

CAPTURA DE CARBONO POR *Inga jinicuil* Schltdl. EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ BAJO SOMBRA

CARBON SEQUESTRATION BY *Inga jinicuil* Schltdl. IN A SHADOW COFFEE AGROFORESTRY SYSTEM

Elizabeth Hernández Vásquez¹, Gisela Virginia Campos Ángeles¹, José Raymundo Enríquez del Valle¹,
Gerardo Rodríguez-Ortiz¹ y Vicente Arturo Velasco Velasco¹

RESUMEN

Los sistemas agroforestales de producción de café tienen un alto potencial de secuestro de carbono (C) debido a la diversidad de especies leñosas usadas como sombra. El objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial de captura de carbono en la biomasa leñosa aérea de *Inga jinicuil* en los sistemas agroforestales de café en San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca. Además, se estudió la relación entre el carbono secuestrado y las variables fisiográficas (pendiente y altitud) y edáficas (conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y calcio). En un área de 120 ha se seleccionaron aleatoriamente 60 sitios cuadrados de 100 m². Se obtuvo información dasométrica y se analizó el C en tejidos leñosos, que sirvieron para cuantificar el C secuestrado. En promedio, el volumen de biomasa leñosa de tallos y ramas fue de 3.09 m³ sitio⁻¹; con peso específico de 0.51 g cm⁻³ y biomasa leñosa de 157.6 Mg ha⁻¹. El carbono constituye aproximadamente 40.8 % de la biomasa leñosa de la especie estudiada, la cual se estimó que almacena 64.3 Mg C ha⁻¹. Las variables de mayor influencia en el contenido de carbono fueron la pendiente y altitud del sitio, la edad del cafetal, la conductividad eléctrica y profundidad del suelo.

Palabras clave: Biomasa leñosa, café bajo sombra, carbono secuestrado, *Inga jinicuil* Schltdl., servicio ambiental, tejidos leñosos.

ABSTRACT

Agroforestry systems of coffee production have a high potential for carbon sequestration because of the diversity of firewood species used as shade. The objective of this study was to assess the sequestered carbon in aboveground firewood biomass of *Inga jinicuil* in coffee agroforestry systems of San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca State. Moreover, the relationship between sequestered carbon and physiographic (slope and altitude) and edaphic variables (electric conductivity, organic matter content, nitrogen, phosphorus, potassium and calcium) were studied. Sixty-square sites of 100 m² were sampled at random in a 120 ha area. Mensuration data and C content in firewood tissues were obtained in order to quantify sequestered carbon. On the average, the volume of firewood biomass of stems and branches was 3.09 m³ site⁻¹; with specific gravity of 0.51 g cm⁻³ and 157.6 Mg ha⁻¹ of firewood biomass. Carbon makes up about 40.8 % of firewood biomass, which stores an estimated 64.3 Mg C ha⁻¹. The most influential variables in the carbon content of this species were the slope and altitude of the site, age of the coffee plantation, electrical conductivity and soil depth.

Key words: Firewood biomass, coffee under shade, carbon sequestration, *Inga jinicuil* Schltdl., environmental service, firewood tissues.

Fecha de recepción: 26 de marzo de 2010.

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2012.

¹ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Correo-e: giscampos@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El deterioro ambiental afecta negativamente la diversidad biológica, los ecosistemas y la calidad de vida de las comunidades humanas, por lo que instituciones gubernamentales y no-gubernamentales, a nivel mundial, han propuesto acciones para revertir esta tendencia. Un factor que lo incrementa es la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI) tales como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y ozono (O_3) (Ordoñez y Masera, 2001; Pardos, 2010). En 1988 se creó una agencia especializada de la Organización de Naciones Unidas, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), con el fin de orientar y evaluar la información científica sobre el tema. En 1990, el IPCC realizó un primer informe en el que se confirmó la amenaza real antrópica del cambio climático, y se generó el Protocolo de Montreal que establece, entre otras cosas, los lineamientos para lograr la mitigación de gases efecto invernadero. En 1992 se adoptó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), que propone políticas para estabilizar la concentración de GEI en la atmósfera. La UNFCCC entró en vigor el 21 de marzo de 1994 y actualmente incluye a 188 Estados que se reúnen cada año en las Conferencias de las Partes (COP). Desde la primera, en 1995, se discutieron medidas para reducir las emisiones de GEI y se integró un catálogo de instrumentos para tal efecto. En 1997 (COP 3) se firmó el Protocolo de Kyoto, mismo que introdujo objetivos vinculantes para las emisiones de GEI a cumplir de 2008 a 2012 en 37 países industrializados. En 2005, la COP 11 de Montreal fue la primera tras la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto y se centró en los sucesos posteriores a la finalización del mismo. A partir de ella, hasta la COP 16 celebrada en México, la Cumbre no había desembocado en algún acuerdo vinculante, por lo que no se habían tomado decisiones sobre los cambios propuestos (Martínez, 2006; Pardos, 2010). Sin embargo, en la COP 17 de Durban se acordó ampliar la vigencia del Protocolo de Kioto, preparar una hoja de ruta para la emisión de GEI hasta el 2015 y se pactaron los pasos a seguir en la lucha contra el calentamiento global hasta el 2020.

En este tenor, México, en su esfuerzo por conseguir que las emisiones nacionales de GEI se reduzcan, ha implementado proyectos de captura de carbono (C), en sistemas agroforestales como un servicio ambiental, entre otros ecosistemas (Ortiz, 2002; Soto-Pinto *et al.*, 2002a).

En el secuestro de C, las plantas, a través de la fotosíntesis, capturan el CO_2 de la atmósfera y a cambio le devuelven oxígeno. Una parte de los carbohidratos sintetizados son oxidados durante la respiración para generar la energía requerida por los procesos metabólicos. Otra se usa para producir diversos compuestos orgánicos, uno de los cuales es la celulosa que se acumula en las paredes celulares (Seeberg-Elverfeldt, 2010). Este proceso se potencializa en un sistema agroforestal, donde

INTRODUCTION

Environmental degradation affects biological diversity, ecosystems and the quality of life of human communities in a negative way, thus fostering government and non-government institutions world wide to start actions that revert this tendency. A factor that favors it is the atmospheric accumulation of greenhouse gases (GGE) such as carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O) and ozone (O_3) (Ordoñez and Masera, 2001; Pardos, 2010). In 1988 was created a special agency of the United Nations Organization, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) with the aim to direct and assess the scientific information on the subject. In 1990, the IPCS made its first report in which it confirmed the anthropic real threaten of climate change and was generated the Montreal Protocol that establishes, among other things, the regulations to accomplish the mitigation of the greenhouse effect gasses. In 1992 the United Nations Framework Convention for Climatic Change (UNFCCC) was adopted, and that it proposes the politics to stabilize GGE concentrations in the atmosphere. The UNFCCC entered into force on March 21st, 1994 and at present includes 188 States that get together every year at the Conference of the Parties (COP). Since the first meeting, in 1995, actions to reduce the GGE emissions were discussed and a catalogue of instruments for such effect was formed. In 1997 (COP 3) the Kyoto Protocol was signed, in which linking objectives for the GGE emissions were included, to be accomplished from 2008 to 2012 by 37 industrialized countries. In 2005, COP 11 at Montreal was the first after the signature of the Kyoto Protocol, and it was focused on the events that came after it finished. From then onwards until COP16 which took place in Mexico, the Summit had not reached any linking agreement, and thus, no decisions had been taken in regard to the proposed changes (Martínez, 2006; Pardos, 2010). However, during the COP17 at Durban, the validity of the Kyoto Protocol was extended, a rout sheet for GGE emissions until 2015 was to be prepared and the steps to be followed against global heating until 2020 were agreed.

In this context, Mexico, in order to achieve a reduction of the national GGE emissions, has implemented projects of carbon sequestration (CS), in agroforestry systems, among other ecosystems, as an environmental service (Ortiz, 2002; Soto-Pinto *et al.*, 2002a).

In C sequestration, plants, through photosynthesis, capture atmospheric CO_2 , and in exchange, they return oxygen. A part of the synthesized carbohydrates, are oxidized during respiration to produce the required energy for metabolic processes. Another is used to produce diverse organic compounds, one of which is cellulose that accumulates in cell walls (Seeberg-Elverfeldt, 2010). This process is potentiated in an agroforestry system, where it diversifies and optimizes production (Montagnini and Nair, 2004; López, 2007; Kumar and Nair, 2011).

se diversifica y optimiza la producción (Montagnini y Nair, 2004; López, 2007; Kumar y Nair, 2011).

El café bajo sombra recibe manejo agrícola y en él están presentes varios estratos vegetales o niveles de altura (Bolaños, 2001). Además, presentan similitudes ambientales y estructurales en la vegetación y en sus funciones ecológicas al bosque nativo, especialmente, cuando el dosel está constituido por una amplia variedad de especies de árboles (Pineda et al., 2005b). Los taxa en asociación crean, entre sí, condiciones aptas para su desarrollo, pues el aporte de materia orgánica es constante y rico, lo que contribuye a generar un ambiente propicio para el establecimiento de una gran diversidad de especies vegetales y animales (Lyngbæk et al., 2001; Mendonça y Stott, 2003; Nair y Graetz, 2004). *Inga jinicuil* Schlttdl. es un árbol que proporciona sombra al cultivo de café, pero requiere ciertas condiciones de suelo indispensables para su establecimiento: color, textura, salinidad, materia orgánica y cobertura del dosel, características que definen, en cierta medida, la calidad de sitio y, por consecuencia, la capacidad de captura de carbono (Albrecht y Kandji, 2003).

Un sistema agroforestal puede acumular entre 109.4 Mg C ha⁻¹ (taungya) y 177.6 Mg C ha⁻¹ (barbecho natural); mientras que, para el sistema café con mezcla de eucalipto y *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth y *Acacia* sp. se han citado entre 0.4 y 2.2 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, y el C del suelo puede llegar a superar 89 % del almacenado en el sistema (Arias et al., 2001; Ávila et al., 2001; Roncal-García et al., 2008). Esta asociación adquiere mayor valor y mejor salud cuando contiene una diversidad de especies arbóreas, en estratos complejos y utiliza componentes orgánicos (Soto-Pinto et al., 2002b; Pineda et al., 2005a). Al mezclar café con *I. jinicuil*, la captura de carbono (CC) puede ser de 198 Mg C ha⁻¹; en sitios con cultivo de café, en asociación con *Inga* sp., *Erythrina* y musáceas la captura asciende a 115.5 Mg C ha⁻¹ y en sitios con *Inga* sp. y estratos de bosque, alcanza 91.64 Mg C ha⁻¹ (Haber, 2001). Una hectárea de cafetal genera 39 kg de O₂ día⁻¹ y se esperaría una fijación mínima de 6.75 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ para un ciclo de 20 años. Las especies de sombra como *Inga* sp., en cafetales tienen valores de CC de 24.3 Mg C ha⁻¹ a los 20 años de edad (Kurstén y Burschel, 1993).

Bajo estas consideraciones, *I. jinicuil* asociada al café bajo sombra representa una alternativa viable de CC, tanto para las sociedades industriales que busquen resarcir los daños al ambiente causados por sus actividades, como para los habitantes de comunidades rurales que necesitan de un ingreso económico y que dependen de los recursos naturales. Las políticas del gobierno federal sobre el particular motivarían a los campesinos a conservar y aprovechar de manera sustentable estos recursos (Oellermann et al., 2004). En la comunidad bajo estudio, se tiene el propósito de multiplicar acciones de aprovechamiento y uso sustentable de los recursos

Shadow coffee has agriculture management and there are several vegetation strata or height levels (Bolaños, 2001). Also, they show environmental and structural similarities in vegetation and in their ecological functions of the native forest, especially, when the canopy is made-up by a wide variety of tree species (Pineda et al., 2005b). The associated taxa create, by themselves, favorable conditions for their development as the organic matter income is permanent and reach enough, which helps to generate the right environment for the establishment of a great diversity of plant and animal species (Lyngbæk et al., 2001; Mendonça and Stott, 2003; Nair and Graetz, 2004). *Inga jinicuil* Schlttdl. is a tree that provides shadow to the coffee culture, but demands some fundamental soil conditions for its establishment: color, texture, salts content, organic matter and canopy cover, which are elements that define, somehow, the quality of the stand, and consequently, its ability to capture carbon (Albrecht and Kandji, 2003).

An agroforestry system can accumulate between 109.4 Mg C ha⁻¹ (taungya) and 177.6 Mg C ha⁻¹ (natural fallow); while, for the coffee system mixed with *Eucalyptus* spp. *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth and *Acacia* sp. it has been quoted between 0.4 and 2.2 Mg C ha⁻¹ year⁻¹, and soil C might even get over 89 % of that stored in the system (Arias et al., 2001; Ávila et al., 2001; Roncal-García et al., 2008). This association gets higher value and better health when it gathers a diversity of tree species in complex strata and uses organic components (Soto-Pinto et al., 2002b; Pineda et al., 2005a). When coffee is mixed with *I. jinicuil*, carbon sequestration (CS) might be 198 Mg C ha⁻¹; in places with coffee cultivation, in association with *Inga* sp., *Erythrina* and some species of the Musaceae family, capture raises to 115.5 Mg C ha⁻¹ and in sites with *Inga* sp. and forest strata, it gets up to 91.64 Mg C ha⁻¹ (Haber, 2001). A coffee hectare produces 39 kg of O₂ day⁻¹ and a minimum fixation of 6.75 Mg C ha⁻¹ year⁻¹ for a 20 year cycle would be expected. Shadow species such as *Inga* sp. in coffee crops has 24.3 Mg C ha⁻¹ CS values after 20 years old (Kurstén and Burschel, 1993).

Under these considerations, *I. jinicuil* in association with shadow coffee is a viable option of CS, for industrial societies that want to compensate the damages to the environment from their activities, as well as for people of rural communities that need an economic income and that depend on natural resources. The federal government policies in this regard would motivate the peasants to preserve and harvest in a sustainable way those resources (Oellermann et al., 2004). In the community under study, there is an intention to multiply the harvest and sustainable use of natural resources by promoting the agroforestry system of shadow coffee associated with *I. jinicuil*. Therefore, the aim of the actual study was to determine the sequestered carbon amount in the aerial firewood biomass of such species and relate it with the edaphic and physiographic

naturales, mediante el impulso al sistema agroforestal de café bajo sombra asociado con *I. jinicuil*. Por ello, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar el carbono capturado en la biomasa leñosa aérea de dicha especie y relacionarlo con las condiciones edáficas y fisiográficas, como estrategia de servicios ambientales en San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La investigación se realizó en 120 ha aproximadamente del área cafetalera de la comunidad de San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, localizado en la Sierra Norte de Oaxaca (Figura 1), cuyas coordenadas geográficas son 17° 24' 02.0" latitud norte y 96° 22' 38.9" longitud oeste. Los árboles de *Inga jinicuil* aportan la sombra principal para el café. Los árboles de las parcelas tienen edades entre 10 y 30 años y fueron establecidos en terrenos con pendientes de 5 a 40 %, altitudes entre 900 y 1,500 m y exposiciones N, NE, E y SE.

conditions as a strategy of environmental services in San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca State.

MATERIALS AND METHODS

Study area

This research was carried out in near 120 ha of the coffee area of the San Juan Tepanzacoalco community, Ixtlán, which is in Oaxaca North Range (Figure 1), at 17° 24' 02.0" North and 96° 22' 38.9" West. *Inga jinicuil* trees provide the major shadow for coffee. The trees in the lots are 10 to 30 years old and were established in lands with 5 to 10% slopes, 900 and 1,500 m asl and N, NE, E and SE hillsides.

Biomass sampling

From a list of 97 properties with coffee plants, a sample of 10 lots of irregular size was selected at random, following the sampling methodology suggested by Somarriba *et al.* (2001), and

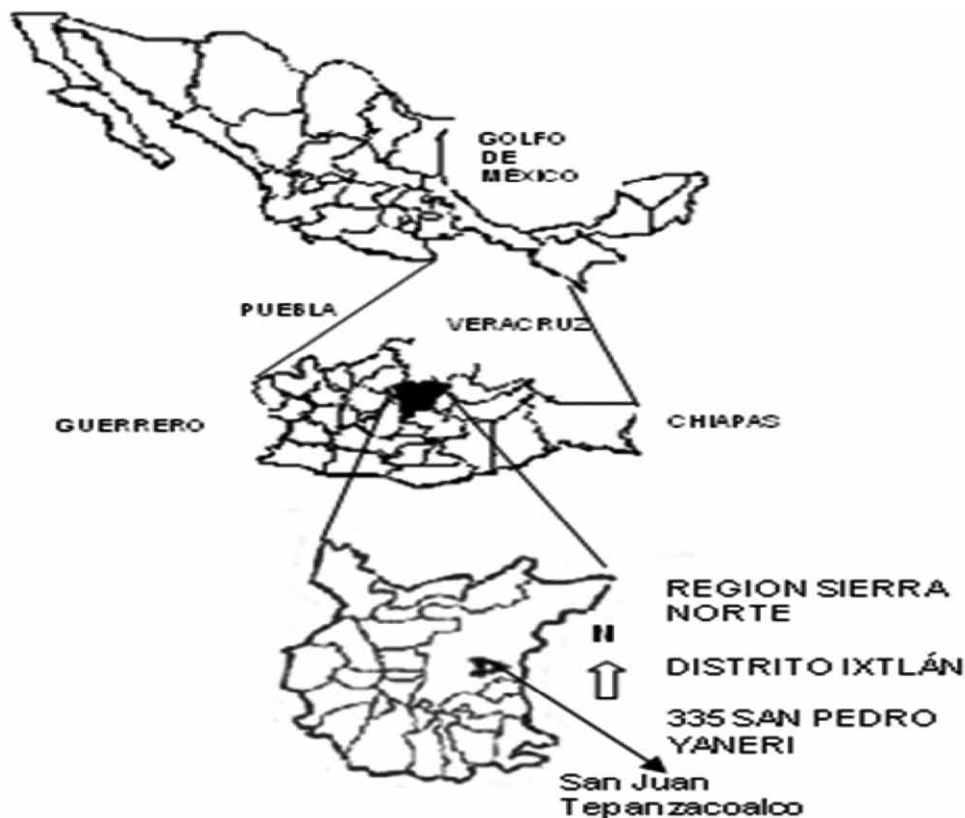


Figura 1. Ubicación geográfica de San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca.
Figure 1. Geographic location of San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca State.

Muestreo de biomasa

De una lista de 97 predios con cafetal se seleccionó una muestra de 10 parcelas de tamaño irregular al azar, siguiendo la metodología de muestreo sugerida por Somarriba *et al.* (2001) y en ellas se ubicaron 60 sitios cuadrados de 100 m², aleatoriamente. En cada uno se registró: 1) información general; tipo de masa del sistema agroforestal (arbórea, arbustiva y herbácea), edad (años) del cafetal y tipo y densidad de la vegetación; 2) datos dasométricos de *I. jinicuil*: altura total (m), diámetro normal (cm), diámetro de copa (m) y el volumen de tronco y ramas se cuantificó mediante las fórmulas de cubicación de trozas de árboles en pie sugeridas por Diéguez *et al.* (2003). Se escogieron, aleatoriamente también, nueve ramas representativas de toda la copa del árbol; a fin de determinar el volumen leñoso total, se multiplicó el volumen promedio por rama muestreada por el número total de ramas de cada árbol. En cada sitio se tomó una rodaja de 5 cm de grosor de tallo y rama de la especie de interés (de un total de 60 individuos); 3) en cada unidad de muestreo se colectó una muestra compuesta de 1 kg de suelo (obtenida de tres puntos aleatorios del sitio) a fin de describir la profundidad de la materia orgánica (cm), el color, la textura, la cobertura (%), los contenidos de materia orgánica (%), N, P, K y Ca, conductividad eléctrica y pH; 4) datos fisiográficos: exposición, pendiente (%), altitud y coordenadas geográficas.

Análisis de laboratorio

Las muestras de madera se llevaron al laboratorio, en donde se obtuvo su peso verde (PV, g) en balanza analítica Sartorius® y volumen verde (VV, cm³) determinado mediante inmersión en agua en una probeta graduada (Valencia y Vargas, 1997). El material se colocó en una estufa de secado marca Felisa modelo FE-293D a 75 °C, hasta obtener su peso constante, al finalizar se determinó el peso seco (PS, g). Con el cociente de PS y VV se estimó la gravedad específica de la madera por sitio. El producto de gravedad específica y volumen total leñoso generó la biomasa leñosa de *I. jinicuil*, la cual se infirió por unidad de área.

Las muestras leñosas de *I. jinicuil* fueron analizadas en el laboratorio con un analizador orgánico (Perkin Elmer, Series II, CHNS/O modelo 2400), para conocer su contenido de C y N (%) y con estos datos, en cada sitio, se calculó la cantidad fijada de estos elementos en la biomasa leñosa.

Los análisis de las muestras de suelo se realizaron con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Las muestras se prepararon con técnicas estandarizadas (secado, molido, tamizado a 2.0 mm y pesado conforme al tipo de análisis); para determinar conductividad eléctrica (CE) por medición electrolítica y una celda de

in each of them 60 square lots of 100 m² were established at random too, where the following data were registered: 1) general information; type of de mass of the agroforestry system (tree, shrub and herbal), age (years) and type of the coffee plantation and vegetation density; 2) Mensuration data of *I. jinicuil*: total height (m), normal diameter (cm), crown diameter (m) and stem and branch volume were quantified by the cubication formulae for standing tree logs suggested by Diéguez *et al.* (2003). Nine representative branches of the total tree crown were chosen at random, as well; in order to determine total wood volume, the average volume per sampled branch was multiplied by the total number of branches of each tree. From each lot was taken a 5 cm thick slice of the stem and branch of the species (from a total of 60 individuals); 3) from each sampling unit was taken a compound soil sample of 1 kg (which came from three random points of the site) in order to describe organic matter depth (cm), color, texture, cover (%), organic matter content (%), N, P, K and Ca, electric conductivity and pH; 4) physiographic data: hillside, slope (%), altitude and geographic coordinates.

Laboratory Analysis

Wood samples were taken to the laboratory where their green weight (PV, g) was determined by an analytical Sartorius® balance and green volume (VV, cm³) by immersion in water in a graded test-tube (Valencia and Vargas, 1997). The material was placed into a Felisa FE-293D kiln at 75 °C, until it got a constant weight, after which the dry weight (PS, g) was calculated. With the quotient between PS and VV wood specific gravity per site was estimated. The result of specific gravity and total wood volume was *I. jinicuil* wood biomass, which was inferred by area unit.

I. jinicuil wood samples were analyzed in the laboratory by a Perkin Elmer, Series II, CHNS/O 2400 model organic analyzer in order to find C and N (%) content, and with these data was calculated their amount fixed in the biomass of each site.

Soil sample analysis was based upon the NOM-021-SEMARNAT-2000 Mexican Official Regulation (SEMARNAT, 2002). Samples were prepared by standard procedures (drying, mashing, sieving at 2.0 mm and weighing according to the type of analysis) to determine electric conductivity (EC) by electrolytic measurements and a conductivity cell (CL8 conductimeter) as a sensor; pH read by a PC 45 potenciometer; texture by Boyoucou test; organic matter (OM) content by Walkley and Black test, and with this information, N content was determined. K and Ca by a GBC 904A Aspectrophotometer; while extractable P in neutral and acid soils was obtained by the Bray procedure, in a UV-V15 spectrophotometer, a method regularly used with soils of pH < 7. Color was identified and classified according to Munsell color chart (SEMARNAT, 2002).

conductividad como sensor (conductímetro CL8); pH leído en un potenciómetro PC45; textura por el procedimiento de Boyoucos; contenido de materia orgánica (MO) mediante titulación con el procedimiento de Walkley y Black, y a partir de este dato se estimó el contenido de N. El K y el Ca se determinaron en un espectrofotómetro marca GBC modelo 904AA; mientras que el P extraíble en suelos neutros y ácidos se obtuvo por el procedimiento de Bray, en un espectrofotómetro UV-V15, método utilizado con pH menores de siete. Se identificó y clasificó el color, mediante la carta de colores Munsell (SEMARNAT, 2002).

Análisis estadístico de datos

La información se ordenó en una base de datos, para realizar los análisis estadísticos con los procedimientos de medias, frecuencia y correlación del sistema de análisis estadístico (SAS, 2004). Y las pruebas de correlación lineal entre las variables cuantitativas de tipo fisiográfico y edáfico, edad del cafetal y densidad, las cuales se relacionaron con la biomasa y C fijado por *I. jinicuil*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Captura de carbono en *Inga jinicuil*

Se identificaron 17 especies leñosas asociadas con densidades de 20 a 1,000 plantas ha⁻¹ (Cuadro 1). Las dimensiones de los individuos presentaron intervalos de 1 a 27 m de altura. En general, la especie principal usada como sombra del café fue *I. jinicuil*, que se registró en 90 % de los sitios, a una densidad promedio de 164 árboles ha⁻¹. Sus diámetros basales variaron entre 5 y 80 cm, su diámetro de copa de 5 a 27 m y su altura entre 3 y 17 m; 58 % de los individuos alcanzaron alturas de 5 y 10 m (Figura 2). Acosta-Mireles *et al.* (2002), al evaluar árboles de *Inga* sp. en Oaxaca determinaron, mediante relaciones alométricas, una biomasa promedio por árbol de 94.5 kg y diámetro normal de 15 cm.

En promedio, los ejemplares de *I. jinicuil* tuvieron un volumen de tallo y ramas de 3.09 m³ sitio⁻¹ y la gravedad específica de la madera fue de 0.51 g cm⁻³. La biomasa leñosa promedio de *I. jinicuil* fue de 157.59 Mg ha⁻¹ y contiene, en promedio, 40.8 % de C, por lo que se estimaron 64.3 Mg C ha⁻¹. Este valor está dentro del intervalo de CC determinado para sistemas agroforestales tropicales (12 a 228 Mg C ha⁻¹) y por debajo de la media (95 Mg C ha⁻¹); por otro lado, los porcentajes de C fueron similares a los documentados para árboles tropicales (Albrecht y Kandji, 2003).

Statistical data analysis

The resulting information was organized into a data base in order to perform the statistical analysis by mean, frequency and correlation tests of the Statistical Analysis System (SAS, 2004), and by linear correlation among the quantitative variables of physiographic and edaphic type, age of the coffee plantation and density, which were related with biomass and C fixed by *I. jinicuil*.

RESULTS AND DISCUSSION

Carbon sequestration by *Inga jinicuil*

17 associated firewood species were identified, with densities from 20 to 1,000 plants ha⁻¹ (Table 1). The size of the individuals had a range from 1 to 27 m tall. In general terms, the species mostly used as shadow canopy for coffee plants was *I. jinicuil*, which was recorded in 90 % of sites, at an average density of 164 trees ha⁻¹. Their basal diameter varied from 5 to 80 cm, their crown diameter from 5 to 27 m and their height between 3 and 17 m; 58 % of the trees reached 5 and 10 m (Figure 2). When *Inga* sp. trees in Oaxaca were assessed by Acosta-Mireles *et al.* (2002), they determined an average biomass per tree of 94.5 kg and a normal diameter of 15 cm, by allometric relations.



Figura 2. Estructura vegetal en el sistema agroforestal de café bajo sombra y distribución de: a) *Inga jinicuil* Schltld., b) *Trema micrantha* (L.) Blume, c) *Cecropia obtusifolia* Bertol. y d) *Coffea arabica* L.

Figure 2. Vegetation structure in the agroforestry system of a shadow coffee and distribution of: a) *Inga jinicuil* Schltld., b) *Trema micrantha* (L.) Blume, c) *Cecropia obtusifolia* Bertol. and d) *Coffea arabica* L.

On the average, the examples of *I. jinicuil* had a stem and branch volume of 3.09 m³ sitio⁻¹ and wood specific gravity was of 0.51 g cm⁻³. Average wood biomass of *I. jinicuil* was 157.59 Mg ha⁻¹ and an average C content of 40.8 %, which let an estimation of 64.3 Mg C ha⁻¹. This number is within the CS range for tropical agroforestry systems (12 - 228 Mg C ha⁻¹)

En promedio, los ejemplares de *I. jinicuil* tuvieron un volumen de tallo y ramas de 3.09 m³ sitio⁻¹ y la gravedad específica de la madera fue de 0.51 g cm⁻³. La biomasa leñosa promedio de *I. jinicuil* fue de 157.59 Mg ha⁻¹ y contiene, en promedio, 40.8 % de C, por lo que se estimaron 64.3 Mg C ha⁻¹. Este valor está dentro del intervalo de CC determinado para sistemas agroforestales tropicales (12 a 228 Mg C ha⁻¹) y por debajo de la media (95 Mg C ha⁻¹); por otro lado, los porcentajes de C fueron similares a los documentados para árboles tropicales (Albrecht y Kandji, 2003).

Winrock Internacional (1998) estudió la fijación de C en sistemas agroforestales con café en Guatemala; señala que, en promedio, el C aéreo en el sistema fue de 27 Mg C ha⁻¹, valor inferior al de este estudio únicamente para *I. jinicuil* (64.3 Mg C ha⁻¹). Lo anterior demuestra que tan solo ésta especie captura una cantidad importante de C en todo el sistema y es mejor utilizarla con diversidad de especies que en monocultivo. En Chiapas observó que en sistemas agroforestales de café bajo la sombra de *I. latibracteata* Harms (monocultivo) no hubo efectos significativos en la producción de grano y nutrientes en el suelo, al compararlo con el sistema diverso (Romero-Alvarado et al., 2002) Si al valor económico de la producción del café se le suma el valor ambiental del C capturado, en todas las especies asociadas y el suelo y las funciones ecológicas, se podría generar una tasa de secuestro entre 1.5 y 3.5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹; y así como, los beneficios ambientales se multiplicarían (Montagnini y Nair, 2004).

En promedio, la biomasa leñosa de *I. jinicuil* contiene un 0.4873 % de N, mismo que corresponde a 759 kg ha⁻¹ por sitio. De esta manera, los árboles tienen en su biomasa leñosa mayor cantidad de N que el registrado en el suelo de este sistema cafetalero; resalta así la capacidad potencial de *I. jinicuil* para fijar N. Este valor es superior al de un cafetal a plena exposición solar en los Andes venezolanos, donde se calculó el N total de la biomasa aérea para todo el sistema en 415 kg ha⁻¹ el cual estuvo repartido en plantas de *Coffea arabica* L. (326 kg N ha⁻¹), *Musa sapientum* L. (72 kg N ha⁻¹) y otras especies (17 kg N ha⁻¹) (Quintero y Ataroff, 1998). Además, los sistemas agroforestales que utilizan especies leñosas fijadoras de N (como *I. jinicuil*) tienden a incrementar el nivel del C y N, debido a la mayor cantidad de biomasa producida por año y a que tienen dos ciclos activos de nutrientes: árboles y herbáceas (Sharrow e Ismail, 2004). Esta es otra gran ventaja del uso de sistemas agroforestales, ya que los árboles pueden mejorar la fertilidad del suelo a través de la mineralización de N en el ocochal y a que los sistemas cafetaleros poseen una gran dinámica de raíces finas (Van Kanten et al., 2005; Vityakon y Dangthaisong, 2005).

and under the mean value (95 Mg C ha⁻¹); on the other hand, C per cent was similar to those documented for tropical trees (Albrecht and Kandji, 2003).

Cuadro 1. Especies arbóreas y arbustivas utilizadas en los sistemas de café bajo sombra de San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca.

Table 1. Tree and shrub species used in the shadow coffee systems of San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca.

Nombre común	Nombre científico
Pino chiapensis	<i>Pinus chiapensis</i> (Martínez) Andresen
Cuajinicuil	<i>Inga jinicuil</i> Schtdl.
Árbol semilla de paloma	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume
Yagtulo rojo o majagua	<i>Heliocarpus appendiculatus</i> Turcz.
Naranja	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck
Camedor	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm.
Huele de noche	<i>Cestrum nocturnum</i> L.
Encino	<i>Quercus</i> sp L.
Aguacate	<i>Persea americana</i> Mill.
Lima	<i>Citrus aurantiifolia</i> (Christm.) Swingle
Níspero	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.
Plátano	<i>Musa paradisiaca</i> L.
Árbol flor amarilla, jonote	<i>Heliocarpus donnellsmithii</i> Rose
Chancarro o guarumbo	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.
Cordoncillo	<i>Piper tuberculatum</i> Jacq.
Palo de águila o aile	<i>Alnus acuminata</i> Kunth
Moquillo	<i>Miconia</i> sp Ruiz & Pav.
Yayetzi	<i>Diphysa robinoides</i> Benth.
Zapote negro	<i>Diospyros digyna</i> Jacq.
Floripondio	<i>Brugmansia</i> sp Pers.
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i> King

Winrock Internacional (1998) studied C fixation in agroforestry systems with Guatemala coffee; results showed that, on the average, aerial C in the system was 27 Mg C ha⁻¹, a lower value in regard to the result of the actual study only for *I. jinicuil* (64.3 Mg C ha⁻¹). This confirms that only this species captures an important C amount in the whole system and it is better to use it mixed with a diversity of species than in monoculture. In Chiapas State, Mexico, it was observed that in agroforestry systems, coffee plants under the shadow of *I. latibracteata* Harms, as monoculture, there were non-significant effects in the grain production or in soil nutrients, as it was compared

Relación captura de carbono (CC) y otras variables

Respecto a las características de los suelos, y con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, 87 % de ellos mostraron textura franco, profundidad de 2 a 48 cm, MO entre 1 y 20 cm y los colores registrados fueron en tonos gris, marrón y olivo (SEMARNAT, 2002). La cobertura del suelo varió entre 20 y 100 %, con pH de 4.09 a 6.4 y promedio de 5.23. En 60 % de los sitios, los suelos resultaron moderadamente ácidos (pH de 5.1 a 6.1) y 40 % fuertemente ácidos (pH < 5). Los contenidos de salinidad fueron despreciables, pues los valores de conductividad eléctrica estuvieron abajo de 1 dS m⁻¹; 56.6 % fueron ricos en materia orgánica (entre 3.6 y 6 %); en 55 % tuvieron registros bajos de P (< 15 mg kg⁻¹); 83 % presentaron altos contenidos de Ca (> 5 C mol (+) kg⁻¹); 61.6 % tuvieron altos contenidos de K (> 0.3 C mol (+) kg⁻¹) y en 78.3 % se determinaron valores superiores de N (> 0.15 %). Estas propiedades son importantes y propias de los sistemas agroforestales, ya que la incorporación de árboles en adición de sus podas al suelo tienden a disminuir la densidad del suelo e incrementar el contenido de materia orgánica y su capacidad de intercambio catiónico (De Costa *et al.*, 2005).

En las variables fisiográficas, el CC en la biomasa leñosa de *I. jinicuil* sólo se observó una relación significativa con la pendiente del terreno ($r = 0.31$, $p = 0.02$) y la altitud ($r = 0.25$, $p = 0.05$). En cuanto a las variables edáficas, solo se obtuvieron correlaciones significativas con la conductividad eléctrica ($r = 0.37$, $p = 0.004$) y la profundidad del suelo ($r = -0.30$, $p = 0.02$), al aumentar esta última se reduce el CC. Los datos anteriores son similares a los documentados para sistemas agroforestales con café en Costa Rica, donde el mayor reservorio de C se identificó en los primeros 30 cm de suelo, el cual tuvo una correlación positiva con la altitud; sin embargo, al disminuir esta se generó un efecto positivo en el C contenido en la biomasa total (Takimoto *et al.*, 2008; Mena *et al.*, 2011). Además, los gradientes altitudinales y el uso del suelo influyen en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, lo que genera efectos significativos en la productividad de biomasa y, por consecuencia, en el contenido de carbono (Campos *et al.*, 2007).

Por otro lado, las bajas correlaciones entre el CC y las diversas condiciones fisiográficas y edáficas indican que estas repercuten de manera parcial en el CC, y que el nivel de repuesta observado en la especie solo se podría describir en función de la acción conjunta de los factores fisiográficos, edáficos, climáticos, de manejo y bióticos (Nair *et al.*, 2009).

El contenido de C en la biomasa leñosa de *I. jinicuil* y la edad del cafetal tuvieron una correlación positiva significativa ($r = 0.26$, $p = 0.05$). Con el tiempo, se

with a diverse system (Romero-Alvarado *et al.*, 2002). If to the economic value of coffee production is added the environmental value of the captured C, in all the associated species and the soil, and the ecological functions, a sequestration rate between 1.5 and 3.5 Mg C ha⁻¹ year⁻¹ could be produced, and thus, the environmental benefits would be multiplied (Montagnini and Nair, 2004).

I. jinicuil firewood biomass has 0.4873 % of N, average, which means 759 kg ha⁻¹ per site. In this way, trees store a greater N amount in their wood biomass than that in soil in the coffee system; the ability of *I. jinicuil* to fix N is outstanding. This value is higher than that of a coffee plantation under plain solar exposure in the Venezuela Andes, where a total N of 415 kg ha⁻¹ in the aerial biomass was calculated for the whole system, which was distributed among *Coffea arabica* L. (326 kg N ha⁻¹), *Musa sapientum* L. (72 kg N ha⁻¹) and other species (17 kg N ha⁻¹) (Quintero and Ataroff, 1998). In addition, agroforestry systems use firewood species that fix N (like *I. jinicuil*) tend to increase C and N levels, due to a greater biomass produced per year and that they have two nutrient active cycles: trees and herbs (Sharrow e Ismail, 2004). This is another great advantage of using agroforestry systems since trees can improve soil fertility through N mineralization in the litter layer and that the coffee systems have intense dynamics of fine roots (Van Kanten *et al.*, 2005; Vityakon and Dangthaisong, 2005).

Carbon sequestration (CS) relation and other variables

In regard to soils, and based upon the NOM-021-SEMARNAT-2000 Mexican Official Regulation, 87% of them have a sandy loam texture, 2 to 18 cm deep, OM between 1 and 20 cm and grey, brown and olive tones (SEMARNAT, 2002). Soil cover varied from 20 to 100% with 4.09 a 6.4 pH and 5.23 average. In 60 of the sites, soils were mildly acid (pH de 5.1 a 6.1) and 10% strongly acid (pH < 5). Salt contents were unimportant, since electric conductivity values were under 1 dS m⁻¹; 56.6 % were organic matter rich (between 3.6 and 6 %); 55 % had low P (< 15 mg kg⁻¹); 83 % had high Ca contents (> 5 C mol (+) kg⁻¹); 61.6 % had high K contents (> 0.3 C mol (+) kg⁻¹) and in 78.3 % N values were high (> 0.15 %). This are important properties and proper of agroforestry systems, since the deposition of trees and their pruning to the ground tend to reduce soil density and increase organic matter content and their cationic exchange (De Costa *et al.*, 2005).

In regard to physiographic variables, CS in *I. jinicuil* firewood biomass there was only a significant relation with land slope ($r = 0.31$, $p = 0.02$) and altitude ($r = 0.25$, $p = 0.05$). In regard to edaphic variables, there were only significant relations with electric conductivity ($r = 0.37$, $p = 0.004$) and soil depth ($r = -0.30$, $p = 0.02$), as the latter rises, CS diminishes. The previous data are similar to those documented for

incrementa la biomasa arbórea viva, que aunada a la diversidad de especies leñosas utilizadas en los sistemas agroforestales generan CC superiores con la edad (Concha *et al.*, 2007). El mayor potencial de CC se localizó en terrenos con pendientes entre 0 y 40 %; altitudes de 1,100 a 1,300 m; exposiciones NE y NW y con densidades arbóreas menores a 200 árboles ha⁻¹. En cuanto a las condiciones edáficas, el CC más alto corresponde a CE de 0.1 a 0.5 dS m⁻¹, es decir, en suelos con las mínimas concentraciones salinas, ricos en MO (3.6 a 6 %), altas concentraciones de N disponible (entre 0.15 y 0.25 %), de K disponible (> 0.6 C mol (+) kg⁻¹), proporciones altas de Ca (> de 5 C mol (+) kg⁻¹) y bajas concentraciones de P (entre 1 y 5 mg kg⁻¹). También se determinó que el mayor potencial de CC se concentra en cafetales de edades entre 10 y 30 años.

Estas condiciones, probablemente, propician que los sistemas agroforestales con café bajo sombra presenten su volumen superior de C edáfico (más del 50 % del total), pero no como una función directa de la biomasa que hospedan, sino como efecto del manejo, diversidad de especies arbóreas, edad y tipo de suelo (Callo *et al.*, 2002; Lapeyre *et al.*, 2004). Además, la alta humedad en el área de estudio quizás favorece que el carbono contenido en el suelo y parte aérea, así como las reservas de P, tengan relación directa con la humedad del suelo y la temperatura ambiental. La tasa de respiración del suelo decrece con el aumento de las reservas de C en el suelo, pero se garantizan niveles correctos de P y K en el follaje del café (McGroddy y Silver, 2000; Matoso *et al.*, 2005).

CONCLUSIONES

La biomasa leñosa de *Inga jinicuil* fue de 157.59 Mg ha⁻¹, la cual contiene 40.8 % de C y 0.4873 % de N, que genera 64.3 Mg C ha⁻¹ y 759 kg N ha⁻¹, valor que podría incrementarse al incluir el resto del componente leñoso y el suelo del sistema agroforestal, lo que abre la posibilidad de ser considerado como servicio ambiental. Las variables con más influencia en el contenido de carbono en la biomasa leñosa de *I. jinicuil* fueron la pendiente y la altitud del sitio, la edad del cafetal, conductividad eléctrica y la profundidad del suelo.

El mayor potencial de contenido de carbono está en pendientes menores a 40 %, altitudes entre 1,100 y 1,300 m, exposiciones NE y NO; en suelos con concentración mínima de sales y fósforo y altas concentraciones de potasio, calcio y materia orgánica.

agroforestry systems with coffee in Costa Rica, where the greatest C deposit is found in the first 30 cm deep, which had a positive correlation with altitude; however, when it diminishes, a positive effect resulted in C contents of total biomass (Takimoto *et al.*, 2008; Mena *et al.*, 2011). Also, altitude and land use affect the chemical, physical and biological properties of soils, which produces significant effects in terms of biomass productivity, and therefore, carbon content (Campos *et al.*, 2007).

On the other hand, the low correlations between CS and the several physiographic and edaphic conditions suggests that they affect in a partial way CS, and the response observed in the species could only be described in relation to the joint action of physiographic, edaphic, climatic, management and biotic factors (Nair *et al.*, 2009).


C content in the *I. jinicuil* firewood biomass and the age of the coffee plantation had a significant positive correlation ($r = 0.26$, $p = 0.05$). As time goes by, the live tree biomass increases, which, in addition to the diversity of wood species used in agroforestry systems produce higher CS with age (Concha *et al.*, 2007). The higher CS potential was found in lands with slopes between 0 and 40 %; altitudes from 1,100 to 1,300 m; NE and NW hillsides and forest densities under 200 trees ha⁻¹. In regard to soil conditions, higher CS belongs to a 0.1 a 0.5 dS m⁻¹CE, that is, in soils with the minimum salt concentrations, rich in OM (3.6 a 6 %), with high available N concentrations, rich in OM (3.6 a 6 %), with high available N concentrations (between 0.15 and 0.25 %), available K (> 0.6 C mol (+) kg⁻¹), high amounts of Ca (> de 5 C mol (+) kg⁻¹) and low P concentrations (between 1 and 5 mg kg⁻¹). It was also determined that the greatest CS potential is concentrated in coffee plantations between 10 and 30 years old.

Probably these conditions favor that the agroforestry systems with shadow coffee show volumes over edaphic C (more than 50% of the total), but not as a direct function of the biomass they hold, but as an effect of management, forest species diversity, age and type of soil (Callo *et al.*, 2002; Lapeyre *et al.*, 2004). In addition, high moisture in the study area which favors that soil carbon content and the aerial part, as well as the P reservoirs, have a direct relation with soil moisture and environmental temperature. Thus, the respiration rate of soil decreases as the C soils deposits enlarge, but the right P and K levels are guaranteed in the coffee foliage (McGroddy and Silver, 2000; Matoso *et al.*, 2005).

CONCLUSIONS

The firewood biomass of *Inga jinicuil* was 157.59 Mg ha⁻¹, which has 40.8 % C and 0.4873 % N, which produce 64.3 Mg C ha⁻¹ and 759 kg N ha⁻¹, numbers that could become higher if the rest of the wood element be added as well as the soil of the agroforestry system, which opens the possibility considered

REFERENCIAS

- Acosta-M., M., J. Vargas H., A. Velázquez-M. y J. D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Albrecht, A. and S. T. Kandji. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 99(1): 15-27.
- Arias S., K., C. Ruiz S., M. Milla, H. F. Mesa and A. Escobar. 2001. Storage of carbon by *Gliricidia sepium* in agroforestry systems in Venezuela. *Livestock Research for Rural Development* 13(5): 410-420.
- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8(30): 32-35.
- Bolaños M., O. 2001. El café y su impacto ambiental en Nicaragua. *UNICAFE. Agroforestería en las Américas* 8(29): 46-47.
- Callo C., D., L. Krishnamurthy y J. Alegre. 2002. Secuestro de carbono por sistemas agroforestales amazónicos. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 8(2): 101-106.
- Campos C., A., K. Oleschko L., J. Etchevers B. and C. Hidalgo M. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the Eastern slope of the Cofre de Perote volcano (Mexico). *Forest Ecology and Management* 248(3): 174-182.
- Concha J., Y., J. C. Alegre y V. Pocomucha. 2007. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el Departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 6(1-2): 75-82.
- De Costa W., A. J. M., P. Surenthran and K. B. Attanayake. 2005. Tree-crop interactions in hedgerow intercropping with different tree species and tea in Sri Lanka: 2. Soil and plant nutrients. *Agroforestry Systems* 63(3): 211-218.
- Diéguez A., U., A. Barrio M., D. Castedo F., G. Ruiz A., T. Álvarez M., G. Álvarez J., y A. Rojo A. 2003. *Dendrometría*. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 181-193.
- Haber, J. 2001. *International MBA. Informe de la Finca Santa Elena, productora de café orgánico*. Tapachula, Chi., México <http://www.cca.cec.org/files/pdf/ECONOMY/santa-elena-S.PDF> (12 de noviembre de 2008).
- Kumar, B. M. and P. K. R. Nair. 2011. Carbon sequestration potential of agroforestry systems: Opportunities and challenges. Vol. 8. Springer. Gainesville, FL. USA. 530 p.
- Kursten, E. and P. Burschel. 1993. CO₂ mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution* 70(1-4): 533-544.
- Lapeyre, T., J. Alegre y L. Arévalo. 2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 3(2): 35-44.
- López T., G. 2007. *Sistemas agroforestales*. SAGARPA. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Colegio de Postgraduados. Puebla, Pue. México. 8 p.
- Lyngbæk A., E., R. G. Muschler and F. L. Sinclair. 2001. Productivity and profitability of multistrata organic versus conventional coffee farms in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 53(2): 205-213.
- Martínez L., L. 2006. La Cumbre del Montreal: escasos avances contra el cambio climático. *El Ecologista* 47: 27.
- Matoso C., M., R. H. Silva S., G. B. De Freitas, H. E. Prieto M., S. L. Ribeiro G. and F. L. Finger. 2005. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agroforestry Systems* 63(1): 175-182.
- McGroddy, M. and W. L. Silver. 2000. Variations in belowground carbon storage and soil CO₂ flux rates along a wet tropical climate gradient. *Biotropica* 32(49): 614-624.
- Mena V., E., H. J. Andrade y C. M. Navarro. 2011. Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios en un gradiente altitudinal en Costa Rica. *Agroforestería Neotropical* 1(1): 5-17.
- it as an environmental service. The variables with strongest effect upon the carbon content of wood biomass of *I. jinicuil* were slope and altitude of the site, age of the coffee plantation, electric conductivity and soil depth.
- The greatest potential of carbon content is in slopes under 10%, altitudes between 1100 and 1300 m, NE and NO hillsides, in soils with a minimal salt and phosphorous concentrations and high potassium, calcium and organic matter concentrations. 

End of the English version

- Mendonça, E. S. and D. E. Stott. 2003. Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil. *Agroforestry Systems* 57(2): 117-125.
- Montagnini, F. and P. K. R. Nair. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.
- Nair, P. K. R., B. M. Kumar and V. D. Nair. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172(1): 20-23.
- Nair, V. D. and D. A. Graetz. 2004. Agroforestry as an approach to minimizing nutrient loss from heavily fertilized soils: The Florida experience. *Agroforestry Systems* 61(1): 3269-3279.
- Oellermann, M., R. P. Voroney and A. M. Gordon. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: A review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104(3): 359-377.
- Ordoñez B., J. M. y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1):3-12.
- Ortiz, E. 2002. Sistema de cobro y pago por servicios ambientales en Costa Rica. Serie Apoyo Académico No. 34, ITCR. Cartago, Costa Rica. 28 p.
- Pardos, J. A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid, España. 253 p.
- Pineda L., M., C. Ortiz G. y V. Sánchez L. 2005a. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11(2):3-14.
- Pineda, E., C. Moreno, F. Escobar and G. Halffter. 2005b. Frog, bat, and dung beetle diversity in the cloud forest and coffee agroecosystems of Veracruz, Mexico. *Conservation Biology* 19(2):400-410.
- Quintero J., S. y M. Ataroff. 1998. Contenido y flujos de nitrógeno en la biomasa y hojarasca de un cafetal a plena exposición solar en Los Andes venezolanos. *Rev. Facultad de Agronomía Luz* 15: 501-514.
- Romero-Alvarado, Y., L. Soto-Pinto, L. García-Barrios and J. F. Barrera-Gaytán. 2002. Coffee yields and soil nutrients under the shades of *Inga* sp. vs. multiple species in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 54(3): 215-224.
- Roncal-García, S., L. Soto-P., J. Castellanos-A., N. Ramírez-M. y B. Jong. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia* 33(3): 200-206.
- Statistical Analysis System Institute Inc. (SAS). 2004. SAS/STAT 9.1 User's guide. SAS Institute, Cary, NC. USA. 4979 p.
- Seeberg-Elverfeldt, C. 2010. Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. FAO. Roma, Italia. 39 p.

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos, vol. 633. <http://books.google.com.mx/books?ei=bUs7T9PXNKWc2AXHpPG7Cg&hl=es&id=O0NXAAAAMAAJ&dq=Diario+Oficial+de+la+Federaci%C3%B3n&q=NOM-021-SEMARNAT-2000> (18 de diciembre de 2011).
- Sharrow, S. H. and S. Ismail. 2004. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems* 60(2): 123-130.
- Somarriba, E., J. Beer and R. G. Muschler. 2001. Research methods for multistrata agroforestry systems with coffee and cacao: recommendations from two decades of research at CATIE. *Agroforestry Systems* 53(2): 195-203.
- Soto-Pinto, L., G. Jiménez-F., A. Vargas G., B. Jong B. y E. Esquivel-B. 2002a. Experiencia agroforestal para la captura de carbono en comunidades indígenas de México. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1): 44-50.
- Soto-Pinto, L., I. Perfecto and J. Caballero-N. 2002b. Shade over coffee: its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 55(1): 37-45.
- Takimoto, A., P. K. R. Nair and V. D. Nair. 2008. Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the West African Sahel. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 125(1-4): 159-166.
- Valencia M., S. y J. Vargas. 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1): 81-87.
- van Kanten, R., G. Schroth, J. Beer and F. Jiménez. 2005. Fine-root dynamics of coffee in association with two shade trees in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 63(3): 247 - 261.
- Vityakon, P. and N. Dangthaisong. 2005. Environmental influences on nitrogen transformation of different quality tree litter under submerged and aerobic conditions. *Agroforestry Systems* 63(3): 225-236.
- Winrock International. 1998. Avances en la medición de carbono en Guatemala. In: Márquez, L. Elementos técnicos para inventarios de carbono en