveground biomass (kg DM·tree<sup>-1</sup>), H: height (m), D: diameter at breast height (1.3 m), S: wood density (t·m<sup>-3</sup>).

por convención, el valor de 0.5 como factor de carbono para el cálculo de contenido de carbono total presente en la biomasa arbórea y arbustos (IPCC, 2001). En el presente estudio, para las especies del bosque de niebla se utilizaron fórmulas generales, como las que se indican en el Cuadro 2 (Brown *et al.*, 1989).

**Carbono en hierbas (Hb).** Se eligieron al azar dos cuadrantes, de 1 x 1 m, en cada una de las cuatro subparcelas de 4 x 25 m. Se cortó toda la biomasa epígea de los arbustos con diámetro de copa menor de 2.5 cm y la biomasa de la vegetación herbácea. Las muestras se trasladaron hasta el laboratorio en bolsas de plástico. Ya en laboratorio, se obtuvo el peso fresco total y con una submuestra de 500 g, previamente secada a 70 °C, se determinó el peso seco de cada material colectado (Rügnitz *et al.*, 2009).

**Carbono en ramas caídas en el suelo (RCS).** Se calculó el volumen de ramas caídas en el suelo a través del método de intersección planar, propuesto por Van Wagner (1968), sobre estimaciones de volúmenes de ramas caídas en superficies forestales. Se muestrearon cuatro transectos de 25 m cada uno, dentro de la parcela de 1,000 m<sup>2</sup>, y en ese muestreo se cuantificaron ramas caídas con diámetros mayores de 3 cm según los siguientes criterios: fresco, seco y descompuesto; el volumen se calculó con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi^2 \sum d^2}{200}$$

Donde: V: volumen (m<sup>3</sup>), d: diámetro de la rama, (m).

Para estimar la densidad, se tomó una muestra de las ramas evaluadas y se secó a 70 °C, para registrar el peso seco; con estos valores y la estimación del volumen se calculó la densidad de ramas.

**Carbono en hojarasca (H).** La hojarasca comprende todos los residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos y semillas) sobre la superficie del suelo. La cuantificación de este componente consiste en pesar todo el material vegetal encontrado y la toma de una muestra para determinar la humedad a 70 °C y poder reportar los valores con base en peso seco.

Dentro de los cuadrantes de 1 x 1 m se delimitaron subcuadrantes de 0.5 x 0.5 m, en los cuales se colectó y pesó la hojarasca acumulada; después se tomó una submuestra de 500 g y se transportó en bolsas de plástico. En el laboratorio, la submuestra se colocó en bolsa de papel y se secó a 70 °C, hasta obtener un peso constante. El contenido de carbono, en cada fuente de biomasa, se estimó al asumir un factor de 0.5 del total de la biomasa es carbono.

**Carbono en la materia orgánica del suelo (MOS).** En los mismos sitios donde se recolectó el mantillo, se tomaron muestras de suelo con una barrena tipo Hoffer

was obtained and, with a 500-g subsample previously dried at 70 °C, dry weight was determined for each material collected (Rügnitz *et al.*, 2009).

**Carbon in fallen branches on the ground (FBG).** Wood volume on the ground was calculated using the line intersect method, proposed by Van Wagner (1968), on volume estimates of fallen branches in forest areas. Four 25-m transects within the 1,000 m<sup>2</sup> plot were sampled, and in this sampling all fallen branches with diameters greater than 3 cm were quantified using the following criteria: fresh, dry and decomposed; volume was calculated using the following equation:

$$V = \frac{\pi^2 \sum d^2}{200}$$

Where: V: volume, (m<sup>3</sup>); d: branch diameter, (m).

To estimate density, a sample of the evaluated branches was taken and dried at 70 °C to record dry weight; with these values and the volume estimate, branch density was calculated.

**Carbon in litter (L).** Litter includes all organic residues (leaves, branches, fruits and seeds) on the ground. This component was quantified by weighing all plant material found and taking a sample to determine moisture content at 70 °C, which enabled reporting the values based on dry weight.

Within the 1 x 1 m quadrants, 0.5 x 0.5 m sub-quadrants were delimited, and the accumulated litter within each one was collected and weighed. Then 500-g subsamples were taken and transported in plastic bags to the laboratory, where the subsamples were placed in paper bags and dried at 70 °C until constant weight. Carbon content in each biomass source was estimated by assuming a factor of 0.5 of total biomass is carbon.

**Carbon in soil organic matter (SOM).** In the same sites where litter was collected, soil samples were taken with a Hoffer soil auger and a composite sample per plot, from 0 to 30 cm deep, was formed. Organic matter was analyzed using the wet combustion method, while bulk density was measured for each sample using the method reported by Anderson and Ingram (1993).

---

## RESULTS AND DISCUSSION

**Tree carbon.** Based on the most representative agroforestry systems (AFS) of the region, three commercial plantation systems were evaluated: coffee-macadamia, coffee-pink cedar and coffee-banana; a silvopastoral system: cattle + pasture + colorín (*Erythrina americana*) or huisache (*Acacia farnesiana*); a traditional plantation system: coffee + *Inga spuria* and two systems, the deciduous forest and grazing land, for comparative purposes.

y se conformó una muestra compuesta por parcela, de 0 a 30 cm de profundidad. El análisis de materia orgánica fue con el método de combustión húmeda. En cada muestra se midió la densidad aparente, con el método reportado por Anderson e Ingram (1993).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Carbono arbóreo.** De acuerdo con los sistemas agroforestales (SAF) más representativos de la región, se evaluaron tres sistemas de plantaciones comerciales: café-macadamia, café-cedro rosado y café-plátano; un sistema silvopastoril: bovinos + pasto + colorín o huizache; un sistema de plantación tradicional: café + chalahuite y dos sistemas, de referencia, el bosque caducifolio y el potrero.

En el bosque primario (BoP) se encontró la mayor cantidad de carbono, con 266 Mg C·ha<sup>-1</sup>, y en el tratamiento potrero (P), al no haber especies arbóreas, no se registraron datos para este tratamiento. El sistema agroforestal que presentó la mayor cantidad de carbono aéreo, fue el tratamiento café + cedro rosado (Ca + Ce) con 114 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Seguidos de este, se presentan, de mayor a menor, los siguientes sistemas: café -macadamia (Ca + Ma), con 34 Mg C·ha<sup>-1</sup>; café + chalahuite (Ca

The most carbon, 266 Mg C·ha<sup>-1</sup>, was found in the primary forest (PF), whereas in the grazing land (G), by not having any tree species, no data was recorded. The agroforestry system with the highest amount of above-ground carbon was coffee + pink cedar (Co + Ce), with 114 Mg C·ha<sup>-1</sup>, followed in descending order by these systems: coffee + macadamia (Co + Ma), with 34 Mg C·ha<sup>-1</sup>; coffee + *Inga spuria* (Co + In), with 29 Mg C·ha<sup>-1</sup>; coffee + banana (Co + Ba), with 27 Mg C·ha<sup>-1</sup>; and lastly the silvopastoral system (Sp), with 2 Mg C·ha<sup>-1</sup> (Table 3).

To evaluate the coffee-based agroforestry systems, similar edaphoclimatic and altitude conditions were sought; however, they present marked variations in tree carbon. This is mainly due to the heterogeneity of the plantations, related to planting density, technical agricultural management and plantation age. The Sp system is subject to constant cattle grazing and the low number of trees allows the grasses to grow, which is why a minor amount of carbon was obtained. In the Co + Ba system, one must take into account that the product obtained is the banana leaf, which is subject to constant pruning and intensive plantation management. As for Co + In and Co + Ma, they are specialized systems. The former is a traditional system whose main product is coffee; *Inga spuria* prunings are necessary in this system and overgrowth of

**CUADRO 3.** Cantidad de carbono almacenado en el sustrato aéreo arbóreo, herbáceo y de hojarasca, en cada sistema agroforestal de uso del suelo.

Sistema agroforestal	Carbono almacenado (Mg C·ha <sup>-1</sup> )			
	Arbóreo	Herbáceo	hojarasca	Total
Silvopastoril (Sp)	2	0.6	1.2	3
Bosque caducifolio (BoP)	266	0.6	1.9	269
Café + Chalahuite (Ca+Ch)	29	0.0	1.9	31
Café + Macadamia (Ca+Ma)	34	0.0	0.9	35
Café + Cedro Rosado (Ca + Ce)	114	0.1	0.3	115
Café + Plátano (Cs + Pl)	27	0.0	1.0	28
Potrero (P)	0	1.8	0.0	2

Arbóreo (arboles vivos y muertos), Herbáceo (arbustos y hierbas)

**TABLE 3.** Amount of carbon stored in the aboveground tree, herbaceous and litter layers in each agroforestry land-use system.

Agroforestry systems	Carbon stocks (Mg C·ha <sup>-1</sup> )			
	Tree	Herbs	Litter	Total
Silvopastoral (Sp)	2	0.6	1.2	3
Deciduous forest (PF)	266	0.6	1.9	269
Coffee + <i>Inga spuria</i> (Co + In)	29	0.0	1.9	31
Coffee + Macadamia (Co + Ma)	34	0.0	0.9	35
Coffee + Pink Cedar (Co + Ce)	114	0.1	0.3	115
Coffee + Banano (Co + Ba)	27	0.0	1.0	28
Grazing land (G)	0	1.8	0.0	2

Tree (living and dead trees), Herbs (shrubs and herbs)

+ Ch), con 29 Mg C·ha<sup>-1</sup>; café + plátano (Ca + PI), con 27 Mg C·ha<sup>-1</sup>; y por último, el sistema silvopastoril (Sp), con 2 Mg C·ha<sup>-1</sup> (Cuadro 3).

Para la evaluación de los sistemas agroforestales con base en café, se buscó la similitud de condiciones edafoclimáticas y de altitud; sin embargo, se presentan variaciones muy marcadas de C arbóreo. Esto se debe, principalmente, a la heterogeneidad de las plantaciones, relacionada con la densidad de plantación, el manejo técnico-agrícola y la edad de la plantación. El tratamiento Sp está sometido al constante ramoneo de los bovinos y a un bajo número de árboles que permite el crecimiento de los pastos, por ello se obtuvo una menor cantidad de carbono. En el tratamiento Ca + PI se debe tomar en cuenta que el producto obtenido de este sistema es la hoja de plátano (velillo), por lo cual está sometido a la constante poda y manejo intensivo de la plantación. En cuanto a Ca + Ch y Ca + Ma, representan sistemas especializados; el primero es un sistema tradicional, cuyo principal producto es el café; las podas de chalahuite se hacen necesarias en este sistema y no se permite el crecimiento excesivo de los árboles; en el segundo, se obtiene como producto café y macadamia; los árboles de macadamia que se encontraron fueron desde cinco hasta 20 años de edad. El tratamiento Ca + Ce fue el que presentó la mayor cantidad de C, de los sistemas sometidos a manejo agropecuario, debido a que el cedro tiene un rápido crecimiento, superior al de las demás especies que se encuentran en asociación con café.

Otros factores importantes que influyen sobre las cantidades de biomasa encontradas en el componente arbóreo fueron el patrón de crecimiento, la dinámica de regeneración y la emergencia múltiple. Esos factores dependen del tipo de especies.

En el café los patrones de crecimiento dependen de la variedad utilizada. Es frecuente encontrar de tres a nueve ramificaciones, abajo del diámetro a la altura del pecho, aspecto que influye en los valores que generan los modelos de estimación de biomasa.

Como lo señala Rajagopal (2004), la dinámica de regeneración puede afectar también las reservas de CO<sub>2</sub>, como es el caso del plátano y su hábito para regenerar hijuelos, que sumados a su capacidad de crecimiento puede afectar fuertemente la cantidad de biomasa producida. La emergencia múltiple, en el caso del café, se presenta cuando dos o más individuos emergen en un mismo nicho.

**Carbono herbáceo.** El mayor contenido de carbono herbáceo se encontró en el tratamiento P; esto se debe principalmente a la presencia de pastos, expuestos a la luz solar. Los siguientes sistemas con mayor cantidad de biomasa fueron los tratamientos Bop y Sp, que presentaron valores de 0.6 Mg C·ha<sup>-1</sup> en ambos. Cabe

the trees is not permitted. In the latter, coffee and macadamia are obtained as products; the macadamia trees encountered were between 5 to 20 years of age. The Co + Ce system had the most C of the systems under agricultural management, because pink cedar has a faster growth rate than the other species mixed with coffee.

Other important factors influencing the biomass amounts found in the tree component were growth pattern, regeneration dynamics and multiple emergence. These factors depend on the type of species.

In coffee, growth patterns depend on the variety used. It is common to find three to nine branches, below diameter at breast height, an aspect that influences the values generated by biomass estimation models.

As pointed out by Rajagopal (2004), regeneration dynamics can also affect CO<sub>2</sub> stocks, as in the case of banana and its habit of regenerating plantlets, which added to its capacity for growth can strongly affect the amount of biomass produced. Multiple emergence, in the case of coffee, occurs when two or more individuals emerge in the same niche.

**Carbon in herbs.** The highest amount of herbaceous carbon was found in the grazing land, mainly due to the presence of grasses exposed to sunlight. The PF and Sp systems had the most biomass, with a value of 0.6 Mg C·ha<sup>-1</sup> in both. It should be noted that although the forest has a high tree density, some herbs can be found as a result of clearings opened by the fall of trees and branches, and by being a deciduous forest, temperature, humidity and light conditions allow the rapid growth of dormant seeds in the soil. Table 3 shows no herbaceous C data for the Co + In, Co + Ma and Co + Ba systems, because the tree and shrub components impede herb growth and the amount of litter produced by them.

**Litter carbon.** The PF and Co + In systems had the highest amount of litter C, with 1.9 Mg C·ha<sup>-1</sup>. *Inga spuria* is a widely-used species in traditional AFS due to its ecological benefits (shade, biological nitrogen fixation, litter, etc.), a characteristic that stands out in the findings of this assessment, having a litter production similar to that of the forest. In the Sp system, cattle are rotated in the subdivisions of the pasture, allowing the grass left over to be incorporated as litter. In the G system, the carbon value was close to zero, due to intensive management; therefore, the formation of litter is also low or quickly decomposes into soil.

**Total carbon in aboveground biomass.** The highest total carbon value for aboveground biomass was recorded in the PF system, with 269 Mg C·ha<sup>-1</sup> (Table 3); because it is a preserved primary forest, that value was expected. Of the agroforestry systems evaluated, the Co + Ce system had the largest C stock with 115 Mg C·ha<sup>-1</sup>. The correlation between tree and total carbon, with a



mencionar que si bien el bosque tiene alta densidad de árboles, se pueden encontrar algunas hierbas, producto de claros abiertos por la caída de árboles y ramas, y al ser bosque caducifolio las condiciones de temperatura, humedad y luz permiten el rápido crecimiento de semillas latentes en el suelo. En el Cuadro 3 se observa que no hay datos de C herbáceo para los tratamientos Ca + Ch, Ca + Ma y Ca + Pl, debido a que los componentes arbóreo y arbustivo impiden el crecimiento de hierbas y a la cantidad de hojarasca producida por los mismos.

**Carbono en hojarasca.** Los tratamientos BoP y Ca + Ch presentaron la mayor cantidad de C en hojarasca, con 1.9 Mg C·ha<sup>-1</sup>. El chalahuite es una especie muy utilizada en los SAF tradicionales, debido a la incorporación de materia orgánica, característica que resalta en lo obtenido en esta evaluación, al tener una producción de hojarasca similar en el bosque. En el tratamiento Sp las vacas pastoreadas se rotan en las subdivisiones del potrero, lo que permite que los restos de pasto se incorporen como mantillo. En el tratamiento P, la cuantificación de la hojarasca presentó un valor de carbono cercano a cero, debido al manejo intensivo; por lo tanto, la formación de mantillo también es baja o se incorpora rápidamente al suelo.

**Carbono total de la biomasa aérea.** El mayor valor obtenido del carbono total de la biomasa aérea fue el del tratamiento BoP, con 269 Mg C·ha<sup>-1</sup> (Cuadro 3); por tratarse de un bosque primario conservado, era de esperarse ese valor. En los sistemas agroforestales evaluados, el tratamiento Ca + Ce con 115 Mg C·ha<sup>-1</sup> representó el sistema con mayor valor de C acumulado. La correlación entre el carbono arbóreo y el total, con una r<sup>2</sup> de 0.99, es reiterada en este apartado, ya que ambas fuentes de biomasa siguen el mismo patrón de acumulación y distribución.

**Carbono en el suelo.** De acuerdo con los resultados, el tratamiento Ca + Pl fue el que presentó mayor contenido de carbono en el suelo, con 73 Mg C ha<sup>-1</sup>, y el menor valor se encontró en el tratamiento P, con 50

R<sup>2</sup> of 0.99, is reiterated in this section, as both biomass sources follow the same pattern of accumulation and distribution.

**Soil carbon.** Based on the results, the Co + Ba system had the highest soil carbon content, with 73 Mg C·ha<sup>-1</sup>, while the lowest amount was found in the G system, with 50 Mg C·ha<sup>-1</sup>. The primary forest had the most carbon stored, with a total of 86 Mg C·ha<sup>-1</sup>, representing 24 % of the total held by the system (Tables 4 and 5).

If the value of 126.33 Mg C·ha<sup>-1</sup> for a semitropical climate with summer rains, reported by Balbontín *et al.* (2009), is compared with the data in Table 4, where a range of 50 to 86 Mg C·ha<sup>-1</sup> is shown, a marked difference is apparent which is attributable to land use and management. Agroforestry systems contribute to higher organic C storage. The primary forest system sequestered the most carbon, representing up to 3.2 times the amount in the coffee + macadamia system; this factor could be used as an indicator of the important role played by cloud forests in capturing and retaining C.

Of the total carbon found in the systems assessed, the Co + Ce mixture showed the highest value, with 172 Mg C·ha<sup>-1</sup>, while grazing land had the lowest amount with 52 Mg C·ha<sup>-1</sup> (Table 5).

The suggested carbon fixing scenarios refer to C gain, in the form of CO<sub>2</sub>, which accumulates in above-ground biomass and soil organic matter in an agroforestry system, compared with a monoculture. Table 6 shows the results of this comparison. The Co + Ce system shows a gain of 145 Mg C·ha<sup>-1</sup>, a value which exceeds that of the other systems.

As seen in Table 6, the C gain in agroforestry systems is evident. Except for the silvopastoral system, combining two or more species in a system contributes to a greater C amount, which is confirmed in this evaluation.

The total carbon amounts for the primary forest are similar to those reported by Callo-Concha (2001) in natu-

**CUADRO 4. Carbono orgánico en los suelos de los sistemas agroforestales en Huatusco, Veracruz.**

Sistema (Tratamientos)	C.B.A. (Mg·ha <sup>-1</sup> )	Prof. suelo (m)	D. Ap. (g·cm <sup>-3</sup> )	M.O. (%)	C.O.S. (Mg·ha <sup>-1</sup> )
Silvopastoral (Sp)	3	0.30	0.91	3.90	62
Bosque caducifolio (BoP)	269	0.30	0.74	6.70	86
Café + Chalahuite (Ca + Ch)	31	0.25	1.12	3.35	54
Café + Macadamia (Ca + Ma)	35	0.25	0.83	4.14	50
Café + Cedro rosado (Ca + Ce)	115	0.30	0.88	3.82	58
Café + Plátano (Ca + Pl)	28	0.30	0.90	4.68	73
Potrero (P)	2	0.30	0.92	3.12	50

C.B.A. Carbono en biomasa aérea, D. ap: Densidad aparente del suelo, M.O.: % de materia orgánica del suelo y C.O.S.: carbono orgánico en el suelo.

**TABLE 4. Organic carbon in agroforestry system soils in Huatusco, Veracruz.**

System (Treatments)	C.A.B (Mg·ha <sup>-1</sup> )	Soil Depth (m)	D. Ap. (g·cm <sup>-3</sup> )	S.O.M. (%)	S.O.C. (Mg·ha <sup>-1</sup> )
Silvopastoral (Sp)	3	0.30	0.91	3.90	62
Deciduous forest (PF)	269	0.30	0.74	6.70	86
Coffee + <i>Inga spuria</i> (Co + In)	31	0.25	1.12	3.35	54
Coffee + Macadamia (Co + Ma)	35	0.25	0.83	4.14	50
Coffee + Pink Cedar (Co + Ce)	115	0.30	0.88	3.82	58
Coffee + Banano (Co + Ba)	28	0.30	0.90	4.68	73
Grazing land (G)	2	0.30	0.92	3.12	50

C.A.B. Carbon in aboveground biomass, B.D.: bulk density of the soil, S.O.M.: % of soil organic matter and S.O.C.: soil organic carbon.

**CUADRO 5. Carbono total para sistemas agroforestales en Huatusco, Veracruz.**

Sistema (Tratamientos)	C aéreo	C suelo (Mg·ha <sup>-1</sup> )	C total
Silvopastoral (Sp)	3	62	65
Bosque caducifolio (BoP)	269	86	355
Café + Chalahuite (Ca + Ch)	31	54	85
Café + Macadamia (Ca + Ma)	35	50	85
Café + Cedro rosado (Ca + Ce)	114	58	172
Café + Plátano (Ca + Pl)	28	73	101
Potrero (P)	2	50	52

**TABLE 5. Total carbon for agroforestry systems in Huatusco, Veracruz.**

System (Treatments)	Aboveground C	Soil C (Mg·ha <sup>-1</sup> )	Total C
Silvopastoral (Sp)	3	62	65
Deciduous forest (PF)	269	86	355
Coffee + <i>Inga spuria</i> (Co + In)	31	54	85
Coffee + Macadamia (Co + Ma)	35	50	85
Coffee + Pink Cedar (Co + Ce)	114	58	172
Coffee + Banano (Co + Ba)	28	73	101
Grazing land (G)	2	50	52

Mg C·ha<sup>-1</sup>. El bosque primario representó el sistema que mayor cantidad de carbono almacenó, con un total de 86 Mg·C ha<sup>-1</sup>, representando 24 % del total que tiene el sistema (Cuadros 4 y 5).

Si el valor de 126.33 Mg C·ha<sup>-1</sup>, para la condición climática semitropical con lluvias en verano, reportado por Balbonlín *et al.* (2009), se compara con los datos reportados en el Cuadro 4, en este último caso se registró un intervalo de 50 a 86 Mg de C·ha<sup>-1</sup>, diferencias que son atribuibles al uso y manejo de los suelos. Los sistemas agroforestales son métodos de producción que contribuyen a un mayor almacenaje del C orgánico. El sistema de bosque primario fue el que más carbono secuestrado tuvo, representando hasta 3.2 veces más

ral systems in the Peruvian Amazon, where reported values are 46 and 96 Mg C·ha<sup>-1</sup> for aboveground biomass and soil, respectively. They are also similar to those reported by Herrera *et al.* (2001), who report 111 Mg C·ha<sup>-1</sup> in primary forests in Colombia. In the agroforestry systems assessed, although there are differences in species and topological arrangements, the results resemble those presented by Rajagopal (2004) and Aguirre (2006). In coffee-based systems with citrus plantations and others with different vegetation types, C densities per system in living biomass and soil organic matter are similar to those reported by Ávila (2001), Callo-Concha (2001) and Rajagopal (2004), in shaded coffee systems, in Costa Rica, Peru and Mexico, respectively. In the case

que el sistema café + macadamia; este factor se podría usar como un indicador de la importancia del papel que desempeñan los bosques de neblina en la captura y retención de C.

Del carbono total encontrado en los sistemas evaluados, el Tratamiento Ca + Ce presentó el mayor valor, con 172 Mg C·ha<sup>-1</sup>, mientras que el tratamiento que presentó la menor cantidad de carbono total fue el P, con 52 Mg C·ha<sup>-1</sup> (Cuadro 5).

Los escenarios sugeridos de fijación de carbono se refieren a la ganancia de C, en forma de CO<sub>2</sub>, que se acumula en la biomasa aérea y la materia orgánica del suelo de un sistema agroforestal, en comparación con

of aboveground biomass reported for systems involving citrus plantations with coffee and citrus plantations with coffee and banana, in the Mexican humid tropics the former system stored 57 Mg C·ha<sup>-1</sup> and the latter 62 Mg C·ha<sup>-1</sup>, while soil organic matter (SOM) was 128 and 132 Mg C·ha<sup>-1</sup> for each agroforestry system, respectively (Rajagopal, 2004). In the Peruvian Amazon in a system with shaded coffee and *Inga spuria*, Callo-Concha (2001) report that 46 and 96 Mg C·ha<sup>-1</sup> were stored in aboveground biomass and SOM, respectively.

Schroth and Sinclair (2003) report that C input through litter is 6 Mg C·ha<sup>-1</sup> in the soil organic matter pool, as a result of the accumulation of litter materials

**CUADRO 6. Ganancia de C de los sistemas agroforestales en Huatusco, Veracruz.**

Sistema (Tratamientos)	Monocultivo	Agroforestal	Ganancia
	(Mg C·ha <sup>-1</sup> )		
Silvopastoril (Sp)	65	65	0.00
Bosque caducifolio (BoP)	355	355	0.00
Café + Chalahuite (Ca + Ch)	27	85	58
Café + Macadamia (Ca + Ma)	27	85	58
Café + Cedro rosado (Ca + Ce)	27	172	145
Café + Plátano (Ca+ Pl)	27	101	74
Potrero (P)	52	52	0.00

**TABLE 6. C gain in agroforestry systems in Huatusco, Veracruz.**

System (Treatments)	Monoculture	Agroforestry	Gain
	(Mg C·ha <sup>-1</sup> )		
Silvopastoral (Sp)	65	65	0.00
Deciduous forest (PF)	355	355	0.00
Coffee + <i>Inga spuria</i> (Co + In)	27	85	58
Coffee + Macadamia (Co + Ma)	27	85	58
Coffee + Pink Cedar (Co + Ce)	27	172	145
Coffee + Banana (Co + Ba)	27	101	74
Grazing land (G)	52	52	0.00

un monocultivo. En el Cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos de dicha comparación. El Tratamiento Ca + Ce muestra una ganancia de 145 Mg C·ha<sup>-1</sup>, valor que supera al de los demás tratamientos.

Como se puede observar en el Cuadro 6, la ganancia de C en los sistemas agroforestales es evidente. A excepción del sistema silvopastoril, el combinar dos o más especies en un sistema contribuye a que haya mayor cantidad de C, lo cual se confirma en esta evaluación.

and stems in different stages of decomposition. In turn, litter is one of the most constant components in C amount stored in the systems evaluated.

It can be concluded from the results that conversion to other production systems, such as livestock, would bring serious environmental consequences, such as the release of large CO<sub>2</sub> volumes to the atmosphere. According to Moguel and Toledo (1999), 60 % of coffee-growing areas are under traditional management

Las cantidades de carbono total para el bosque primario son similares a las reportadas por Callo-Concha (2001) en sistemas naturales de la selva peruana, cuyos valores reportados son 46 y 96 Mg C·ha<sup>-1</sup> para biomasa aérea y edáfica, respectivamente. De igual forma, son similares a los reportados por Herrera *et al.* (2001), quienes reportan 111 Mg C·ha<sup>-1</sup>, en selvas primarias de Colombia. En los sistemas agroforestales evaluados, a pesar de existir diferencias en cuanto a especies y arreglos topológicos, los resultados observados se asemejan a los presentados por Rajagopal (2004) y Aguirre (2006). En los sistemas de café con cítricos y café con distintos tipos de vegetación, las densidades de C por sistema en la biomasa viva y la materia orgánica del suelo son similares a las reportadas por Ávila (2001), Callo-Concha (2001) y Rajagopal (2004), en sistemas de café bajo sombra en Costa Rica, Perú y México, respectivamente. En el caso de la biomasa aérea reportada para sistema de cítricos con café y cítricos con café y plátano, en el trópico húmedo mexicano almacenaron 57 Mg C·ha<sup>-1</sup> para el sistema café + cítricos, y para el sistema café + cítricos + plátano almacenó 62 Mg C·ha<sup>-1</sup>, mientras la materia orgánica del suelo (MOS) fue 128 y 132 Mg C·ha<sup>-1</sup> para cada sistema agroforestal, respectivamente (Rajagopal, 2004). En la amazonia peruana en un sistema de café bajo sombra de *Inga spp.*, Callo-Concha (2001) reporta que se almacenó 46 y 96 Mg·ha<sup>-1</sup> en la biomasa aérea y en la MOS, respectivamente.

Schroth y Sinclair (2003) reportan que el aporte de C que realiza el mantillo es de 6 Mg·ha<sup>-1</sup> en el reservorio de materia orgánica edáfica, como resultado de la acumulación de materiales de hojarasca y tallos en diferentes estados de descomposición. A su vez, el mantillo es uno de los compartimientos más constantes en cantidad de C almacenado en los sistemas evaluados.

Con los resultados se puede inferir que la conversión a otros sistemas de producción, como la ganadería, traería serias consecuencias ambientales, como la emisión de grandes volúmenes CO<sub>2</sub> a la atmósfera. De acuerdo con Moguel y Toledo (1999), 60 % de las áreas cafetaleras se encuentra bajo manejo tradicional (420,000 ha); si durante las próximas décadas existieran políticas o crisis económicas que condujeran a la eliminación de 20 % del área cultivada, las emisiones de C a la atmósfera, producto sólo de la quema de los reservorios de biomasa y materia orgánica, alcanzarían el orden de 4 436 880 Mg C, sin incluir los fuertes impactos sobre el suelo, la biodiversidad y regulación hidrológica, entre otros.

## CONCLUSIONES

Los sistemas agroforestales con base en café capturan en promedio 110 t C·ha<sup>-1</sup>, al ser sistemas perennes y con un manejo adecuado. Donde los residuos se incor-

(420,000 ha); if over the coming decades there are policies or economic crises that lead to the elimination of 20 % of the cultivated area, C emissions to the atmosphere, a product only of the burning of biomass stocks and organic matter, would reach the order of 4,436,880 Mg C; in addition, there would be strong impacts on soil, biodiversity and water regulation, among others.

## CONCLUSIONS

The coffee-based agroforestry systems captured on average 110 t C·ha<sup>-1</sup>, being perennial systems with proper management. As long as the residues are incorporated into the soil, these carbon stock levels are assured.

According to the aboveground biomass results in the coffee-based systems, the coffee + pink cedar, coffee + macadamia, coffee + *Inga spuria* and coffee + banana systems store 115, 35, 31 and 28 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectively, with the mature systems showing greater carbon storage than the younger ones.

In the primary forest, C content in aboveground biomass is 269 Mg C·ha<sup>-1</sup>, which is more than double the amount accumulated by the pink cedar system; the forest sequestration rate is higher because it stores as much carbon as possible in aboveground biomass.

In the silvopastoral and grazing land systems, 3 and 2 Mg C·ha<sup>-1</sup> were found in the aboveground biomass, respectively, which are low carbon storage levels compared to systems without the animal component.

*End English version*

poren al suelo se puede asegurar que esta cantidad de carbono almacenado se mantiene.

De acuerdo con los resultados en biomasa aérea de los sistemas que incluyen al café, se encontró que los sistemas café + cedro rosado, café + macadamia, café + chalahuite y café + plátano, almacenan 115, 35, 31 y 28 Mg C·ha<sup>-1</sup>, en ese orden donde los sistemas maduros muestran un incremento en el almacenamiento de carbono, comparado con los sistema más jóvenes.

En el bosque primario, el carbono en biomasa aérea es de 269 Mg C·ha<sup>-1</sup>, lo que representa más del doble de lo que acumuló el sistema de cedro rosado, pero en el bosque la tasa de secuestro es mayor, debido a que éste mantiene en la biomasa aérea la mayor cantidad posible de carbono almacenado.

En los sistemas silvopastoral y potrero se encontró en la biomasa aérea 3 y 2 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En ese orden, es un bajo almacenamiento de carbono, en comparación con los sistemas sin el componente animal.

## LITERATURA CITADA

- Aguirre D., C. M. (2006). *Servicios ambientales: captura de carbono en sistemas de café bajo sombra en Chiapas, México*. México. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.
- Anderson, J. M. & Ingram, J. S. I. (1993). *Tropical soil biology and fertility a handbook of methods*. London, UK . CAB International.
- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería de las Américas* 8(30), 32 - 35.
- Balbondín-Claudio, C., Cruz, C. O., Paz, F. & Etchévers, J. D. (2009). *Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico*. In: Rattan Lal and Ronald F. Follett, (Eds). *Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect*. 2nd edition. Special Publication 57. Madison, WI, USA.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. (FAO Forestry Paper - 134). Rome, Italia. FAO.
- Brown, S. A. J., Gillespie, J. R., & Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with application to forest inventory data. *Forest Science*. 35(4), 881-902.
- Callo-Concha, D. A. (2001). *Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos Ecológicos de la Amazonia del Perú*. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México.
- Chave J., Andalo, C., Brown, S., Cairn, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fosler H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B. & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145, 87-99.
- Cordero, J. & Boshier, D. H. (2003). *Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas*. Costa Rica. Oxford Forestry Institute y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.
- De Jong, B., Masera, O. & Hernández-Tejeda T. (2004). Opciones de captura de carbono en el sector forestal. En: *Cambio Climático: Una visión desde México*. (pp 369-380) México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE).
- De Jong, B., Tipper, R. & Taylor, R. (1997). A Framework for monitoring and evaluation of carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2, 231-246.
- Frangi, J. L. & A. E. Lugo. (1985). Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest. *Ecological Monographs*. 55, 351-369.
- Hairiah, K., Sitompul, S. M., Van Noordwijk, M. & Palm, C. A. (2001). *Carbon stocks of tropical land use systems as part of the global carbon balance: effects of forest conversion and options for clean development activities*. Alternatives to slash-and-burn (ASB) Lecture Note 4. Bogor, Indonesia. ICRAF.
- Herrera M., Del Valle, J. & Orrego, S. (2001). *Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales y secundarios de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. [http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio\\_carbono/28\\_Herrera.PDF](http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/28_Herrera.PDF)
- IPCC, (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Houghton, J. T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge University Press,
- Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos*. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Cooperación Técnica, República Federal de Alemania. Eschborn.
- MacDiken, K. (1997). *A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Arlington, VA, USA. Winrock International Institute for Agriculture Development.
- Moguel, P. & Toledo, V. M. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13 (1), 11 - 21.
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61, 281 – 295.
- Montoya, G. L., Soto P., Jong, B. Nelson, K. Farías, P., Taylor, J. & Tipper, R. (1995). *Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de Carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas*. México, D. F. Instituto Nacional de Ecología, Cuadernos de Trabajo 4.
- Nair, P. K. R. (1993). An introduction to agroforestry. The Netherlands. Kluwer Academic Publishers.

- Oelbermann, M., Voroney, P. R., & Gordon, M. A. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 359 - 377.
- Rajagopal, R. I. (2004). *Estimación del secuestro de carbono en sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano*. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México.
- Rügnitz M. T.; Chacón, L. M. & Porro R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Lima, Perú. Centro Mundial de Agroforestería, Consorcio Iniciativa Amazónica.
- Schroeder, P. (1994). Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27, 89–97.
- Schroth, G., & Sinclair, F. L. (2003). *Trees, crops and soil fertility. Concepts and research methods*. UK. CABI Publishing.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. New York, NY. John Wiley and Sons.
- Van Wagner, C. E. (1968). The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science* 14(1), 20-26.
- Woomer, P. L., & Palm, C. A. (1993). *Shifting cultivation effects of tropical soil organic matter*. Experimental protocol prepared for the Global Initiative for Alternatives to Slash and Burn Agriculture. Nairobi, Kenya. Tropical Soil Biology and Fertility Programme. Mimeografiado.
- Young, A. (1997). *Agroforestry for soil management*. 2da ed. UK. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF).