

# Soil carbon and nitrogen in tropical montane cloud forest, agroforestry and coffee monoculture systems

## Carbono y nitrógeno del suelo en los sistemas bosque mesófilo de montaña, agroforestal y monocultivo de café

David Cristóbal-Acevedo<sup>1\*</sup>; Juan Á. Tinoco-Rueda<sup>2</sup>;  
Jorge V. Prado-Hernández<sup>1</sup>; Elizabeth Hernández-Acosta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México – Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco de Mora, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Oriente. Carretera Huatusco-Xalapa km 6. C. P. 94100. Huatusco, Veracruz, México.

\*Corresponding author: cristobalacevdo@yahoo.com.mx, tel.: +52 (595) 952 1500 ext. 6196

### Abstract

**Introduction:** In natural systems and agroecosystems, the study of soil carbon and nitrogen as a function of the type and magnitude of their plant cover is important because the concentration and content of these elements are related to soil fertility and quality and environmental impact.

**Objective:** To determine the carbon and nitrogen in the soil as a function of the type and magnitude of the plant cover of tropical montane cloud forest (TMCF) systems, full sun coffee monoculture (FSCM), coffee agroforestry system as a traditional polyculture (CASTP) and coffee agroforestry system as a commercial polyculture (CASCP).

**Materials and methods:** Plant covers were characterized and quantified. Soil samples were taken at depths of 0 to 10, 10 to 20 and 20 to 30 cm to determine the concentrations and contents of soil organic carbon (SOC) and nitrogen in its total (Nt), organic (Norg), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) and mineral (Nmin) forms.

**Results and discussion:** The order of magnitude of plant cover was TMCF>CASTP>CASCP>FSCM. The same order was found in SOC (TMCF: 229.33 Mg·ha<sup>-1</sup>, CASTP: 211.03 Mg·ha<sup>-1</sup>, CASCP: 90.95 Mg·ha<sup>-1</sup> and FSCM: 92.56 Mg·ha<sup>-1</sup>), Nt (TMCF: 16.10 Mg·ha<sup>-1</sup>, CASTP: 14.21 Mg·ha<sup>-1</sup>, CASCP: 7.89 Mg·ha<sup>-1</sup> and FSCM: 6.50 Mg·ha<sup>-1</sup>) and Norg (TMCF: 16.02 Mg·ha<sup>-1</sup>, CASTP: 14.16 Mg·ha<sup>-1</sup>, CASCP: 7.82 Mg·ha<sup>-1</sup> and FSCM: 6.44 Mg·ha<sup>-1</sup>) stocks. The C:N ratio was similar in the systems.

**Conclusions:** The TMCF and CASTP had the largest organic carbon and Nt stocks in the soil. Agroforestry systems with coffee were better than coffee monoculture.

**Keywords:** Plant cover; nitrates; ammonium; organic nitrogen, C:N ratio.

### Resumen

**Introducción:** En los sistemas naturales y agroecosistemas, el estudio del carbono y nitrógeno del suelo como función del tipo y magnitud de su cubierta vegetal es importante debido a que la concentración y contenido de dichos elementos tienen relación con la fertilidad, calidad de los suelos e impacto ambiental.

**Objetivos:** Determinar el carbono y nitrógeno en el suelo como función del tipo y magnitud de la cubierta vegetal de los sistemas bosque mesófilo de montaña (BMM), monocultivo de café a pleno sol (MCPS), sistema agroforestal de café como policultivo tradicional (AFCPT) y sistema agroforestal de café como policultivo comercial (AFCPC).

**Materiales y métodos:** Las cubiertas vegetales se caracterizaron y cuantificaron. Se tomaron muestras de suelo a las profundidades 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, para determinar las concentraciones y contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) y nitrógeno en sus formas total (Nt), orgánico (Norg), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y mineral (Nmin).

**Resultados y discusión:** El orden de magnitud de las cubiertas vegetales fue BMM>AFCPT>AFCPC>MCPS. Este mismo orden se tuvo en los almacenamientos de COS (BMM: 229.33 Mg·ha<sup>-1</sup>, AFCPT: 211.03 Mg·ha<sup>-1</sup>, AFCPC: 90.95 Mg·ha<sup>-1</sup> y MCPS: 92.56 Mg·ha<sup>-1</sup>), Nt (BMM: 16.10 Mg·ha<sup>-1</sup>, AFCPT: 14.21 Mg·ha<sup>-1</sup>, AFCPC: 7.89 Mg·ha<sup>-1</sup> y MCPS: 6.50 Mg·ha<sup>-1</sup>) y Norg (BMM: 16.02 Mg·ha<sup>-1</sup>, AFCPT: 14.16 Mg·ha<sup>-1</sup>, AFCPC: 7.82 Mg·ha<sup>-1</sup> y MCPS: 6.44 Mg·ha<sup>-1</sup>). La relación C:N fue similar en los sistemas.

**Conclusiones:** El BMM y AFCPT presentaron los mayores almacenamientos de COS y Nt en el suelo. Los sistemas agroforestales con café fueron mejores que el monocultivo de café.

**Palabras clave:** Cubierta vegetal; nitratos; amonio; nitrógeno orgánico, relación C:N.

## Introduction

The study of soil carbon (C) and nitrogen (N) together is very important because the two elements are related to soil fertility (Brevik, 2009; Yang, Luo, & Finzi, 2011) and quality (Brevik, 2009; Sainju et al., 2011), as well as the generation of negative environmental impacts (Elliott et al., 2009; Kassam et al., 2012). The C and N cycles interact closely and it has been established that the contribution of C is strongly related to the availability of N in the soil (Yang et al., 2011). Research indicates that soil use (Gelaw, Singh, & Lal, 2014), management practices (Wang, Wu, Zhu, & Shi, 2014) and soil and vegetation types (Fu, Shao, Wei, & Horton, 2010) influence soil organic carbon (SOC) and total soil nitrogen (Nt) contents. Accordingly, it is possible that, due to changes in land use and vegetation types, the dynamics of C and N will change, affecting their concentrations and contents in the soil.

Land-use change alters SOC and Nt because it affects the organic matter (OM) content, which is regulated by the decomposition of organic waste (Maia, Xavier, Oliveira, Mendonça, & Filco, 2008). Naturally, the amounts of C and N in the soil vary according to the amounts contributed by plant residues and the losses resulting from erosion and oxidation by microorganisms (Damacena de Souza et al., 2009). Therefore, soil OM is involved in the equilibrium of the C and N cycles; its content is stable in soils under native vegetation (Bortolon, Mielniczuk, Tornquist, Lopes, & Fernandes, 2009). The imbalance occurs when the contribution of plant residues to the soil is less than the production of biomass (Cerri, Feigl, & Cerri, 2008) and when native vegetation, such as tropical montane cloud forest, is replaced by another type of vegetation.

The replacement of native vegetation causes changes in both the dynamics of organic waste inputs and their rate of decomposition and loss (de Souza, Alves de Castro, Gomes de Souza, & de Carvalho, 2011). In Mexico, the native vegetation of the Huatusco area, Veracruz, has been replaced by agroforestry systems and coffee monoculture (Espinoza-Domínguez, Krishnamurthy, Vázquez-Alarcón, & Torres-Rivera, 2012); research results and the benefits of the systems studied are given based on the type of cover without quantifying its magnitude, a variable that can have greater impact.

Little has been studied about C and N in soils in relation to the type and density of plant cover; although it is claimed that the increase in aboveground biomass may increase carbon sequestration (Nair, 2011), the effects on C and particularly on N are unclear (Hoogmoed et al., 2012). Effects vary between species and ages of trees, and between types, conditions, depths and previous land uses (Paul, Polglase, Nyakuengama, & Khanna, 2002).

## Introducción

El estudio del carbono (C) y nitrógeno (N) del suelo, de manera conjunta, es muy importante debido a que los dos elementos tienen relación con la fertilidad (Brevik, 2009; Yang, Luo, & Finzi, 2011) y la calidad de los suelos (Brevik, 2009; Sainju et al., 2011), así como con la generación de impactos ambientales negativos (Elliott et al., 2009; Kassam et al., 2012). Los ciclos del C y N interactúan estrechamente y se ha establecido que el aporte de C está fuertemente relacionado con la disponibilidad de N en el suelo (Yang et al., 2011). Las investigaciones indican que el uso del suelo (Gelaw, Singh, & Lal, 2014), las prácticas de manejo (Wang, Wu, Zhu, & Shi, 2014) y los tipos de suelo y vegetación (Fu, Shao, Wei, & Horton, 2010) influyen en los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) y de nitrógeno total del suelo (Nt). De acuerdo con lo anterior es posible que, debido al cambio del uso del suelo y los tipos de vegetación, la dinámica del C y N se modifique afectando sus concentraciones y contenidos en el suelo.

El cambio de uso del suelo altera el COS y Nt, debido a que se afecta el contenido de materia orgánica (MO), la cual es regulada por la descomposición de los residuos orgánicos (Maia, Xavier, Oliveira, Mendonça, & Filco, 2008). De manera natural, las cantidades de C y N en el suelo varían de acuerdo con las cantidades aportadas por los residuos vegetales y con las pérdidas resultantes de la erosión y la oxidación por microorganismos (Damacena de Souza et al., 2009). Por lo anterior, la MO del suelo está involucrada en el equilibrio de los ciclos C y N; su contenido es estable en suelos bajo vegetación nativa (Bortolon, Mielniczuk, Tornquist, Lopes, & Fernandes, 2009). El desequilibrio ocurre cuando la aportación de residuos vegetales al suelo es menor con respecto a la producción de biomasa (Cerri, Feigl, & Cerri, 2008) y cuando la vegetación nativa, como la del bosque mesófilo de montaña, es reemplazada por otro tipo de vegetación.

El reemplazo de la vegetación nativa provoca cambios tanto en la dinámica de las entradas de residuos orgánicos como en su tasa de descomposición y pérdida (de Souza, Alves de Castro, Gomes de Souza, & de Carvalho, 2011). En México, la vegetación nativa de la zona de Huatusco, Veracruz, se ha estado reemplazando por sistemas agroforestales y por el monocultivo de café (Espinoza-Domínguez, Krishnamurthy, Vázquez-Alarcón, & Torres-Rivera, 2012); los resultados de las investigaciones y las bondades de los sistemas estudiados están dados con base en el tipo de cubierta sin cuantificar su magnitud, variable que puede tener mayor impacto.

Poco se ha estudiado sobre el C y N en los suelos en relación con el tipo y la densidad de la cubierta vegetal;

The aim of this study was to determine the concentration and content of SOC and N in the soil, as a function of the type and magnitude of the plant cover of tropical montane cloud forest systems, full sun coffee monoculture, coffee agroforestry system as a traditional polyculture and coffee agroforestry system as a commercial polyculture. This is in order to determine: a) the effect of systems with different plant cover on the concentration and content of COS and N in its total, organic, ammoniacal, nitric and mineral forms, b) the relationship between the concentrations of SOC and N in its forms, and c) the C:N ratios in each system.

## Materials and methods

### Study area

The study was conducted at Chapingo Autonomous University's Eastern Regional University Center (CRUO), located in the municipality of Huatusco, Veracruz (19° 09' N and 96° 57' W), at an elevation of 1 334 m. The area has an (A)C(m)w"b(i)'g climate (García, 1988) with an average annual temperature of 17.2 °C and average annual rainfall of 1 745 mm. The natural vegetation is tropical montane cloud forest. The soils are Luvisols of volcanic origin with finely divided materials that present a large amount of minerals without crystallization, so there are no defined structures. The soils are incipient because the vegetation causes a microclimate of high humidity and relatively low temperature, aspects that slow down soil development (Pérez, 2004); the pH varies between 5.2 and 6.0.

### Characteristics of tree and shrub covers

#### Tropical montane cloud forest (TMCF)

The ecosystem is located at an average elevation of 1 308 m. The predominant species are *Liquidambar styraciflua* L. (American sweetgum), *Meliosma alba* (Schltdl.) Walp. (quiavis), *Persea* spp. (aguacatillo), *Solanum muricatum* Aiton (sweet cucumber), *Chamaedorea tepejilote* Liebm. (pacaya palm), orchids and ferns. For more than 50 years, the land use has not changed.

#### Coffee agroforestry system as a traditional polyculture (CASTP)

This system is a traditional coffee (*Coffea arabica* L.) plantation under shade, composed of a great diversity of native trees or natural vegetation, as well as *Persea schiedeana* Nees (chinene), *Inga* spp. (*Inga*) and *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. (*Grevillea*). Thirty years ago it was used as a pasture for grazing cattle, but since then the land use has changed to the CASTP system. This system is located at an average height of 1 330 m.

aunque se afirma que el aumento de la biomasa aérea puede incrementar la captura de carbono (Nair, 2011), los efectos sobre el C y, particularmente, sobre el N no son claros (Hoogmoed et al., 2012). Los efectos varían entre las especies y edades de los árboles, y entre los tipos, condiciones, profundidades y usos previos del suelo (Paul, Polglase, Nyakuengama, & Khanna, 2002).

El objetivo de este estudio fue determinar la concentración y contenido del COS y del N en el suelo, como función del tipo y magnitud de las cubiertas vegetales de los sistemas bosque mesófilo de montaña, monocultivo de café a pleno sol, sistema agroforestal de café como policultivo tradicional y sistema agroforestal de café como policultivo comercial. Lo anterior con el fin de determinar: a) el efecto de los sistemas con diferente cubierta vegetal sobre la concentración y contenido de COS y de N en sus formas total, orgánica, amoniacal, nítrica y mineral, b) la relación entre las concentraciones de COS y N en sus formas, y c) las relaciones C:N en cada sistema.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se realizó en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado en el municipio de Huatusco, Veracruz (19° 09' LN y 96° 57' LO), a una altitud de 1 334 m. El clima es (A)C(m)w"b(i)'g (García, 1988) con temperatura media anual de 17.2 °C y precipitación media anual de 1 745 mm. La vegetación natural es bosque mesófilo de montaña. Los suelos son Luvisoles de origen volcánico con materiales finamente divididos que presentan gran cantidad de minerales sin cristalización, por lo que no existen estructuras definidas. Los suelos son incipientes debido a que la vegetación provoca un microclima de alta humedad y relativamente baja temperatura, aspectos que frenan el desarrollo del suelo (Pérez, 2004); el pH varía entre 5.2 y 6.0.

### Características de las cubiertas arbórea y arbustiva

#### Sistema bosque mesófilo de montaña (BMM)

El ecosistema está ubicado a una altura promedio de 1 308 m. Las especies predominantes son *Liquidambar styraciflua* L. (ocozote), *Meliosma alba* (Schltdl.) Walp. (quiavis), *Persea* spp. (aguacatillo), *Solanum muricatum* Aiton (hierba mora), *Chamaedorea tepejilote* Liebm. (tepejilote), orquídeas y helechos. Desde hace más de 50 años, el uso de suelo no ha tenido cambio.

### Coffee agroforestry system as a commercial polyculture (CASCP)

The commercial polyculture system consists of coffee with associated species that are oriented to commercialization as a productive diversification strategy. The system is 17 years old and is composed of the coffee polyculture, *Macadamia integrifolia* Maiden & Betche (macadamia nut) and *Persea americana* Mill. (avocado). The spatial arrangement consists of two rows of coffee plants alternating with a row of macadamia nut and avocado trees interspersed in the same row.

### Full sun coffee monoculture (FSCM) system

This system is coffee without shade; it is a form of monoculture in which only coffee is produced. The system is 16 years old and is located at an average height of 1375 m.

### Experimental procedure

In each system, 10 possible sampling points were located, georeferenced (GPS Garmin model eTrex vista HCx armin) and spaced so as to cover the area. In the office phase, based on these 10 points, three were randomly selected and considered as repeats. Each of these three points denoted by their coordinates was the center of a 400 m<sup>2</sup> circular area that formed the sampling unit (SU).

The plant cover of each system was characterized and its differences were determined. To do this, the number of trees, shrubs and coffee plants in each SU was counted, measuring the height with a clinometer and a level staff, and the diameter with a diameter tape. The diameter of the trees was measured at 1.30 m from ground level, and that of the shrubs and coffee plants at 15 cm from ground level.

Each circular SU was divided into four parts by drawing two lines perpendicular to each other and passing through the center. The lines divided each SU into four areas delimited by circular arcs called quadrants. The center of each quadrant was visually located and a subsample of soil was taken with an auger at depths of 0 to 10, 10 to 20 and 20 to 30 cm, forming a composite sample for each depth. A total of 36 composite samples were obtained, as a result of the use of four systems, three SUs and three depths.

For each soil sample, bulk density was determined with the probe method (Sánchez-Junco et al., 2011), and total N with the Kjeldahl method according to Official Mexican Standard NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). SOC was determined by dry combustion, using

### Sistema agroforestal de café como policultivo tradicional (AFCPT)

Este sistema es una plantación tradicional de café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra, compuesta por gran diversidad de árboles nativos o de vegetación natural, así como de *Persea schiedeana* Nees (chinene), *Inga* spp. (*Inga*) y *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. (*grevillea*). Hace 30 años se utilizaba como potrero para pastoreo de ganado vacuno, desde entonces el uso de suelo cambió a sistema AFCPT. Este sistema se ubica a una altura promedio de 1330 m.

### Sistema agroforestal de café como policultivo comercial (AFCPC)

El sistema de policultivo comercial consistió de café con especies asociadas que están orientadas a la comercialización como una estrategia de diversificación productiva. El sistema tiene una antigüedad de 17 años y está compuesto por el policultivo de café, *Macadamia integrifolia* Maiden & Betche (macadamia) y *Persea americana* Mill. (aguacate). El arreglo espacial consta de dos hileras de plantas de café alternadas con una hilera de árboles de macadamia y aguacate intercalados en la misma hilera.

### Sistema de monocultivo de café a pleno sol (MCPS)

Este sistema es el café sin sombra; es una modalidad de monocultivo en la que solo se produce café. El sistema tiene antigüedad de 16 años y está ubicado a una altura promedio de 1375 m.

### Procedimiento experimental

En cada sistema se ubicaron 10 puntos posibles de muestreo georreferenciados (GPS Garmin modelo eTrex vista HCx armin) y espaciados de tal modo que cubrieran el área. En la fase de gabinete, tomando como base estos 10 puntos, se eligieron tres de manera aleatoria que se consideraron como repeticiones. Cada uno de estos tres puntos denotados por sus coordenadas fue el centro de un área circular de 400 m<sup>2</sup> que conformó la unidad de muestreo (UM).

La cubierta vegetal de cada sistema se caracterizó y se determinaron sus diferencias. Para ello, en cada una de las UM se contabilizó el número de árboles, arbustos y plantas de café, midiendo la altura con un clinómetro y un estadal, y el diámetro con una cinta diamétrica. El diámetro de los árboles se midió a 1.30 m del nivel del suelo, y el de los arbustos y cafetos, a 15 cm del nivel del suelo.

Cada UM circular se dividió en cuatro partes trazando dos líneas perpendiculares entre sí y pasando por



an automatic carbon analyzer (Shimadzu TOC-5050 A, Japan), and nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) and ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) were determined by steam distillation (Bremner, 1965). Mineral N (Nmin) was obtained from the sum of the concentration of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$ , and organic nitrogen (Norg) was calculated indirectly by subtracting mineral N (Nmin) from total N (Nt). The C:N ratio was determined using SOC and Nt concentration data. The content of SOC and N in each of its forms was obtained with the concentration data and by applying the formula proposed by Ellert and Bettany (1995):

$$\text{ALMX} = [\text{X}]\rho b P_x$$

where,

ALMX = content of SOC or N ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) in each of its forms

[X] = concentration of SOC or N (%) in each of its forms

$\rho b$  = bulk density of the soil ( $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) at each depth

$P_x$  = depths or thickness of the stratum (m).

Concentration and content data for each depth were subjected to an analysis of variance (ANOVA,  $P = 0.05$ ) and Tukey's multiple comparison test ( $P = 0.05$ ) with the SAS version 9.4 software package (SAS Institute Inc., 2013), to determine the effect of plant covers on these variables. A Pearson correlation was also made between the variables and the effect of the systems on the C:N ratio was analyzed.

### Carbon sequestered in aboveground biomass

Carbon in aboveground biomass, as an index of plant cover of tree and shrub species, was determined with allometric equations (Segura, Kanninen, & Suárez, 2006), relating height and diameter attributes with biomass content per individual. The allometric equations used for trees in the tropical montane cloud forest system, agroforestry shade trees, and coffee plants and shrub, respectively, were as follows:

$$Y = \exp[-2.289 + 2.649 \ln(\text{DBH}) - 0.021(\ln(\text{DBH}))^2]$$

$$\log_{10} \text{Biomass} = -0.0834 + 2.223(\log_{10} \text{DBH})$$

$$\log_{10} \text{Biomass} = -1.113 + 1.578 * \log_{10}(\text{DBH}) + 0.581 * \log_{10}(\text{H})$$

where,

Y = biomass ( $\text{kg DM}\cdot\text{individual}^{-1}$ )

MS = dry matter (kg)

DBH = diameter at breast height (cm)

H = height (m)

After obtaining the biomass value per individual, the total number of individuals per SU was summed and extrapolated to one hectare ( $\text{kg DM}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Subsequently, this result was multiplied by the factor 0.5, based on the assumption that 50 % of the total biomass of the species

el centro. Las líneas dividieron cada UM en cuatro zonas delimitadas por arcos de círculo denominados cuadrantes. El centro de cada cuadrante se ubicó de manera visual y se tomó una submuestra de suelo con una barrena a las profundidades de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, formando una muestra compuesta para cada profundidad. En total se obtuvieron 36 muestras compuestas, producto de cuatro sistemas, tres UM y tres profundidades.

Para cada muestra de suelo se determinó la densidad aparente con el método de la probeta (Sánchez-Junco et al., 2011), y el N total con el método de Kjeldahl de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). El COS se determinó por medio de combustión seca, utilizando un analizador automático de carbono (Shimadzu TOC-5050 A, Japón), y el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) se determinaron mediante destilación por arrastre de vapor (Bremner, 1965). El N mineral (Nmin) se obtuvo de la suma de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , y el nitrógeno orgánico (Norg) se calculó de manera indirecta restando el N mineral (Nmin) al N total (Nt). La relación C:N se determinó utilizando los datos de concentración de COS y Nt. El contenido de COS y N en cada una de sus formas se obtuvo con los datos de las concentraciones y aplicando la fórmula propuesta por Ellert y Bettany (1995):

$$\text{ALMX} = [\text{X}]\rho b P_x$$

donde,

ALMX = contenido de COS o N ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en cada una de sus formas

[X] = concentración de COS o N (%) en cada una de sus formas

$\rho b$  = densidad aparente del suelo ( $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a cada profundidad

$P_x$  = profundidades o grosor del estrato (m).

Los datos de las concentraciones y contenidos por cada profundidad se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA,  $P = 0.05$ ) y prueba de comparación de medias de Tukey ( $P = 0.05$ ) con el paquete SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2013), para determinar el efecto de las cubiertas vegetales sobre dichas variables. También se hizo una correlación de Pearson entre las variables y se analizó el efecto de los sistemas sobre la relación C:N.

### Carbono capturado en la biomasa aérea

El carbono en la biomasa aérea, como un índice de cobertura vegetal de las especies arbóreas y arbustivas, se determinó con ecuaciones alométricas (Segura, Kanninen, & Suárez, 2006), relacionando los atributos dasométricos de altura y diámetro con el contenido

is carbon, as established by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2003). Finally, the result was divided by 1000 to obtain the carbon ( $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) in each sampling unit.

### Plant cover index

In order to have another reference to the magnitude of plant cover of each system and to compare it with the results obtained using allometric equations, a plant cover index (PCI, m) was proposed and obtained with the following formula:

$$PCI = (NT * TH * DBH) + (NS * SH * SD)$$

where,

NT = average number of trees in each system

TH = average tree height (m)

DBH = average diameter at breast height of trees (m)

NS = average number of shrubs in each system

SH = average shrub height (m)

SD = average shrub diameter (m).

## Results and discussion

### Magnitude of plant covers

Table 1 shows that the magnitude of carbon sequestered in plant covers, in order from highest to lowest, was as follows: TMCF, CASTP, CASCPC and FSCM. In the case of PCI, the order of magnitude from highest to lowest was TMCF, CASTP, FSCM and CASCPC. In this variable there

de biomasa por individuo. Las ecuaciones alométricas utilizadas para los árboles en el sistema bosque mesófilo de montaña, árboles de sombra agroforestales, y plantas de café y arbustos fueron, respectivamente, las siguientes:

$$Y = \exp[-2.289 + 2.649 \ln(DN) - 0.021(\ln(DN))^2]$$

$$\log_{10} \text{Biomasa} = -0.0834 + 2.223(\log_{10} DN)$$

$$\log_{10} \text{Biomasa} = -1.113 + 1.578 * \log_{10}(DN) + 0.581 * \log_{10}(H)$$

donde,

Y = biomasa ( $\text{kg MS}\cdot\text{individuo}^{-1}$ )

MS = materia seca (kg)

DN = diámetro normal (cm)

H = altura (m)

Después de obtener el valor de biomasa por individuo se hizo una sumatoria del total de individuos por UM y se extrapoló a una hectárea ( $\text{kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Posteriormente, este resultado se multiplicó por el factor 0.5, con base en el supuesto de que 50 % de la biomasa total de las especies es carbono, tal como lo establece el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2003). Finalmente, el resultado se dividió entre 1000 para obtener el carbono ( $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en cada unidad de muestreo.

### Índice de cobertura vegetal

Con la finalidad de tener otra referencia de la magnitud de cobertura vegetal de cada sistema y compararla con los resultados obtenidos mediante las ecuaciones

**Table 1. Average measurement characteristics of the trees, shrubs and coffee plants in each system of the Huatusco area, Veracruz.**

**Cuadro 1. Características dasométricas promedio de los árboles, arbustos y plantas de café en cada sistema de la zona de Huatusco, Veracruz.**

System/ Sistema	NT/ NA	TH/HA (m)	DBHT/DNA (m)	NS/ NAR	SH/HAR (m)	SD/DAR (m)	TN/ NT	PCI/ICV (m)	CS/CC ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )
TMCF/ BMM	43	11.43	0.174	54	4.04	0.076	97	101.73	356.60
CASTP/ AFCPT	13	8.96	0.232	79	2.24	0.057	91	36.43	43.69
CASCPC/ AFCPC	11	5.04	0.121	58	1.16	0.023	69	8.32	14.24
FSCM/ MCPS	0	0.00	0.000	137	2.22	0.061	137	18.73	6.29

TMCF = tropical montane cloud forest, CASTP = coffee agroforestry as a traditional polyculture (coffee under traditional shade), CASCPC = coffee agroforestry as a commercial polyculture (coffee with shade from avocado and macadamia nut trees), FSCM = full sun coffee monoculture, NT = number of trees, TH = average tree height, DBHT = average diameter at breast height of trees, NS = number of shrubs, SH = average shrub height, SD = average shrub diameter, TN = average value of total number of trees and shrubs, PCI = plant cover index, CS = carbon sequestration of trees and shrubs.

BMM = bosque mesófilo de montaña, MCPS = monocultivo de café a pleno sol, AFCPT = agroforestal de café como policultivo tradicional (café bajo sombra tradicional), AFCPC = agroforestal de café como policultivo comercial (café con sombra de aguacate y macadamia), NA = número de árboles, HA = valor medio de la altura de árboles, DNA = valor medio del diámetro normal de árboles, NAR = número de arbustos, HAR = valor medio de la altura de arbustos, DAR = valor medio del diámetro de arbustos, NT = valor medio del número total de árboles y arbustos, ICV = índice de cubierta vegetal, CC = captura de carbono de árboles y arbustos.

was an exchange of position between the FSCM and CASCP covers with respect to the order of magnitude of the carbon sequestered. This exchange occurred because the number of coffee plants (137), their diameter (6.15 cm) and height (2.22 m) were greater in the FSCM system than in CASCP (58 plants with an average diameter of 2.31 cm and an average height of 1.16 m). This order was not reflected by the use of allometric equations, although they also consider the diameter and height of coffee plants and the diameter of trees. The fundamental difference was that the sequestered carbon of the 11 trees of the CASCP system was greater ( $13.73 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) than that of the 137 plants of the FSCM (without trees).

#### Average concentration values of C and N in soil

Table 2 shows that, in general, the order of magnitude of the mean concentrations of SOC, Nt and Norg in the systems, ordered from highest to lowest, is TMCFC, CASTP, CASCP and FSCM, which was the same order according to the carbon sequestered. In the TMCFC and CASTP systems, the concentrations of these variables at the three depths were statistically similar ( $P > 0.05$ ), except for SOC at a depth of 0 to 10 cm.

In the case of SOC, there are differences in concentrations by type of plant cover ( $P < 0.05$ ), which is consistent with what was found by Novara, La Mantia, Barbera, and Gristina (2012). Powers (2004) states that the contribution of plant residues has a great influence of the transfer of carbon from vegetation to soil, which could explain about 50 % of the differences observed in the concentration of SOC between various uses and soil types. Probably, the density of the plant cover also influenced the concentrations, since the radiation that reached the soil could be uneven, degrading in a differential way the organic matter by photochemical oxidation, as stated by Gallo, Porrás-Alfaro, Odenbach, and Sinsabaugh (2009).

In the case of Nt, the plant cover had an effect on the concentrations of the element. This effect may be related to the microbial communities present in the soil of each system; Ewing, Southard, Macalady, Hartshorn, and Johnson (2007) state that the greater the plant cover the larger the microbial communities that, in turn, recycle nitrogen more efficiently than open space microorganisms. On the other hand, the concentration of Nt decreased with depth in all systems, coinciding with what was found by Heluf and Negassa (2006).

In the TMCFC, the concentration of  $\text{NH}_4^+$  at the three depths was higher than those of  $\text{NO}_3^-$ , which seems to indicate that nitrification is not very active in these soils. This may be due to the fact that the TMCFC had less aeration. According to Malavolta (2006), the

alométricas, se propuso un índice de cobertura vegetal (ICV, m) que se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\text{ICV} = (\text{NA} * \text{HA} * \text{DN}) + (\text{NAR} * \text{HAR} * \text{DN})$$

donde,

NA = número promedio de árboles en cada sistema

HA = altura media de los árboles (m)

DN = valor medio del diámetro normal de árboles (m)

NAR = número promedio de arbustos en cada sistema

HAR = valor medio de la altura de arbustos (m)

DN = valor medio del diámetro de arbustos (m).

## Resultados y discusión

### Magnitud de las cubiertas vegetales

El Cuadro 1 muestra que la magnitud del carbono capturado en las cubiertas vegetales, en orden de mayor a menor, fue el siguiente: BMM, AFCPT, AFCPC y MCPS. En el caso del ICV, el orden de magnitud de mayor a menor fue BMM, AFCPT, MCPS y AFCPC. En esta variable se dio un intercambio de posición entre las cubiertas de MCPS y AFCPC con respecto al orden de magnitud del carbono capturado. Este intercambio se dio debido a que el número de plantas de café (137), el diámetro (6.15 cm) y la altura (2.22 m) fueron mayores en el sistema MCPS que en AFCPC (58 plantas con diámetro promedio de 2.31 cm y altura promedio de 1.16 m). Este orden no se reflejó con el uso de ecuaciones alométricas, a pesar de que también consideran el diámetro y altura de las plantas de café y el diámetro de los árboles. La diferencia fundamental fue que el carbono capturado de los 11 árboles del sistema AFCPC fue mayor ( $13.73 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) que el de las 137 plantas del MCPS (sin árboles).

### Valores medios de concentración de C y N en el suelo

El Cuadro 2 muestra que, en general, el orden de magnitud de las concentraciones medias de COS, Nt y Norg en los sistemas, ordenadas de mayor a menor, es BMM, AFCPT, AFCPC y MCPS, que fue el mismo orden de acuerdo con el carbono capturado. En los sistemas BMM y AFCPT, las concentraciones de dichas variables en las tres profundidades fueron estadísticamente similares ( $P > 0.05$ ), a excepción del COS en la profundidad de 0 a 10 cm.

En el caso del COS, existen diferencias en las concentraciones por tipo de cubierta vegetal ( $P < 0.05$ ), lo cual concuerda con lo encontrado por Novara, La Mantia, Barbera, y Gristina (2012). Powers (2004) afirma que existe gran influencia de la transferencia de carbono de la vegetación al suelo por aportación de residuos vegetales, la cual podría explicar alrededor

**Table 2. Type of plant cover and concentrations of organic carbon and nitrogen at three soil depths in the Huatusco area, Veracruz.****Cuadro 2. Tipo de cobertura vegetal y concentraciones de carbono orgánico y nitrógeno a tres profundidades del suelo de la zona de Huatusco, Veracruz.**

Variable	System/ Sistema	Depth/Profundidad					
		0-10 cm		10-20 cm		20-30 cm	
		Pr > f	Mean value/ Valor medio	Pr > f	Mean value/ Valor medio	Pr > f	Mean value/ Valor medio
SOC (%) / COS (%)	TMCF/BMM	0.0001	13.94 a	0.0010	10.02 a	0.0005	6.72 a
	CASTP/AFCPT		10.01 b		8.32 a		7.02 a
	CASCP/AFCPC		3.86 c		3.19 b		2.19 b
	FSCM/MCPS		4.30 c		3.34 b		2.26 b
Nt (mg·kg <sup>-1</sup> )	TMCF/BMM	0.0002	10400.00 a	0.0144	6500 a	0.0001	4733.30 a
	CASTP/AFCPT		7300.00 a		5167 ba		4600.00 a
	CASCP/AFCPC		3133.30 b		3000 b		1866.70 b
	FSCM/MCPS		3000.00 b		2367 b		1566.70 b
Norg (mg·kg <sup>-1</sup> )	TMCF/BMM	0.0002	10357.70 a	0.0147	6466 a	0.0001	4712.90 a
	CASTP/AFCPT		7273.10 a		5146 ba		4578.80 a
	CASCP/AFCPC		3115.00 b		2979 b		1845.50 b
	FSCM/MCPS		2981.10 b		2348 b		1546.80 b
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg·kg <sup>-1</sup> )	TMCF/BMM	0.0163	25.37 a	0.0067	18.53 a	0.0610	14.83 a
	CASTP/AFCPT		9.27 b		8.03 b		9.90 a
	CASCP/AFCPC		11.13 b		12.37 ba		12.37 a
	FSCM/MCPS		9.27 b		10.50 b		8.63 a
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg·kg <sup>-1</sup> )	TMCF/BMM	0.3668	16.90 a	0.0780	15.30 a	0.1550	5.60 a
	CASTP/AFCPT		17.67 a		12.90 a		11.27 a
	CASCP/AFCPC		7.23 a		8.80 a		8.83 a
	FSCM/MCPS		9.63 a		8.07 a		11.23 a
Nmin (mg·kg <sup>-1</sup> )	TMCF/BMM	0.0420	42.27 a	0.0007	33.83 a	0.9684	20.43 a
	CASTP/AFCPT		26.93 a		20.93 b		21.17 a
	CASCP/AFCPC		18.37 a		21.16 b		21.20 a
	FSCM/MCPS		18.90 a		18.56 b		19.87 a

TMCF = tropical montane cloud forest, FSCM = full sun coffee monoculture, CASTP = coffee agroforestry as a traditional polyculture (coffee under traditional shade), CASCP = coffee agroforestry as a commercial polyculture (coffee with shade from avocado and macadamia nut trees). SOC = soil organic carbon, Nt = total nitrogen, Norg = organic nitrogen, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = ammonium, nitrates, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitrates, Nmin = mineral nitrogen. For each variable, the mean values with the same letter on the columns are not statistically significant for Tukey's test ( $P = 0.05$ ).

BMM = bosque mesófilo de montaña, MCPS = monocultivo de café a pleno sol, AFCPT = agroforestal de café como policultivo tradicional (café bajo sombra tradicional), AFCPC = agroforestal de café como policultivo comercial (café con sombra de aguacate y macadamia). COS = carbono orgánico del suelo, Nt = nitrógeno total, Norg = nitrógeno orgánico, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = amonio, nitratos, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitratos, Nmin = nitrógeno mineral. Para cada variable, los valores medios con la misma letra sobre las columnas no son estadísticamente significativos para la prueba de Tukey ( $P = 0.05$ ).



nitrification process occurs under conditions of good soil aeration, necessary for the functioning of nitrifying bacteria, even with acid pH as in the soils of these systems. The high rate of ammonification can also be a product of the high contents of SOC and, therefore, of organic matter. Among the CASTP, CASCP and FSCM systems, the ammonium and nitrate concentrations were more homogeneous.

### C and N content in soil

Table 3 shows that the order of magnitude from highest to lowest of the systems, based on SOC, Nt and Norg contents, was TMCF, CASTP, CASCP and FSCM, which coincides with the order of magnitude of plant cover according to carbon sequestration. The contents of these elements decreased as the depth increased.

The results showed that the TMCF soil obtained more SOC, although statistically the content was similar ( $P > 0.05$ ) in the CASTP system. This does not coincide with what was reported by Callo-Concha, Krishnamurthy, and Alegre (2002), who found that, at 1 m of soil depth, the primary forest sequestered 98.78 t·ha<sup>-1</sup> of SOC against 113.54 t·ha<sup>-1</sup> of SOC for coffee + shade. However, the results did coincide with the findings of Corral-Fernández, Parras-Alcántara, and Lozano-García (2013), who affirm that high SOC values may be due to the amount of litter and dead roots on the surface and the modification of environmental conditions under the trees, such as temperature variation, the shade effect, and differences in rainfall, which slow down mineralization and intensify humification. The greater magnitude of the plant cover and, therefore, the amount of organic waste contributed by the systems increased the SOC, especially at depths of 0 to 10 and 10 to 20 cm; this behavior is similar to that reported by Delgado, Alliaume, García, and Hernández (2006), who indicate that the effect only occurs in horizons A and B.

In the case of Nt, the lowest contents were found in the FSCM and CASCP systems; the lower plant cover caused a decrease in Nt content coinciding with Aranguren, Escalante, and Herrera (1982), who, in a study of a shaded coffee plantation, indicated that the flow associated with leaf litter fall from trees was 86 kg of N·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, while the contribution of coffee litter was 28 kg of N·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>. The low content in the FSCM could also be due to a progressive depletion of Nt reserves, after the establishment of the plantations. According to Sadeghian, Mejia, and Arcila (2007), the amounts removed in coffee plantations with full sun exposure may exceed 120 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> of N.

The order of magnitude of the concentrations and contents of SOC, Nt and Norg (Tables 2 and 3) is the same, especially in the 0 to 10 cm and 10 to 20 cm

de 50 % de las diferencias observadas en la concentración de COS entre varios usos y tipos de suelos. Probablemente, también la densidad de la cubierta vegetal influyó en las concentraciones, ya que la radiación que llegó al suelo pudo ser desigual, degradando de manera diferencial a la materia orgánica por oxidación fotoquímica, tal como lo afirman Gallo, Porras-Alfaro, Odenbach, y Sinsabaugh (2009).

En el caso del Nt, la cubierta vegetal tuvo efecto en las concentraciones del elemento. Este efecto puede estar relacionado con las comunidades microbianas presentes en el suelo de cada sistema; Ewing, Southard, Macalady, Hartshorn, y Johnson (2007) afirman que, a mayor cubierta vegetal, las comunidades microbianas son más grandes y reciclan nitrógeno más eficientemente que los microorganismos de los espacios abiertos. Por otra parte, la concentración de Nt decreció con la profundidad en todos los sistemas, coincidiendo con lo encontrado por Heluf y Negassa (2006).

En el BMM, la concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en las tres profundidades fue mayor que la de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; lo cual parece indicar que la nitrificación no es muy activa en los suelos. Esto puede deberse probablemente a que en el BMM se tuvo menor aireación; de acuerdo con Malavolta (2006), el proceso de nitrificación se da bajo condiciones de buena aireación del suelo, necesaria para el funcionamiento de las bacterias nitrificantes, aun con pH ácidos como en los suelos de estos sistemas. La alta tasa de amonificación también puede ser producto de los contenidos altos de COS y, por lo tanto, de materia orgánica. Entre los sistemas AFCPT, AFCPC y MCPS, las concentraciones de amonio y nitratos fueron más homogéneas.

### Contenido de C y N en el suelo

El Cuadro 3 muestra que el orden de magnitud de mayor a menor de los sistemas, con base en los contenidos de COS, Nt y Norg, fue BMM, AFCPT, AFCPC y MCPS, el cual coincide con el orden de magnitud de la cubierta vegetal de acuerdo con el carbono capturado. Los contenidos de estos elementos disminuyeron a medida que la profundidad incrementó.

Los resultados mostraron que el suelo del BMM obtuvo mayor cantidad de COS, aunque estadísticamente el contenido fue similar ( $P > 0.05$ ) en el sistema AFCPT. Esto no coincide con lo reportado por Callo-Concha, Krishnamurthy, y Alegre (2002), quienes encontraron que, a 1 m de profundidad del suelo, el bosque primario secuestró 98.78 t·ha<sup>-1</sup> de COS contra 113.54 t·ha<sup>-1</sup> de COS para café + sombra. No obstante, los resultados si coincidieron con lo encontrado por Corral-Fernández, Parras-Alcántara, y Lozano-García (2013), quienes afirman que los valores altos de COS se pueden deber a la cantidad de hojarasca y raíces muertas en la superficie

**Table 3. Type of plant cover and organic carbon and nitrogen contents at three soil depths in the Huatusco area, Veracruz.****Cuadro 3. Tipo de cobertura vegetal y contenidos de carbono orgánico y nitrógeno a tres profundidades del suelo de la zona de Huatusco Veracruz.**

Variable (Mg·ha <sup>-1</sup> )	System/ Sistema	Depth/Profundidad					
		0-10 cm		10-20 cm		20-30 cm	
		Pr > f	Mean value/ Valor medio	Pr > f	Mean value/ Valor medio	Pr > f	Mean value/ Valor medio
SOC	TMCF/BMM	0.0001	98.780 a	0.0006	75.997 a	0.0004	54.553 a
	CASTP/AFCPT		82.300 a		70.340 a		58.390 a
	CASCP/AFCPC		39.483 b		31.670 b		21.410 b
	FSCM/MCPS		37.317 b		31.757 b		21.880 b
Nt	TMCF/BMM	0.0001	7.340 a	0.0383	4.910 a	0.0002	3.846 a
	CASTP/AFCPT		5.986 a		4.370 ba		3.853 a
	CASCP/AFCPC		3.033 b		2.986 ba		1.866 b
	FSCM/MCPS		2.766 b		2.246 b		1.483 b
Norg	TMCF/BMM	0.0001	7.310 a	0.0385	4.886 a	0.0002	3.826 a
	CASTP/AFCPT		5.966 a		4.353 ba		3.836 a
	CASCP/AFCPC		3.013 b		2.966 ba		1.843 b
	FSCM/MCPS		2.746 b		2.230 b		1.463 b
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	TMCF/BMM	0.0344	0.017 a	0.0030	0.014 a	0.0889	0.012 a
	CASTP/AFCPT		0.007 b		0.006 b		0.008 a
	CASCP/AFCPC		0.011 ba		0.012 a		0.012 a
	FSCM/MCPS		0.008 ba		0.010 ba		0.008 a
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TMCF/BMM	0.5307	0.012 a	0.0323	0.012 a	0.1507	0.004 a
	CASTP/AFCPT		0.015 a		0.011 a		0.009 a
	CASCP/AFCPC		0.007 a		0.008 a		0.009 a
	FSCM/MCPS		0.008 a		0.007 a		0.011 a
Nmin	TMCF/BMM	0.2820	0.030 a	0.0180	0.025 a	0.6000	0.016 a
	CASTP/AFCPT		0.023 a		0.017 b		0.018 a
	CASCP/AFCPC		0.017 a		0.021 ba		0.021 a
	FSCM/MCPS		0.017 a		0.017 b		0.019 a

TMCF = tropical montane cloud forest, FSCM = full sun coffee monoculture, CASTP = coffee agroforestry as a traditional polyculture (coffee under traditional shade), AFCPC = coffee agroforestry as a commercial polyculture (coffee with shade from avocado and macadamia nut trees). SOC = soil organic carbon, Nt = total nitrogen, Norg = organic nitrogen, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = ammonium, nitrates, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitrates, Nmin = mineral nitrogen. For each variable, the mean values with the same letter on the columns are not statistically significant according to Tukey's test ( $P = 0.05$ ).

BMM = bosque mesófilo de montaña, MCPS = monocultivo de café a pleno sol, AFCPT = agroforestal de café como policultivo tradicional (café bajo sombra tradicional), AFCPC = agroforestal de café como policultivo comercial (café con sombra de aguacate y macadamia). COS = carbono orgánico del suelo, Nt = nitrógeno total, Norg = nitrógeno orgánico, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = amonio, nitratos, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitratos, Nmin = nitrógeno mineral. Para cada variable, los valores medios con la misma letra sobre las columnas no son estadísticamente significativos de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P = 0.05$ ).

layers. This order corresponds to the magnitude of the plant cover ordered from highest to lowest (TMCF, CASTP, CASCPC and FSCM). According to Delgado et al. (2006), the plant cover effect occurs mainly in horizons A and B. In the case of  $\text{NH}_4^+$ , this order was altered, since the CASTP system had the lowest content and concentration. With respect to  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Nmin}$ , the contents and concentrations were statistically similar ( $P > 0.05$ ) in the four systems at the three depths, with the exception of  $\text{Nmin}$  at a depth of 10 to 20 cm, where the content and concentration were higher in the TMCF.

#### Stratification of carbon and nitrogen contents

Table 4 shows that the order of magnitude of the percentages of SOC, Nt and Norg in each depth was not the same, denoting a different dynamic due to the effect of plant cover. The percentage of SOC, Nt and Norg accumulation occurred mostly in the 0 to 10 cm layer in all systems.

y a la modificación de las condiciones ambientales bajo los árboles, tales como la variación de la temperatura, la sombra y la lluvia, que disminuyen la mineralización e intensifican la humificación. La magnitud mayor de la cubierta vegetal y, por tanto, la cantidad de residuos orgánicos aportados por los sistemas, incrementaron el COS, sobre todo en las profundidades de 0 a 10 y 10 a 20 cm; este comportamiento es similar a lo reportado por Delgado, Alliaume, García, y Hernández (2006), quienes indican que el efecto solo sucede en los horizontes A y B.

En el caso del Nt, los más bajos contenidos se encontraron en los sistemas MCPS y AFCPC; la cubierta vegetal menor provocó una disminución del contenido de Nt coincidiendo con Aranguren, Escalante, y Herrera (1982), quienes, en un estudio de un cafetal bajo sombra, indicaron que el flujo asociado con la caída de hojarasca de los árboles fue de  $86 \text{ kg de N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , mientras que el aporte de la hojarasca del café fue de  $28 \text{ kg de N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . El bajo contenido en el MCPS también se pudo deber a un agotamiento progresivo

**Table 4. Stratification of the organic carbon (SOC), total nitrogen (Nt) and organic nitrogen (Norg) contents in the soil of four systems in the Huatusco area, Veracruz.**

**Cuadro 4. Estratificación de los contenidos de carbono orgánico (COS), nitrógeno total (Nt) y orgánico (Norg) en el suelo de cuatro sistemas de la zona de Huatusco, Veracruz.**

Depth/ Profundidad (cm)	Variable	TMCF/ BMM	FSCM/ MCPS	CASTP/ AFCPT	CASCPC/ AFCPC	TMCF/ BMM	FSCM/ MCPS	CASTP/ AFCPT	CASCPC/ AFCPC
		(Mg·ha <sup>-1</sup> )				(% in relation to the total)/ (% con respecto al total)			
0-10	SOC/COS	98.783	39.483	82.300	37.317	43.074	42.655	38.999	41.028
10-20		75.997	31.670	70.340	31.757	33.138	34.214	33.331	34.915
20-30		54.553	21.410	58.390	21.880	23.787	23.130	27.669	24.056
Total		229.333	92.563	211.030	90.954	100.000	100.000	100.000	100.000
0-10	Nt	7.340	2.766	5.986	3.033	45.599	42.586	42.130	38.461
10-20		4.910	2.246	4.370	2.986	30.503	34.582	30.753	37.870
20-30		3.846	1.483	3.853	1.866	23.897	22.831	27.116	23.669
Total		16.096	6.496	14.210	7.886	100.000	100.000	100.000	100.000
0-10	Norg	7.310	2.746	5.966	3.013	45.620	42.650	42.147	38.517
10-20		4.886	2.230	4.353	2.966	30.497	34.627	30.750	37.921
20-30		3.826	1.463	3.836	1.843	23.881	22.722	27.101	23.561
Total		16.023	6.440	14.156	7.823	100.000	100.000	100.000	100.000

TMCF = tropical montane cloud forest, FSCM = full sun coffee monoculture, CASTP = coffee agroforestry as a traditional polyculture (coffee under traditional shade), AFCPC = coffee agroforestry as a commercial polyculture (coffee with shade from avocado and macadamia nut trees).

BMM = bosque mesófilo de montaña, MCPS = monocultivo de café a pleno sol, AFCPT = agroforestal de café como policultivo tradicional (café bajo sombra tradicional), AFCPC = agroforestal de café como policultivo comercial (café con sombra de aguacate y macadamia).

The best system was the TCMF as it obtained the highest SOC, Nt and Norg content values. Regarding the contents in the TCMF, the SOC losses in FSCM, CASCP and CASTP were 136.77, 138.37 and 18.30 Mg·ha<sup>-1</sup>, representing 59.64, 60.34 and 7.98 %, respectively, while those of Norg were 9.53, 8.20 and 1.86 Mg·ha<sup>-1</sup>, representing 59.81, 51.18 and 11.65 % in the same order of systems. From the above, it can be inferred that the system with the greatest negative impact was the FSCM followed by the CASCP and CASTP.

### Correlation coefficients

Table 5 shows the Pearson correlation coefficients (*r*) for the 36 concentration data. High positive linear correlation (*r* > 95 %) was observed between the concentrations of the variables SOC, Nt and Norg, and intermediate positive correlation (*r* > 60 %) between the concentrations of Nmin with SOC, Nt, Norg, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and between NH<sub>4</sub><sup>+</sup> with Nt and Norg. The high and intermediate correlations coincide with Conant, Paustian, Del Grosso and Parton (2005), who mention that there is a close link between the C and N cycles, mainly in the accumulation of these elements in soil organic matter in temperate and subtropical climates.

### Carbon:nitrogen ratio

Figure 1 shows the C:N ratios for soil depths of 0 to 10, 10 to 20 and 20 to 30 cm. There is no trend in the behavior of the ratio based on the magnitude of the plant cover of each system, given by the carbon sequestered (TCMF>CASTP>CASCP>FSCM). Tukey's test (*P* = 0.05) showed that there were no significant differences due to the effect of the systems on the C:N ratio for each depth.

In general, it can be noted that the CASCP system, the most altered of the two agroforestry systems with

de las reservas del Nt, después del establecimiento de las plantaciones. De acuerdo con Sadeghian, Mejía, y Arcila (2007), las cantidades removidas en los cafetales a plena exposición solar pueden superar los 120 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> de N.

El orden de magnitud de las concentraciones y de los contenidos de COS, Nt y Norg (Cuadros 2 y 3) es el mismo, sobre todo en las capas de 0 a 10 cm y 10 a 20 cm. Este orden corresponde con la magnitud de la cubierta vegetal ordenada de mayor a menor (BMM, AFCPT, AFCPC y MCPS). De acuerdo con Delgado et al. (2006), el efecto de la cubierta vegetal ocurre sobre todo en los horizontes A y B. En el caso del NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, dicho orden se alteró, ya que el sistema AFCPT tuvo el menor contenido y concentración. Con respecto al NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Nmin, los contenidos y concentraciones fueron estadísticamente similares (*P* > 0.05) en los cuatro sistemas en las tres profundidades, a excepción del Nmin en la profundidad de 10 a 20 cm, donde el contenido y concentración fueron mayores en el BMM.

### Estratificación de los contenidos de carbono y nitrógeno

El Cuadro 4 muestra que el orden de magnitud de los porcentajes de COS, Nt y Norg en cada profundidad no fue el mismo, denotando una dinámica diferente por efecto de la cubierta vegetal. El porcentaje de acumulación de COS, Nt y Norg se dio mayormente en la capa de 0 a 10 cm en todos los sistemas.

El mejor sistema fue el BMM ya que obtuvo los valores mayores de contenidos de COS, Nt y Norg. Con respecto a los contenidos en el BMM, las pérdidas de COS en MCPS, AFCPC y AFCPT fueron 136.77, 138.37 y 18.30 Mg·ha<sup>-1</sup>, representando 59.64, 60.34 y 7.98 %, respectivamente; mientras que las de Norg fueron 9.53, 8.20 y 1.86 Mg·ha<sup>-1</sup>, representando 59.81, 51.18 y 11.65 % en el mismo orden de sistemas. De lo anterior,

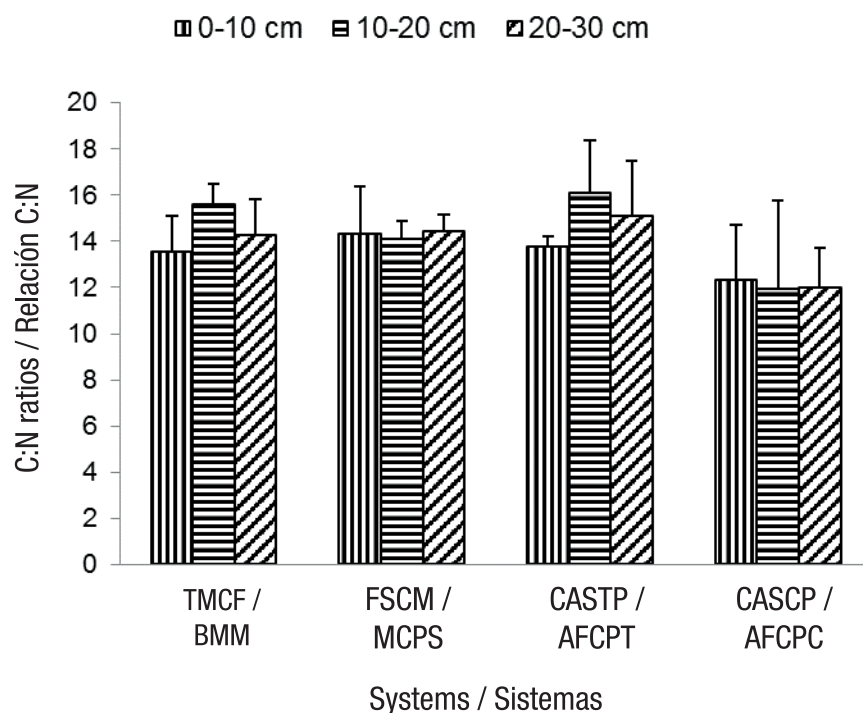
**Table 5. Pearson correlation coefficients (*r*) for 36 concentration values of organic carbon and nitrogen in the soil. Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson (*r*) para 36 valores de concentración de carbono orgánico y nitrógeno en el suelo.**

Variable	SOC/COS	Nt	Norg	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nt	0.963				
Norg	0.963	1.000			
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.544	0.624	0.623		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.417	0.336	0.334	0.117	
Nmin	0.642	0.641	0.639	0.743	0.751

SOC = soil organic carbon, Nt = total nitrogen, Norg = organic nitrogen, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = ammonium, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitrates, Nmin = mineral nitrogen.

COS = carbono orgánico del suelo, Nt = nitrógeno total, Norg = nitrógeno orgánico, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = amonio, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitratos, Nmin = nitrógeno mineral.





**Figure 1.** C:N ratios in soils with plant cover of tropical montane cloud forest (TCMF), full sun coffee monoculture (FSCM), coffee agroforestry as a traditional polyculture (CASTP) and coffee agroforestry as a commercial polyculture (CASCP) at three soil depths. There were no significant differences due to the effect of the systems on the C:N ratio for each depth (Tukey,  $P > 0.05$ ).

**Figura 1.** Relaciones C:N en los suelos con cobertura vegetal de bosque mesófilo de montaña (BMM), monocultivo de café a pleno sol (MCPS), agroforestal de café como policultivo tradicional (AFCPT) y agroforestal de café como policultivo comercial (AFCPC) en tres profundidades de suelo. No existieron diferencias significativas por efecto de los sistemas sobre la relación C:N para cada profundidad (Tukey,  $P > 0.05$ ).

respect to introduced species, had a lower C:N ratio (12.00) than the FSCM (14.29), TCMF (14.48) and CASTP (15.00) systems. Veum, Goyne, Motavalli, and Udawatta (2009) state that a higher C:N ratio indicates a delay in mineralization processes, while a lower C:N ratio denotes a more advanced mineralization process. Also, Parfitt, Yeates, Ross, Mackay, and Budding (2005) indicate that C:N values exhibit a strong negative relationship with N mineralization. According to Watt and Palmer (2012), variation in the C:N ratio can only be attributed to climate, soil type and plant cover; therefore, due to the close location of the systems, the changes were caused by the magnitude of the plant cover of the TCMF, FSCM, CASCP and CASTP systems. The results also coincide with those of Smal and Olszewska (2008), who found that soils with native vegetation had higher C:N ratio values than other types of cover.

## Conclusions

The magnitude of the concentrations and contents of C and N in the soil correspond to the magnitude of the plant cover, regardless of type. The tropical montane cloud forest and the agroforestry coffee system as a traditional polyculture had the highest concentrations

se infiere que el sistema con mayor impacto negativo fue el MCPS seguido del AFCPC y AFCPT.

## Coefficientes de correlación

El Cuadro 5 muestra los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) para los 36 datos de concentración. Se observó correlación lineal positiva alta ( $r > 95\%$ ) entre las concentraciones de las variables COS, Nt y Norg, y correlación positiva intermedia ( $r > 60\%$ ) entre las concentraciones de Nmin con COS, Nt, Norg,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ , y entre  $\text{NH}_4^+$  con Nt y Norg. Las correlaciones altas e intermedias coinciden con Conant, Paustian, Del Grosso y Parton (2005), quienes mencionan que existe estrecha vinculación entre el ciclo del C y el de N, principalmente en la acumulación de estos elementos en la materia orgánica del suelo en climas templados y subtropicales.

## Relación carbono:nitrógeno

La Figura 1 muestra las relaciones C:N para las profundidades del suelo de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm. No hay tendencia en el comportamiento de la relación con base en la magnitud de la cubierta vegetal de cada sistema, dada por el carbono capturado (BMM>AFCPT>AFCPC>MCPS). La prueba de Tukey

and contents of SOC, Nt, Norg and  $\text{NH}_4^+$ . Agroforestry systems (with trees) were better at storing C and N than a coffee monoculture system, and the C:N ratio was similar in the systems. The study shows evidence that the magnitudes of plant cover affect the behavior of soil organic carbon and nitrogen, the contents of which are related to soil quality and environmental impact in the generation of greenhouse gases. Therefore, it is important that studies of the effect of systems on soil C and N also consider the magnitude of plant cover.

### Acknowledgements

We thank Chapingo Autonomous University, its Regional Center of Huatusco Veracruz and its Department of Soil Science for having contributed with the necessary infrastructure to undertake this research.

### End of English version

### References / Referencias

- Aranguren, J., Escalante, G., & Herrera, R. (1982). Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. *Plant and Soil*, 67(1-3), 247–258. doi: 10.1007/BF02182772
- Bremner, J. M. (1965). Inorganic forms. In C. A. Black (Ed.). *Methods of soil analysis (part 2)* (pp.1179–1237). USA: American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc.
- Brevik, E. C., (2009). Soil health and productivity. In H. Verheye (Ed.), *Soils, plant growth and crop production* (pp. 106–137). Oxford, UK: EOLSS Publishers.
- Callo-Concha, D., Krishnamurthy, L., & Alegre, J. (2002). Secuestro de carbono por sistemas agroforestales amazónicos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(2), 101–106. Retrieved from <https://www.chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/doc/rchscfaVIII374.pdf>
- Cerri, C. E. P., Feigl, B., & Cerri, C. C. (2008). Dinâmica da matéria orgânica do solo na Amazônia. In G. A. Santos, L. S. Silva, L. P. Canellas, & F. O. Camargo (Eds.), *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais* (pp. 325–358). Porto Alegre, Brasil: Gênese.
- Conant, R. T., Paustian, K., Del Grosso, S. J., & Parton, W. J. (2005). Nitrogen pools and fluxes in grassland soils sequestering carbon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71(3), 239–248. doi: 10.1007/s10705-004-5085-z
- Corral-Fernández, R., Parras-Alcántara, L., & Lozano-García, B. (2013). Stratification ratio of soil organic C, N and C:N in Mediterranean evergreen oak woodland with conventional and organic tillage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164, 252–259. doi: 10.1016/j.agee.2012.11.002
- Damacena de Souza, E., Gigante de Andrade, C. S. E. V., Anghinoni, I., de Faccio, C. P. C., Andriqueti, M., &

( $P = 0.05$ ) mostró que no existieron diferencias significativas por efecto de los sistemas sobre la relación C:N para cada profundidad.

De manera general, se puede notar que el sistema AFCPC, el más alterado de los dos sistemas agroforestales con respecto a especies introducidas, tuvo relación C:N menor (12.00) que los sistemas MCPS (14.29), BMM (14.48) y AFCPT (15.00). Veum, Goyne, Motavalli, y Udawatta (2009) afirman que una relación C:N mayor indica un retardo en los procesos de mineralización, mientras que una relación C:N menor denota un proceso más avanzado de mineralización. Asimismo, Parfitt, Yeates, Ross, Mackay, y Budding (2005) indican que los valores de la relación C:N exhiben una relación negativa fuerte con la mineralización del N. De acuerdo con Watt y Palmer (2012), la variación de la relación C:N solo puede ser atribuible al clima, tipo de suelo y cubierta vegetal; por lo tanto, debido a la ubicación cercana de los sistemas, los cambios fueron ocasionados por la magnitud de la cubierta vegetal de los sistemas BMM, MCPS, AFCPC y AFCPT. Los resultados también coinciden con Smal y Olszewska (2008), quienes encontraron que los suelos con vegetación nativa tuvieron valores de la relación C:N más altos que otros tipos de cubierta.

### Conclusiones

La magnitud de las concentraciones y contenidos de C y N en el suelo corresponden con la magnitud de la cubierta vegetal, independientemente del tipo. El bosque mesófilo de montaña y el sistema agroforestal de café como policultivo tradicional tuvieron las mayores concentraciones y contenidos de COS, Nt, Norg y  $\text{NH}_4^+$ . Los sistemas agroforestales (con árboles) fueron mejores en el almacenamiento de C y N que el monocultivo de café, y la relación C:N fue similar en los sistemas. El estudio muestra evidencia de que las magnitudes de las cubiertas vegetales inciden en el comportamiento del carbono orgánico y nitrógeno del suelo, cuyos contenidos están relacionados con la calidad de los suelos y el impacto ambiental en la generación de gases de efecto de invernadero. Por lo anterior, es importante que los estudios del efecto de los sistemas sobre el C y N del suelo consideren también la magnitud de las cubiertas vegetales.

### Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma Chapingo, al Centro Regional de Huatusco Veracruz, así como al Departamento de Suelos, por haber contribuido con la infraestructura necesaria para lograr esta investigación.

Fin de la versión en español

- Cao, E. (2009). Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(6), 1829–1836. doi: 10.1590/S0100-06832009000600031
- Delgado, S., Alliaume, F., García, P. F., & Hernández, J. (2006). Efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* sp. sobre el recurso suelo en Uruguay. *Agrociencia*, 10(2), 95–107. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/285483008\\_Efecto\\_de\\_las\\_plantaciones\\_de\\_Eucalyptus\\_sp\\_sobre\\_el\\_recurso\\_suelo\\_en\\_Uruguay](https://www.researchgate.net/publication/285483008_Efecto_de_las_plantaciones_de_Eucalyptus_sp_sobre_el_recurso_suelo_en_Uruguay)
- de Souza, N. R., Alves de Castro, L. A., Gomes de Sousa, D. M., & de Carvalho, M. I. (2011). Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de cerrado com a sucessão soja-milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(4), 1407–1419. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v35n4/a35v35n4.pdf>
- Ellert, B. H., & Bettany, J. R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), 529–538. doi: 10.4141/cjss95-075
- Elliott, E. M., Kendall, C., Boyer, E. W., Burns, D. A., Lear, G. G., Golden, H. E., ...Glatz, R. (2009). Dual nitrate isotopes in dry deposition: Utility for partitioning NOx source contributions to landscape nitrogen deposition. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G4). doi: 10.1029/2008JG000889
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57–70. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030
- Ewing, S. A., Southard, R. J., Macalady, J. L., Hartshorn, A. S., & Johnson, M. J. (2007). Soil microbial fingerprints, carbon, and nitrogen in a Mojave Desert creosote-bush ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 469–475. doi: 10.2136/sssaj2005.0283
- Fu, X., Shao, M., Wei, X., & Horton, R. (2010). Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 155(1), 31–35. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.11.020
- Gallo, M. E., Porrás-Alfaro, A., Odenbach, K. J., & Sinsabaugh R. L. (2009). Photo-acceleration of plant litter decomposition in an arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(7), 1433–1441. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.03.025
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México: UNAM.
- Gelaw, A. M., Singh, B. R., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 188, 256–263. doi: 10.1016/j.agee.2014.02.035
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). *Cambio climático 2007: informe de síntesis*. Suiza: Cambridge University Press.
- Heluf, G., & Negassa, W. (2006). Impact of land use and management practices on chemical properties of some soils of Bako area, western Ethiopia. *Ethiopian Journal of Natural Resources*, 8(2), 177–197. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=ET2009000215>
- Hoogmoed, M., Cunningham, S. C., Thomson, J. R., Baker, P. J., Beringer, J., & Cavagnaro, T. R. (2012). Does afforestation of pastures increase sequestration of soil carbon in Mediterranean climates? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 159, 176–183. doi: 10.1016/j.agee.2012.07.011
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., Lahmar, R., Mrabet, R., Basch, G., ... Serraj, R. (2012). Conservation agriculture in the dry Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 132, 7–17. doi: 10.1016/j.fcr.2012.02.023
- Maia, S. M. F., Xavier, F. A. S., Oliveira, T. S., Mendonça, E. S., & Filho, A. J. A. (2008). Frações de nitrogênio em Luvisolo sob sistemas agroflorestais e convencional no semiárido cearense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(1), 381–392. doi: 10.1590/S0100-06832008000100036
- Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo, Brasil: Agronômica Ceres.
- Nair, P. R. (2011). Methodological challenges in estimating carbon sequestration potential of agroforestry systems. In B. M. Kumar & P. K. R. Nair (Eds.), *Carbon sequestration potential of agroforestry systems opportunities and challenges* (pp. 3–16). Netherlands: Springer. doi: 10.1007/978-94-007-1630-8\_1
- Novara, A., La Mantia, T., Barbera, V., & Gristina, L. (2012). Paired-site approach for studying soil organic carbon dynamics in a Mediterranean semiarid environment. *Catena*, 89(1), 1–7. doi: 10.1016/j.catena.2011.09.008
- Bortolon, O. E. S., Mielniczuk, J., Tornquist, C. G., Lopes, F., & Fernandes, F. F. (2009). Simulação da dinâmica do carbono e nitrogênio em um Argissolo do Rio Grande do Sul usando modelo Century. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(6), 1635–1646. doi: 10.1590/S0100-06832009000600012
- Paul, K. I., Polglase, P. J., Nyakuengama, J. G., & Khanna, P. K. (2002). Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 168(1), 241–257. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00740-X
- Parfitt, R., Yeates, G., Ross, D., Mackay, A., & Budding, P. (2005). Relationships between soil biota, nitrogen availability, plant nitrogen and pasture growth under organic and conventional management. *Applied Soil Ecology*, 28(1), 1–13. doi: 10.1016/j.apsoil.2004.07.001
- Pérez, J. R. (2004). *Colecciones ex situ de la Universidad Autónoma Chapingo en Huatusco, Ver. México*: UACH
- Powers, J. S. (2004). Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems*, 7(2), 134–146. doi: 10.1007/s10021-003-0123-2
- Sadeghian, S., Mejía, B., & Arcila, J. (2007). Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*, 57(4), 251–261. Retrieved from [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/117/1/arc057\(04\)251-261.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/117/1/arc057(04)251-261.pdf)

- Sainju, U. M., Lenssen, A. W., Caesar-TonThat, T., Jabro, J. D., Lartey, R. T., Evans, R. G., & Allen, B. L. (2011). Dryland residue and soil organic matter as influenced by tillage, crop rotation, and cultural practice. *Plant and Soil*, 338(1-2), 27–41. doi: 10.1007/s11104-010-0403-5
- Sánchez-Junco, R. C., Damián-Hernández, D. L., Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., Guerra-Santos, J. J., Rangel-Marrón, M., & Zavala-Loría, J. C. (2011). Determinación del carbono almacenado en suelo con asociación de mangle rojo en Nuevo Campechito, Campeche. *Unacar Tecnociencia*, 5(1), 1–7. Retrieved from [http://www.unacar.mx/contenido/tecnociencia/tecnociencia\\_enero\\_junio11/tema\\_1\\_determinacion\\_del\\_carbono.pdf](http://www.unacar.mx/contenido/tecnociencia/tecnociencia_enero_junio11/tema_1_determinacion_del_carbono.pdf)
- SAS Institute Inc. (2013). The SAS system for Windows. Release 9.4. Cary, NC, USA: Author.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>
- Segura, M., Kanninen, M., & Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143–150. doi: 10.1007/s10457-006-9005-x
- Smal, H., & Olszewska, M. (2008). The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant and Soil*, 305(1–2), 171–187. doi: 10.1007/s11104-008-9538-z
- Veum, K. S., Goyne, K. W., Motavalli, P. P., & Udawatta, R. P. (2009). Runoff and dissolved organic carbon loss from a paired-watershed study of three adjacent agricultural watersheds. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 130(3), 115–122. doi: 10.1016/j.agee.2008.12.006
- Wang, D., Wu, G. L., Zhu, Y. J., & Shi, Z. H. (2014). Grazing exclusion effects on above-and below-ground C and N pools of typical grassland on the Loess Plateau (China). *Catena*, 123, 113–120. doi: 10.1016/j.catena.2014.07.018
- Watt, M. S., & Palmer, D. J. (2012). Use of regression kriging to develop a Carbon: Nitrogen ratio surface for New Zealand. *Geoderma*, 183, 49–57. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.03.013
- Yang, Y., Luo, Y., & Finzi, A. C. (2011). Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: A global synthesis. *New Phytologist*, 190(4), 977–989. doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x