



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE



EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN HUATUSCO, VERACRUZ, MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

PRESENTA:

AIKO MASUHARA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA/
DPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
VICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO

Enero. 2012



Evaluación del contenido de carbono en sistemas agroforestales
de café en Huatusco, Veracruz, México

Tesis realizada por **AIKO MASUHARA** bajo la dirección del Comité Asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR:



Dr. Joel Pérez Nieto

ASESOR:



Dr. Eduardo Valdés Velarde

ASESOR:



Dr. Dámaso Martínez Pérez

ASESOR:



Dr. David Cristóbal Acevedo

DEDICATORIA

A los productores y pueblo mexicano.

A mi madre: Mieko Masuhara, por su gran corazón lleno de amor verdadero y profundo. Le agradezco por el apoyo y el consejo preciso. Gracias por darme la oportunidad de estudiar en México.

A mi padre: Tamaki Masuhara, que con su fe y corazón alegre me ha enseñado a ser una persona sincera, jovial y sana. Gracias por las palabras de ánimo en la realización de la presente tesis.

A mi hermana: Hanako Masuhara, por su apoyo incondicional y por convivir juntas en todas las etapas de mi vida.

A mi abuela: Hiroko Masuhara, por cuidarme y preocuparse durante toda mi vida.

A la familia: Oyama, Masako, Oyama., Takeshi y Haruko, Conishi., por haberme dado su confianza y consejos.

A mis amigas: Come, Chica, Cogakiyo, por todos los momentos de alegría que hemos compartido desde años de estudiantes.

Al Sr. Keita Cojima, Sra. Kanako Cojima y a su hijo Taiga, gracias por sus benevolencias durante mi estancia en el extranjero.

A todos mis compañeros de Agroforestería generación 2010-2011.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH).** Por darme la oportunidad de cursar mis estudios de Maestría en Agroforestería.
- A la Secretaria Relaciones Exteriores (SRE).** Por haberme otorgado la beca para realizar mis estudios de maestría.
- Al Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).** Por darme la oportunidad de desarrollarme en este estudio.
- Al Dr. Joel Pérez Nieto.** Por brindarme su amistad y excelente ejemplo con su experiencia académica y consejos para la mejora de esta tesis.
- Al Dr. Eduardo Valdés Velarde.** Por darme la oportunidad de cursar la maestría en México y su excelente dirección durante la realización del presente trabajo de investigación.
- Al Dr. Dámaso Martínez Pérez.** Por su valiosa colaboración en la obtención de los datos de campo y por la oportunidad de utilizar las instalaciones del CRUO.
- Al Dr. David Cristóbal Acevedo.** Por la revisión y los comentarios en la redacción de la presente tesis.
- A todas las personas del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).** Por la gran amistad brindada durante mi estancia.
- Al Laboratorio de Ecología, Fitotecnia, al Laboratorio de Físico de Suelos de la UACH.** Por la ayuda en el análisis de muestras de suelo.
- Al Ing. Omar Salinas Lorenzo.** Por su excelente apoyo en la traducción al español, e interpretación de parte de esta tesis.
- Al Sr. Pascual Quirazco Flores.** Por su experiencia en la producción de café y su habilidad facilitando la toma de muestras.
- Al Biol. Miguel Ángel Sánchez Hernández e Ing. Minerva Carrillo Morales.** Por su gran amistad y colaboración para facilitar mi estancia en Texcoco, México.
- A mis compañeros de Maestría.** Cesar, Sofía, Manuel, Araceli, Mine, Miguel, Noé, José Luis, Noemí, Ernesto, Ambrosio, Paloma, Yamili, Gerardo, y Nilze por brindarme su amistad.

DATOS BIOGRÁFICOS

AIKO MASUHARA nació en la ciudad de Okayama, Japón. Realizó sus estudios de educación preparatoria en el “Instituto provincial de segunda enseñanza de Mihara” en la localidad del municipio de la ciudad de Mihara, Hiroshima, Japón. Se graduó como Ingeniera en Agronomía en el año 2004, en la universidad de Kagoshima.

En Enero del 2010, ingresó al programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible para realizar sus estudios de Maestría en la Universidad Autónoma Chapingo.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DATOS BIOGRÁFICOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. HIPÓTESIS.....	4
4. MARCO TEÓRICO.....	5
4.1. El ciclo del carbono	9
4.2. El calentamiento global.....	12
4.3. El efecto del cambio climático	15
4.4. El cambio climático y la agricultura	18
4.5. El potencial de los sistemas agroforestales para la captura de carbono.....	20
4.6. El sistema del cultivo de café en México	27
4.6.1. Sistema especializado	30
4.6.2. Sistema de policultivo tradicional.....	33
5. MATERIALES Y MÉTODOS	37
5.1. Características del área de estudio.....	37

5.1.1. Localización geográfica	37
5.1.2. Geología y relieve.....	38
5.1.3. Fisiografía e hidrografía	38
5.1.4. Clima	39
5.1.5. Suelo.....	41
5.1.6. Vegetación	42
5.2. Descripción de los tratamientos	43
5.2.1. Sistema especializado (ESP)	43
5.2.2. Sistema policultivo tradicional (PTR)	44
5.2.3. Bosque mesófilo de montaña (BMM).....	44
5.3. Muestreo de suelo y medición de biomasa	46
5.3.1. Biomasa arbórea (BA)	50
5.3.2. Biomasa arbustiva, cafetos y otras especies de arbustos (Ba)	54
5.3.3. Biomasa de troncos caídos (BTC).....	56
5.3.4. Biomasa herbácea (BH).....	57
5.3.5. Biomasa de mantillo (BM).....	59
5.3.6. Biomasa de raíces (BR).....	60
5.3.7. Carbono en la biomasa vegetal total	60
5.3.8. Preparación de las muestras de suelo para la determinación del carbono.....	61
5.3.9. Densidad aparente del suelo	62
5.3.10. Cálculo del carbono en el suelo	63
5.4. Cálculo del carbono total	64
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
6.1. Carbono almacenado en los árboles.....	65
6.2. Carbono almacenado en los arbustos (Cafetos)	67
6.3. Carbono almacenado en troncos caídos.....	70
6.4. Carbono almacenado en herbáceas y mantillo.....	71
6.5. Carbono almacenado en las raíces	74

6.6. Características y el contenido de carbono edáfico	75
6.6.1. Textura y pH del suelo.....	75
6.6.2. Densidad de aparente del suelo	76
6.6.3. Carbono orgánico del suelo	78
6.6.4. Contenido de carbono en el suelo	80
6.6.5. Distribución del contenido de carbono por componentes del sistema.....	84
7. CONCLUSIONES	88
8. RECOMENDACIONES	90
9. BIBLIOGRAFIA.....	91
10. ANEXOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura 1. Concentración de bióxido de carbono (CO ₂) y temperatura del planeta	6
Figura 2. Carbono almacenado en la atmósfera y en los ecosistemas terrestres	7
Figura 3. Ciclo del carbono.....	10
Figura 4. Ciclo del carbono a nivel parcela.	11
Figura 5. Efecto invernadero.....	13
Figura 6. <i>Coffea arabica</i> L. en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).	28
Figura 7. Los cinco sistemas de producción de café en México	30
Figura 8. El sistema de café especializado en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).....	33
Figura 9. El sistema de café policultivo tradicional en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).	35
Figura 10. Ubicación geográfica del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) en el estado de Veracruz	37
Figura 11. Caracterización fisiográfica del predio del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).....	39
Figura 12. Comportamiento térmico anual en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).....	40
Figura 13. Precipitación y evaporación media mensual en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).	41
Figura 14. Mapa de suelos en el predio del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) .	42
Figura 15. Distancia entre los sistemas agroforestales estudiados en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).....	45
Figura 16. Esquematización de la unidad de muestreo (UM) utilizada en el sistema agroforestal.....	47
Figura 17. Esquematización de las profundidades del muestreo del suelo.....	47

Figura 18. Muestreo de suelo a cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30 y 30-60 cm) en sistemas agroforestales y forestal.	48
Figura 19. Procedimiento de toma de muestra del suelo.....	49
Figura 20. Medición del diámetro a la altura del pecho (Dap) de la vegetación arbórea.	51
Figura 21. Medición de diámetro de los tallos de los cafetos.	54
Figura 22. Procedimiento para el muestreo de la vegetación herbácea.	58
Figura 23. Procedimiento para el muestreo de mantillo.	59
Figura 24. Preparación de las muestras en laboratorio para determinar el carbono del suelo.	62
Figura 25. Carbono orgánico y densidad aparente en cada profundidad del suelo.	79
Figura 26. Contenido de carbono orgánico en cada profundidad de los sistemas estudiados.	83
Figura 27. Comparación del contenido total de carbono (Mg ha^{-1}) y porcentaje (%) por profundidad del suelo estudiada en sistemas agroforestales.	84
Figura 28. Distribución del contenido promedio de carbono orgánico por componente en los sistemas estudiados.	87

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Pág.
Cuadro 1. Identificación de los sistemas naturales y agroforestales evaluados en el campo experimental del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).	45
Cuadro 2. Biomasa y contenido promedio de carbono en árboles.	67
Cuadro 3. Biomasa y contenido promedio de carbono en arbustos.	69
Cuadro 4. Biomasa y contenido promedio de carbono en troncos caídos.....	71
Cuadro 5. Biomasa y contenido promedio de carbono en herbáceas.....	72
Cuadro 6. Biomasa y contenido promedio de carbono en mantillo.....	73
Cuadro 7. Biomasa y contenido promedio de carbono en raíces.....	75
Cuadro 8. Textura y pH promedio del suelo en los sistemas estudiados.	76
Cuadro 9. Características físicas del suelo a diferentes profundidades en los sistemas estudiados.....	78
Cuadro 10. Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades en los sistemas estudiados.....	80
Cuadro 11. Contenido promedio de carbono orgánico en el suelo a diferentes profundidades de estudio.	83
Cuadro 12. Distribución del contenido promedio de carbono en cada uno de los componentes de los sistemas estudiados.	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Contenido	Pág.
ANEXO 1. Lista de especies identificadas en el relicto de bosque mesófilo en el CRUO.....	101
ANEXO 2. Formato de recolección de información de campo.	102
ANEXO 3. Biomasa y contenido promedio de carbono en árboles.....	107
ANEXO 4. Biomasa y contenido de carbono en arbustos.	111
ANEXO 5. Biomasa y contenido promedio de carbono en troncos caídos.	118
ANEXO 6. Biomasa y contenido promedio de carbono en estratos herbáceos.....	120
ANEXO 7. Biomasa y contenido promedio de carbono en mantillo.	123
ANEXO 8. Biomasa y contenido promedio de carbono en raíz.....	126
ANEXO 9. Textura y pH del suelo en los sistemas agroforestal de café.	128
ANEXO 10. Características físicas a diferentes profundidades del suelo en los sistemas agroforestales de café.....	132
ANEXO 11. Contenido de carbono orgánico en el suelo.....	142

Evaluación del contenido de carbono en sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México

Evaluation of the carbon content in coffee agroforestry systems in Huatusco, Veracruz, Mexico

A. Masuhara¹. J. Pérez-Nieto².

RESUMEN

A nivel mundial los efectos del cambio climático son muy conocidos, lo cual es consecuencia del incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. El potencial de la captura de carbono (C) en el sector agrícola y forestal es significativo. Los sistemas agroforestales tienen una ventaja estratégica importante para la captación de C debido al contenido potencial de este elemento en las múltiples especies de plantas que conviven simultáneamente. El objetivo general de este estudio fue determinar el C almacenado en los estratos aéreos y en el suelo en diferentes sistemas de uso de la tierra en Huatusco, Veracruz. El estudio se realizó en el campo experimental del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma Chapingo en 2011. Los resultados indican que el sistema con mayor contenido de C total fue el bosque mesófilo de montaña (BMM) (481 Mg ha^{-1}) y los de menor fueron: el sistema policultivo tradicional -café con árboles de uso múltiple- PTR (188 Mg ha^{-1}) y el sistema especializado -monocultivo de café con árboles de *Inga* como sombra- ESP (133 Mg ha^{-1}). Los valores del C en la biomasa aérea (arbóreo, arbustivo, troncos, herbáceo y mantillo) fueron 14 Mg ha^{-1} , 28 Mg ha^{-1} y 305 Mg ha^{-1} en ESP, PTR y BMM, respectivamente. Los contenidos de C orgánico en el suelo (COS) a una profundidad de 0 a 60 cm fueron de 117 Mg ha^{-1} , 154 Mg ha^{-1} y 128 Mg ha^{-1} en ESP, PTR y BMM, respectivamente. El mayor porcentaje de COS con respecto al total de cada sistema se registró en los sistemas agroforestales, con 88 % en ESP y 82 % en el PTR, mientras que en el BMM fue de 27 %.

PALABRAS CLAVE: carbono en biomasa aérea, carbono orgánico del suelo

ABSTRACT

The effects of global warming are well known throughout the world. They are a consequence of the increase in greenhouse gas emissions (GHG) in the atmosphere. Carbon's (C) capture potential is significant in the agricultural and forestry sectors. Agroforestry systems have a strategic advantage in regards to the use of C; due to the potential content found in multiple plant species coexists simultaneously. The general object of the present study was the determination of carbon stock of the aerial stratus and soil in different land use system in Huatusco, Veracruz. The following study took place at the experimental field of Eastern Regional University Centre (Spanish: CRUO), belonging to the Autonomous University of Chapingo in 2011. Results indicate that cloud forest (BMM) contains the largest contain of total C which was 481 Mg ha^{-1} and that the agroforestry systems contained a smaller quantity of total C: and traditional intercropping system -coffee with multiple use trees- PTR (188 Mg ha^{-1}) and specialized system -monoculture coffee with shade tree of *Inga*- ESP (133 Mg ha^{-1}). C values in the aerial biomass (tree, shrub, trunks, herbaceous and humus) were 14 Mg ha^{-1} , 28 Mg ha^{-1} and 305 Mg ha^{-1} in ESP, PTR and BMM, respectively. The contents of soil organic carbon (SOC) at depth of 0 to 60 cm were 117 Mg ha^{-1} , 154 Mg ha^{-1} and 128 Mg ha^{-1} in ESP, PTR and BMM, respectively. The largest percentage of SOC with regard to the total of each system was registered in the agroforestry systems with 88 % in ESP and 82 % in PTR, meanwhile BMM only had a 27% intake.

KEY WORDS: aerial biomass carbon, soil organic carbon

¹Tesista

²Director

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático inducido por las actividades humanas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta (IPCC, 2001). El cambio climático es inducido principalmente por gases de efecto invernadero (GEI) como el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el dióxido de carbono (CO_2) (Ibrahim *et al.*, 2007). Los cambios en la concentración atmosférica de los GEI se correlacionan estrechamente con los cambios en la temperatura media de la superficie del planeta (CICC, 2007). El incremento de la temperatura terrestre y marina promedio fue de 0.74°C entre el año 1906 y 2005 (SEMARNAT, 2009).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) usa el término cambio climático sólo para referirse al cambio por causas humanas; el cual se entiende como el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. Al producido por causas naturales lo denomina variabilidad natural del clima (IPCC, 2001).

La toma de acción para la captura de carbono (C) bajo el Protocolo de Kioto u otro tratado post-Kioto no solo estimulará cambios importantes en el manejo del suelo sino también, por medio de un incremento en el contenido de materia orgánica (MO), tendrá efectos significativos directos en sus

propiedades y un impacto positivo sobre las cualidades ambientales o agrícolas y sobre la biodiversidad (Robert, 2002).

En la agricultura y la silvicultura, son varias las fuentes y sumideros que emiten, absorben y almacenan de GEI. La agricultura es un importante contribuidor al cambio climático, pero también proporciona un sumidero y tiene potencial para aliviarlo. La adopción de nuevas y sostenibles prácticas de manejo de la tierra puede apoyar la retención y reducción de GEI. Existen numerosas vías y esfuerzos en marcha para reducir las emisiones de C y promover actividades que ayuden a almacenar y eliminar C. En el mercado de C, simplificando, se alcanza un acuerdo entre un comprador y un vendedor de créditos de C. Un país industrializado implementa un proyecto de reducción de emisiones en un país en desarrollo. Porque de la retención o recortes de GEI se generan créditos de C (Seeberg-Elverfeldt, 2010).

Los sistemas agroforestales, al incluir especies arbóreas, asumen una importante función en la retención de C en los suelos y en la madera. Las prácticas agroforestales en el trópico húmedo han mostrado que los sistemas agroforestales contribuyeron a mitigar las emisiones de N₂O y CO₂ después de la incorporación de residuos de leguminosas (Mutuo *et al.*, 2005).

El café es uno de los cultivos de mayor relevancia en el ámbito agrícola de México, su importancia económica y social es considerable (Escamilla, 1993). En México, desde sus inicios el café se ha cultivado tradicionalmente bajo sombra, imitando de esta manera a la naturaleza. Los cafetales que se

cultivan con sombra diversa se consideran como amigables con la naturaleza, debido a que contribuyen a la conservación y a la protección de la biodiversidad. El impacto favorable comprende aspectos como protección a la biodiversidad vegetal y animal, favorecimiento del ciclo hidrológico y la captación de C (Escamilla y Díaz, 2002).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar el carbono almacenado en diferentes sistemas de uso de la tierra en Huatusco, Veracruz, para valorar su estado ambiental.

2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el contenido de carbono total en los sistemas agroforestales de café bajo sombra Especializado (ESP), Policultivo Tradicional (PTR) y en Bosque Mesófilo de Montaña (BMM), determinando su eficiencia ambiental.
- Estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea (arbórea, arbustiva, troncos caídos, herbácea y mantillo) de los sistemas agroforestales de café en ESP y PTR, y compararlos con el contenido en la biomasa aérea en el BMM, estableciendo sus diferencias.
- Determinar el contenido de carbono orgánico del suelo en cuatro profundidades del suelo en los sistemas agroforestales de café en ESP y PTR, y compararlos con el contenido en el BMM estableciendo sus diferencias.

3. HIPÓTESIS

Los sistemas agroforestales de café bajo sombra Especializado (ESP), Policultivo Tradicional (PTR) presentan menor contenido de carbono total que el Bosque Mesófilo de Montaña (BMM), mostrando una eficiencia ambiental intermedia.

4. MARCO TEÓRICO

El cambio climático es una de las mayores amenazas a la que nos enfrentamos (Seeberg-Elverfeldt, 2010) y entre otros aspectos afecta negativamente a los elementos básicos de la producción alimentaria, como el suelo, el agua y la biodiversidad (FAO, 2009). En la actualidad, el cambio climático global se atribuye generalmente a la concentración en la atmósfera de los llamados GEI por arriba de los niveles históricos. Se estima que el incremento de CO₂, N₂O, CH₄ y ozono (O₃) en la atmósfera produce un aumento en la temperatura global y afectará fuertemente los patrones de precipitación actuales. En los últimos 150 años, el nivel de concentraciones ha tenido un aumento significativo de CO₂ pasando de 280 ppm (partes por millón) en la época pre-industrial a 379 ppm en 2005 (IPCC, 2007a). El incremento en la atmósfera de los GEI y el consecuente cambio climático tendrán efectos importantes en el siglo XXI (Robert, 2002).

La temperatura en los últimos cincuenta años coincide con el aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera. El incremento de la temperatura terrestre y marina promedio fue de 0.74°C entre el año 1906 y 2005 (SEMARNAT, 2009) (Figura 1).

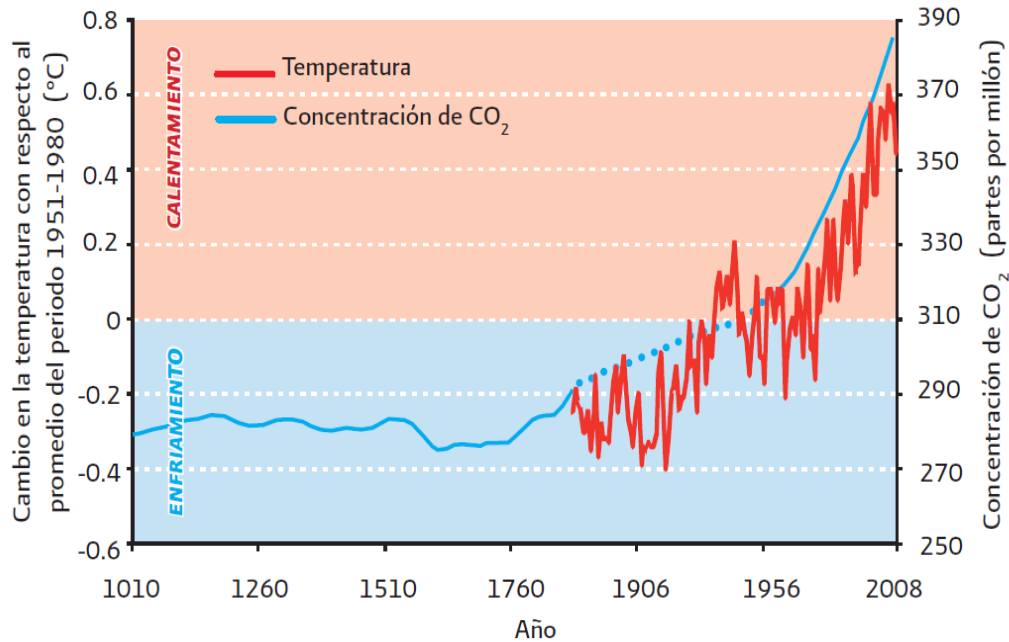


Figura 1. Concentración de bióxido de carbono (CO₂) y temperatura del planeta (SEMARNAT, 2009).

Es así como el cambio climático se suma, junto con la deforestación, la sobre explotación de los recursos naturales y la contaminación, entre otras actividades humanas, a la lista de factores que impulsan la más grave crisis que vive la biodiversidad desde la extinción de los dinosaurios hace 65 millones de años (SEMARNAT, 2009).

En el estrato del suelo existen aproximadamente de 1500 a 1600 Pg¹ (Peta gramos) de C en la parte superficial que va desde la superficie del suelo hasta 1 m de profundidad, y de 470 a 655 Pg de C en el estrato vegetal. La capa de suelo de todo el planeta que llega hasta los 30 cm de profundidad contiene aproximadamente 800 Pg, lo cual es casi la misma cantidad de C contenido en la atmósfera (Lal *et al.*, 2006) (Figura 2).

¹ Pg = 1 x 10¹⁵ g = mil millones de mega gramos.

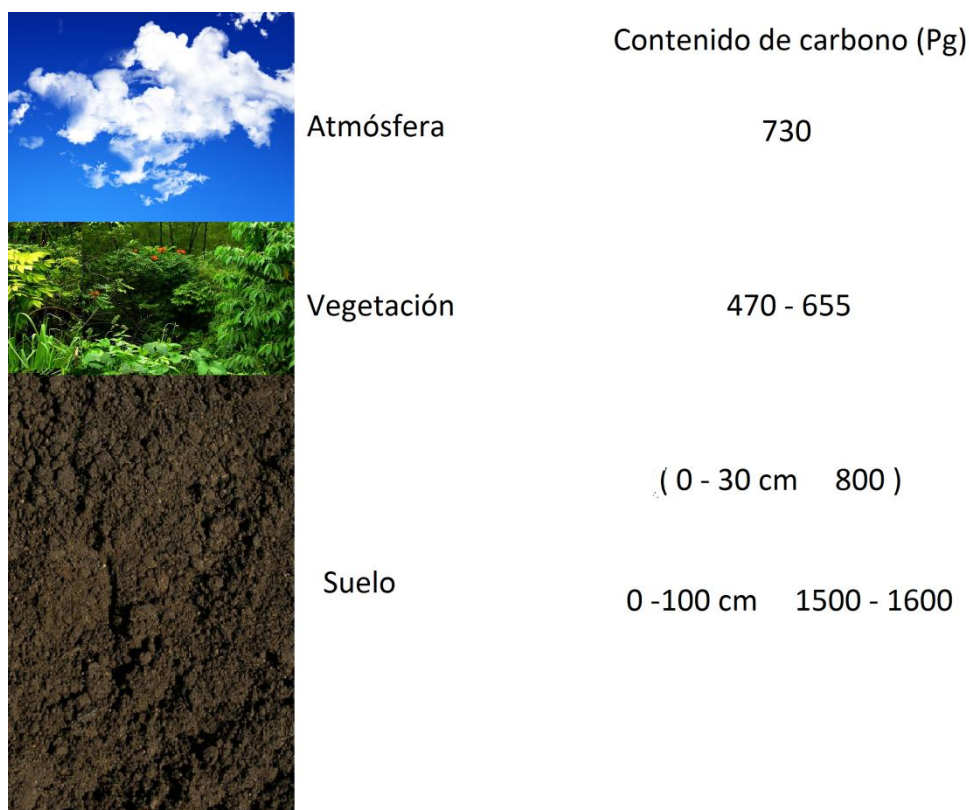


Figura 2. Carbono almacenado en la atmósfera y en los ecosistemas terrestres.
Valores; 1 Pg = 1 Gt = 1×10^{15} g (Lal et al., 2006).

Las emisiones de CO₂ por la actividad de agrícola y forestal se calculan en sólo 5 % del total planetario. Sin embargo, el potencial del almacenamiento de C en el sector agrícola y forestal es significativo (Benites *et al.*, 1999). El papel de la agricultura en la lucha contra el cambio climático está ampliamente reconocido a nivel internacional (Canet, 2010).

Las emisiones directas de la agricultura (cerca del 14%) provienen de diversas fuentes, incluyendo la liberación de C por medio de la labranza, la liberación de N₂O por el uso de fertilizantes y la liberación de CH₄ por la ganadería y la producción de arroz de riego (CIAT, 2011).

Ciesla (1996) mencionó que para mitigar los efectos del cambio climático, las medidas que se deben tomar en los sistemas agropecuarios deberían tener las siguientes características:

- Ecológicamente sostenibles. - Las medidas deberán proveer a las necesidades de largo plazo tanto para las generaciones presentes como para las futuras.
- Económicamente viables. – Las medidas propuestas deberían inicialmente tener bajos costos y ser socialmente integrativas, basándose en las necesidades locales, en los estilos de vida y en las tradiciones.
- Tecnológicamente sencillas. – Las medidas deberían poder ser ejecutadas con éxito bajo diversas condiciones, con un nivel mínimo de equipos especializados, de capacitación o procedimientos.
- Adaptables. – Deberían ser lo suficiente flexibles para adaptarse a condiciones económicas, políticas, sociales, ecológicas y climáticas cambiantes.
- Socialmente aceptables. – Las medidas propuestas deberían tener beneficios inmediatos y claros, especialmente para la población local.

4.1. El ciclo del carbono

El ciclo del C es considerado como un conjunto de depósitos o pozos interconectados: la atmósfera, los océanos y los sedimentos incluso los combustibles fósiles (Ciesla, 1996). El movimiento del C ocurre a diferentes escalas espacio-temporales, que van desde el nivel molecular, pasando por el orgánico hasta el global (Jaramillo, 2004).

El ciclo del C es uno de los más importantes, porque la vida en la Tierra está construida con base en sus compuestos. El C se encuentra de manera natural en la atmósfera, en forma de CO_2 o CH_4 , como resultado de la descomposición de la MO, por los incendios forestales, por la expulsión de los volcanes o por la emisión de los organismos vivos. Los seres humanos hemos introducido más C en el ciclo a través de actividades como la destrucción de los bosques, las selvas o los pastizales, la quema de carbón, petróleo o gas natural y la cría de ganado. Las estrategias actuales para captura el CO_2 , no han podido absorber todo el excedente, lo que ha hecho que la concentración de éste y otros GEI siga creciendo en la atmósfera (SEMARNAT, 2009) (Figura 3).

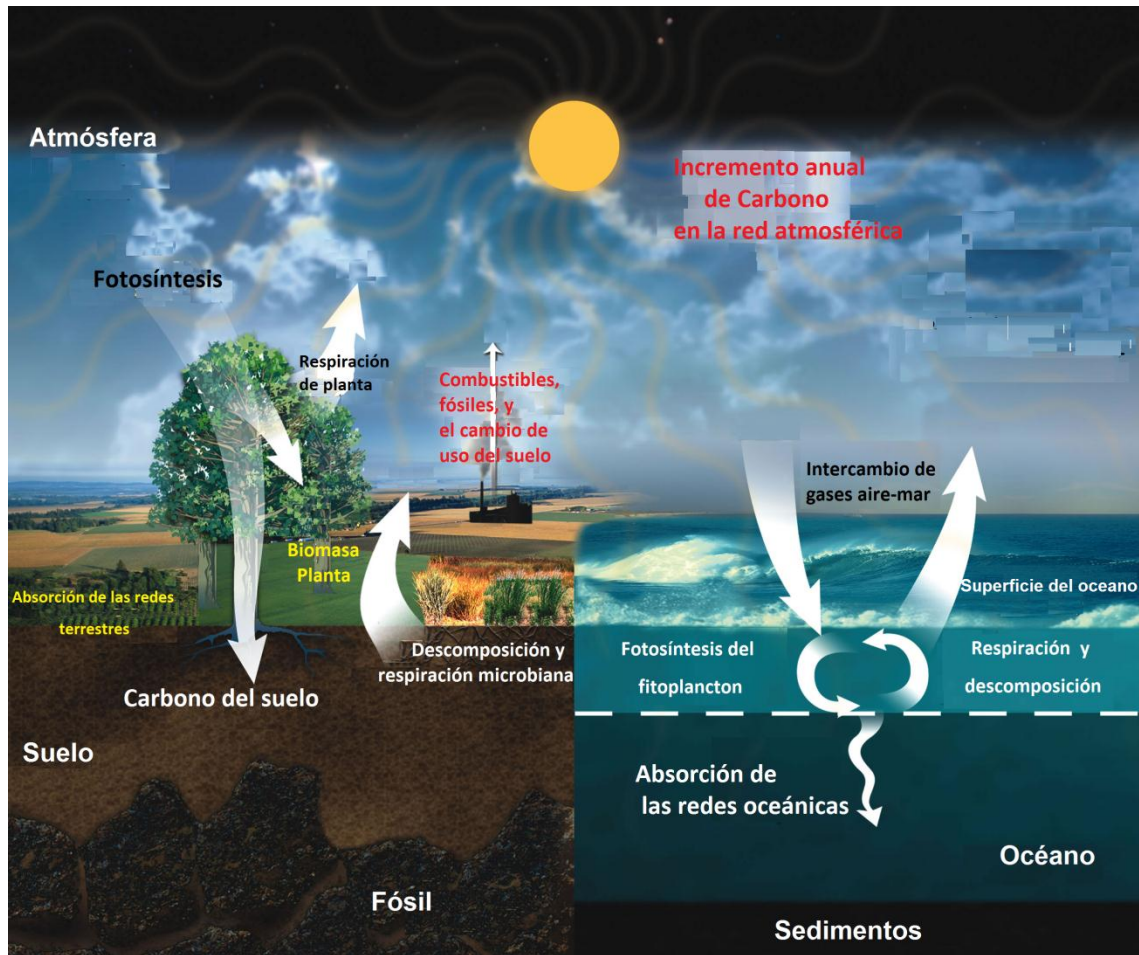


Figura 3. Ciclo del carbono.
(Fuente: Biological and Environmental Research Information System, 2008)

La agricultura es un importante contribuidor al cambio climático, pero también proporciona un sumidero y tiene potencial para aliviarlo. La Figura 4 muestra los componentes del ciclo de C de la Tierra. El C es almacenado sobre la tierra por las plantas, cultivos y árboles, y bajo ella, en el suelo y las raíces. El secuestro de C implica que el CO_2 es capturado de la atmósfera a través de la fotosíntesis por los árboles y plantas para almacenarlo como celulosa en sus troncos, ramas, hojas y frutos, y a cambio devuelven oxígeno (O_2) a la atmósfera. También las raíces de los árboles y plantas absorben CO_2 . La descomposición de la MO aumenta la porción de C almacenado en el suelo,

que es mayor que la cantidad total que hay en la vegetación y la atmósfera. Los animales absorben O_2 y expulsan CO_2 , y a través de sus heces emiten C y N_2O al suelo (Seeberg-Elverfeldt, 2010).

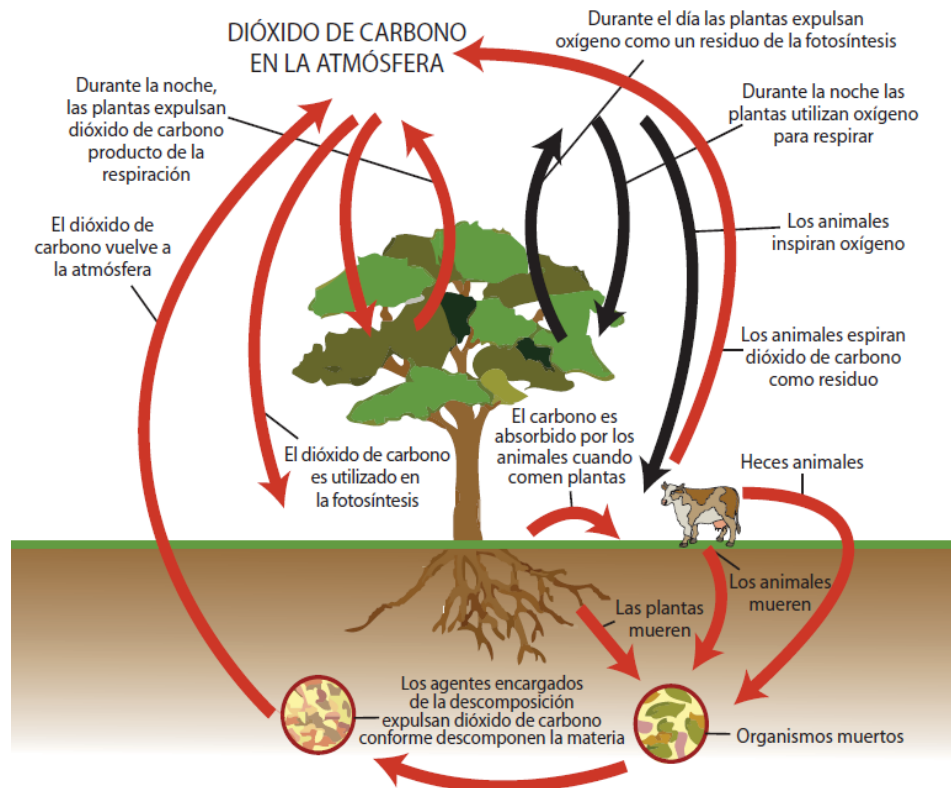


Figura 4. Ciclo del carbono a nivel parcela.
(Fuente: Energex, 2010)

Cuando los árboles se mueren o son talados, el C almacenado es desprendido. Parte de este C se integra a la MO de la que se componen los suelos forestales, donde puede permanecer por mucho tiempo. La emisión puede ser lenta, como en el caso de un árbol que se está muriendo o sujeto por años a la descomposición o a la putrefacción, a causa de la acción de los hongos, insectos, bacterias y otros organismos (Ciesla, 1996). Durante los meses de verano, los árboles de bosque llevan a cabo suficiente fotosíntesis

como para reducir notablemente el CO₂ atmosférico, y durante el invierno, el metabolismo de la biota, como la degradación bacteriana de humus, libera una cantidad significativa de CO₂ (Manahan, 2007).

Los sistemas ecológicos de la tierra, por medio de los cuales el C queda retenido en la biomasa viva o material vegetal, en la MO en descomposición y en el suelo, desempeñan un papel importante en el ciclo de C (Dávalos *et al.*, 2008).

4.2. El calentamiento global

Los GEI no son un invento del hombre, se han generado desde hace miles de millones de años de fuentes naturales como el vulcanismo, la vegetación y los océanos. La actividad biológica como la respiración de las plantas y animales y la descomposición microbiana de la MO también contribuyen a la producción natural de GEI (SEMARNAT, 2009). La temperatura media de la superficie se mantiene en unos relativamente confortables 15 °C, debido a un efecto invernadero (Manahan, 2007).

El efecto invernadero lo realizan los gases de la atmósfera. De éstos, los que tienen impacto en la temperatura son los llamados de GEI; que son principalmente el CO₂, CH₄, N₂O, O₃ y el vapor de agua. Estos gases dejan pasar la luz solar, la cual alcanza la superficie terrestre y marina y se transforma en calor, es decir, en radiación infrarroja. Una parte de esa radiación se queda en los mares y los continentes y otra es reemitida nuevamente hacia la atmósfera. Es entonces cuando los GEI detienen parte

de esa radiación infrarroja (Figura 5). Sin este fenómeno la temperatura de la tierra sería en promedio 33°C más fría, el agua del planeta estaría congelada y muy probablemente la vida no se hubiese desarrollado o sería muy distinta de como la conocemos hoy día (SEMARNAT, 2009).

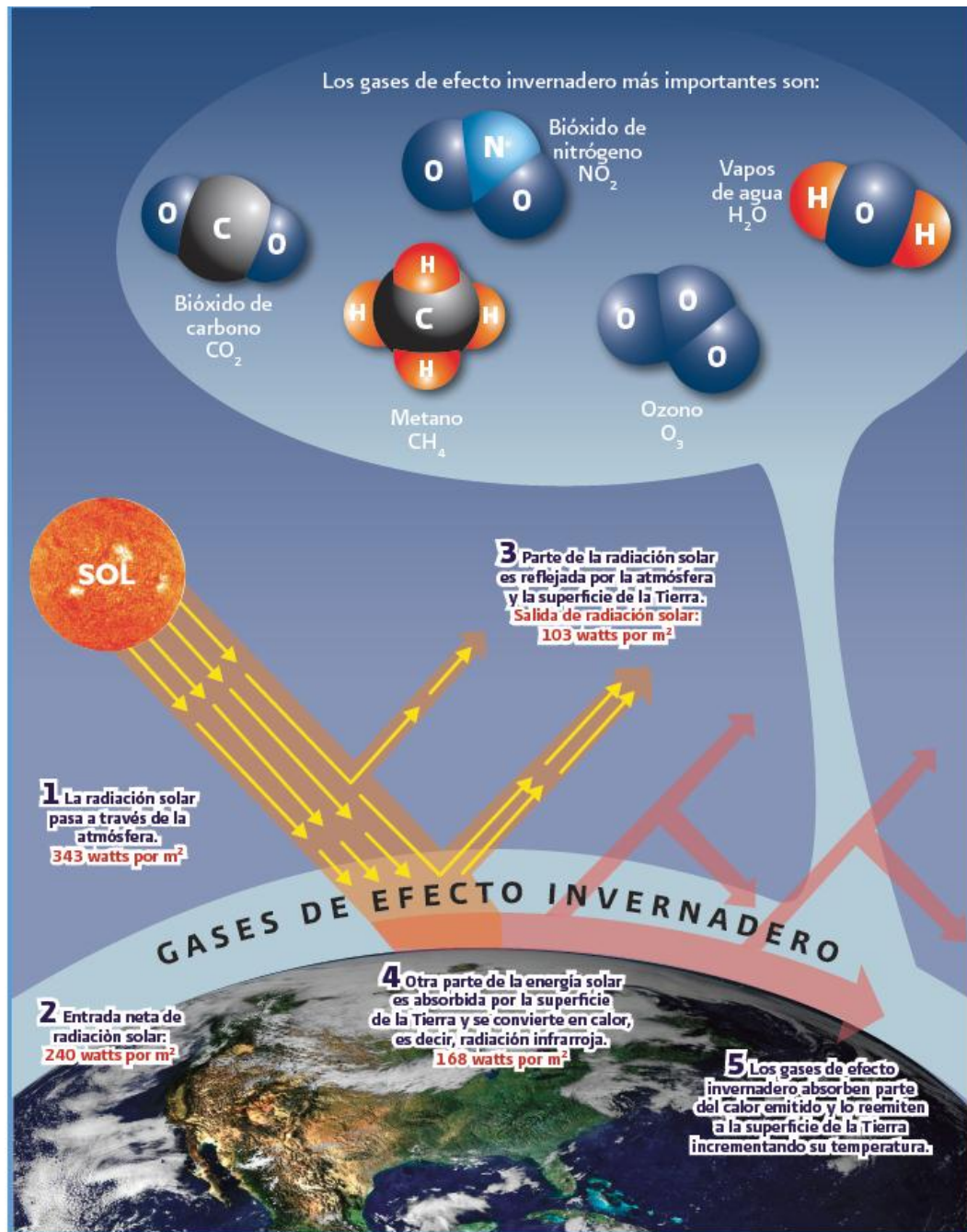


Figura 5. Efecto invernadero (SEMARNAT, 2009).

Dado que los GEI son uno de los factores más importantes para controlar la temperatura de la atmósfera. El CO₂ es el GEI antropogénico más importante. En el mundo la emisión de CO₂ se ha incrementado a la par del consumo de combustibles fósiles. Este incremento no ha sido pequeño: entre el año 1971 y 2005, la emisión mundial derivada del consumo de combustibles fósiles aumentó alrededor de 90%; en este último año se emitieron en el mundo 27 mil millones de toneladas (t) de CO₂ (SEMARNAT, 2009). Es muy probable que el aumento observado de la concentración de CH₄ se deba predominantemente a la agricultura y al uso de combustibles fósiles. El aumento de la concentración de N₂O se debe principalmente a las actividades agrícolas (IPCC, 2007b).

México produjo 643 millones de toneladas (Mt) de CO₂ en 2002. Aproximadamente 390 Mt CO₂ es decir, el 61% del total de las emisiones de C fueron generadas por la producción y consumo de energía a partir de combustibles fósiles, incluyendo las significativas emisiones producidas por las fugas (emisiones fugitivas, venteo y quema de gas) en la producción y transporte del petróleo y gas. Las restantes emisiones de C provinieron del sector uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (14%); residuos (10%); procesos industriales (8%); y agricultura y ganadería (7%) (Todd *et al.*, 2009).

Para resolver el problema del cambio climático se requiere la acción inmediata en todos los países. Un cambio decidido hacia la energía

renovable, y el uso generalizado de tecnologías avanzadas para capturar y almacenar las emisiones de C (Banco Mundial, 2010).

4.3. El efecto del cambio climático

El cambio climático puede generar cambios en el uso de insumos agrícolas (tierra, agua, calidad genética de las semillas) y en los niveles de producción (cantidad y calidad), los cuales se propagarían al resto de la economía (Rodríguez, 2007). La evidencia más contundente de que el cambio climático está ocurriendo es el incremento de la temperatura, aunque también se han observado importantes alteraciones en otros elementos del clima, como la precipitación y la humedad incluido otras evidencias como el aumento del nivel del mar, del que se habla tanto, o los deshielos y los huracanes (SEMARNAT, 2009).

IPCC (2007b) informó sobre los impactos en América Latina;

- Hacia la mitad del siglo los aumentos de temperatura y, por consiguiente, la disminución del agua en los suelos, darían lugar a una sustitución gradual de los bosques tropicales por las sabanas en el este de la Amazonia. La vegetación semiárida sería progresivamente sustituida por vegetación de tierras áridas.

- Podrían producirse pérdidas importantes de biodiversidad debido a la extinción de especies en numerosas áreas de la América Latina tropical.
- La productividad de ciertos cultivos importantes disminuiría, así como la productividad pecuaria, con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria. En las zonas templadas aumentaría el rendimiento de los cultivos de haba de soja. En conjunto, aumentaría el número de personas amenazadas de hambre.
- Los cambios en las pautas de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían seriamente la disponibilidad de agua para el consumo humano, para la agricultura y para la generación de energía.

Rodríguez (2007) señala que habrá consecuencias distributivas importantes y que los impactos negativos más significativos se concentrarán en países en desarrollo ubicados en latitudes bajas (zonas tropicales y subtropicales). Las temperaturas cambiantes pueden alterar el índice de la actividad microbiológica en los suelos. Esto hará que la MO se descomponga más rápidamente, lo que a su vez acelerará la velocidad de emisión de CO₂ (Ciesla, 1996).

En México, el fenómeno meteorológico del Niño se manifestó generalmente como un aumento en las lluvias invernales, principalmente en Baja California

Norte y parte de Sonora. Sin embargo, la señal del Niño en verano en gran parte de México es de una disminución generalizada de las lluvias (Magaña *et al.*, 2004).

Por otro lado, Conde *et al.* (2004) reportaron que el impacto posible del cambio climático en la agricultura en México se centró en el análisis de la vulnerabilidad de la producción de maíz de temporal, particularmente en el ciclo primavera-verano. Además, Arriaga y Gómez (2004) consideraron sobre el cambio climático global en la biodiversidad de México, que los tipos de vegetación más afectados negativamente serán los bosques de coníferas y encinos y los bosques mesófilos de montaña. México enfrenta grandes riesgos provenientes del cambio climático en relación con la disponibilidad de agua, la mayor frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales y las potenciales inundaciones en sus costas en ambos océanos en la actualidad existe cada vez mayor evidencia de que los impactos del cambio climático ya están ocurriendo (Todd *et al.*, 2009).

El problema del cambio climático, desde el punto de vista del desarrollo de un país o una región, cobra sentido cuando se considera la manera como las anomalías en el clima afectan a los sectores socioeconómicos (Magaña *et al.*, 2004).

4.4. El cambio climático y la agricultura

Lal (1999) comentó que la aceleración del cambio climático puede tener un efecto negativo en el bioma o ecosistema del mundo debido a que no habrá suficiente tiempo para adaptarse a un cambio tan rápido.

Mientras los sectores agrícola, forestal y de otros usos de la tierra sufren los impactos del cambio climático, al mismo tiempo contribuyen de forma significativa a las emisiones de gases. A la inversa, esto les otorga un potencial único para restringir el cambio climático reduciendo o evitando las emisiones y reforzando los sumideros de C (Seeberg-Elverfeldt, 2010). El cambio climático no sólo afecta los volúmenes de producción, sino también su calidad. El incremento de CO₂ en el aire reduce la concentración de proteínas en diversos tipos de cultivos (SEMARNAT, 2009).

La destrucción mundial actual de bosques y la conversión de sus tierras a usos agrícolas y pecuarios, contribuye sustancialmente a un mayor aumento global en los niveles de CO₂ atmosféricos (Manahan, 2007). Las principales fuentes de emisión de estos gases sin tomar en cuenta la quema de combustibles fósiles, son la deforestación y quema asociada para aumentar la cantidad de tierra disponible para la agricultura y el pastoreo (Ciesla, 1996).

Lal (1999) informó que existen numerosas actividades agrícolas que llevan a la emisión de GEI de los ecosistemas agrícolas a la atmósfera.

- CO_2 : las emisiones de CO_2 del suelo a la atmósfera está relacionada con la mineralización de C en la MO del suelo a través de procesos microbianos que lo utilizan como una fuente de energía, se combina C con O_2 que lleva a la liberación de CO_2 y H_2O . La quema de biomasa es otra fuente de CO_2 .
- CH_4 : la falta de O_2 en el suelo y la reducción de la prevalencia de la condición (anoxia) conducen a la metanogénesis o a la producción y liberación del CH_4 . También se emite por pantanos, ciénagas y humedades, por los rumiantes a través de la fermentación entérica, por la MO o composteo de biosólidos, los vertederos y a la quema de biomasa.
- N_2O : la principal fuente de N_2O atmosférico es la utilización de fertilizantes inorgánicos así como de abonos orgánicos, además es liberado por la quema de biomasa.

La agricultura en particular, como todas las actividades de uso de la tierra en general, tiene una gran importancia como reservorio de C. Este elemento es la base de la química de la vida, y se encuentra en todos los compuestos relacionados con la MO. En su formación se absorbe CO_2 del aire y en su degradación se devuelve este gas a la atmósfera (Canet, 2010). El balance del C en el ecosistema terrestre puede cambiar notablemente por el impacto directo de la actividad del ser humano, incluida la deforestación, la quema de

biomasa, el cambio del uso tierra y la contaminación de medio ambiente (Batjes, 1996). Algunas actividades agrícolas pueden aumentar la cantidad de MO y C en el suelo utilizando cultivos de cobertura o reducir las emisiones de CH₄ mediante la mejora de las prácticas de alimentación (Seeberg-Elverfeldt, 2010).

En el pasado, el desarrollo de la agricultura fue la principal causa del incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera (Robert, 2002). Para alcanzar las necesarias reducciones de las emisiones se necesita una transformación tanto de nuestro sistema de energía como de la forma en que gestionamos la agricultura, el uso de la tierra y los bosques (Banco Mundial, 2010).

4.5. El potencial de los sistemas agroforestales para la captura de carbono

Los sistemas agroforestales son técnicamente, socialmente, y económicamente viables (De Jong *et al.*, 1997). Estos sistemas combinan la producción de cultivos y árboles en la misma zona con el fin de obtener ambos productos, agrícolas y forestales (Mayrand y Paquin, 2004). Una práctica agroforestal es un arreglo distintivo de componentes en el espacio y tiempo. Un sistema agroforestal es un ejemplo local específico de una práctica, caracterizada por el medio ambiente, el manejo y arreglo de la especie vegetal y el funcionamiento económico y social (Young, 1989).

Los tres principales componentes agroforestales, plantas leñosas perennes (árboles), cultivos agrícolas y animales (pastizales), definen las siguientes categorías, las cuales se basan en la naturaleza y la presencia de estos componentes (Figuerola, 2009):

- Sistemas agrosilvícolas: consisten en alternar árboles y cultivos de temporadas (anuales o perennes).
- Sistemas silvopastoriles: consisten en alternar árboles y pastizales para sostener la producción animal.
- Sistemas agrosilvopastoriles: Consisten en alternar árboles, cultivos de temporada y pastizales para sostener la producción animal.

Montagnini (1992) se presentan los principales sistemas agroforestales practicados:

Sistemas agroforestales secuenciales: en ellos existe una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos; es decir, que los cultivos anuales y las plantaciones de árboles se suceden en el tiempo.

- ❖ Agricultura migratoria: es un sistema en el cual el bosque se corta y quema y la tierra se cultiva por pocos años, luego del periodo de

cultivo continúa una fase de barbecho. El periodo de barbecho es bastante más largo que el del cultivo: 5-20 años de barbecho y 2-3 años de cultivo.

- ❖ Sistema taungya: que significa “agricultura en laderas”; arboles y cultivos crecen de manera simultánea durante el periodo de establecimiento de la plantación forestal.

Sistema agroforestales simultáneos: consisten en la integración simultánea y continua de cultivos anuales o perennes, arboles maderables, frutales o de uso múltiple, y/o ganadería.

- ❖ Árboles en asociación con cultivos perennes: tienen grandes posibilidades de mejoramiento, a través de la introducción de variedades mejoradas de especies perennes, frutales y cultivos compatibles. Los cultivos de café y cacao constituyen la base para muchos sistemas agroforestales simultáneos.
- ❖ Huertos caseros: constituyen prácticas agroforestales muy antiguas. Estos sistemas se utilizan para cubrir las necesidades básicas de familias o comunidades pequeñas.
- ❖ El cultivo en callejones: se establecen hileras de plantas leñosas perennes con cultivos anuales sembrados en los espacios entre las

hileras. Lo más común es utilizar leguminosas de rápido crecimiento (Llenderal, 2007).

Sistemas agroforestales complementarios: consisten en hileras de árboles que pueden delimitar una propiedad o servir de protección para otros componentes u otros sistemas.

- ❖ Cerca viva: consiste en sembrar líneas de árboles y/o de arbustos como soportes para el alambre de púas o liso, siguiendo los límites de una propiedad o marcando las divisiones entre parcelas según los diferentes usos del suelo. Las cercas vivas más recomendables son las multi-estratos, que presentan diversidad de especies y usos de los árboles. Además, son adecuadas para los animales silvestres porque constituyen un puente o corredor para su desplazamiento de un lugar a otro de la finca, y ofrecen lugares seguros para sus nidos y proporcionan alimentos durante todo el año (Villanueva *et al.*, 2005).

- ❖ Las cortinas rompevientos: se consideran silvopastoriles cuando rodean áreas de pastoreo o de corte. Estos sistemas favorecen el bienestar de los animales por su protección contra el viento y la lluvia, pero también ayudan a contrarrestar el efecto del viento sobre los forrajes. Esto es importante en zonas con sequía estacional pues la

presencia de las cortinas pueden prologar la estación de crecimiento de las plantas forrajeras. Además, en pasturas degradadas, las cortinas rompevientos pueden reducir la erosión eólica (Llanderal, 2007).

Vaast *et al.* (2005) presentaron una breve reseña de los principales servicios ambientales que proporcionan los sistemas agroforestales:

- El mantenimiento de la fertilidad del suelo, la reducción de la erosión a través de aporte de MO al suelo, la fijación del nitrógeno y el reciclaje de nutrientes por los árboles asociados.
- La conservación del agua (cantidad y calidad) a través de reducción de la escorrentía y la mayor infiltración.
- Una menor contaminación de las fuentes de agua.
- La conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados.
- El almacenamiento de C.

Desde hace siglos las culturas indígenas de México han usado toda una gama de sistemas agroforestales, sobre todo en los bosques tropicales caducifolios y perennifolios (CCA, 2001). Actualmente en México se estima

que existen 0.86 millones de hectáreas (ha) con sistemas agroforestales (Sheinbaum y Masera, 2000).

La agroforestería tiene una estrategia importante para la captación de C debido al potencial de almacenamiento de C en sus múltiples especies de plantas y suelos, así como su aplicabilidad en las tierras agrícolas y de reforestación. Además, puede tener un efecto indirecto sobre el almacenamiento de C cuando se ayuda a disminuir la presión sobre los bosques naturales, que son el mayor sumidero de C. Otro influencia indirecta es a través del uso de las tecnologías agroforestales para la conservación del suelo, lo que podría mejorar el almacenamiento de C en árboles y suelos (Montagnini y Nair, 2004). El potencial de C almacenado en el sistema agroforestal en el área tropical tiene más de 70 mega gramos² (Mg) ha⁻¹ en la vegetación y de 20 Mg ha⁻¹ en el suelo (0-20 cm) (Mutuo *et al.*, 2005). Otros autores señalan que la cantidad del contenido de C varía de 16.7 Mg ha⁻¹ a 176.3 Mg ha⁻¹ (De Jong *et al.*, 1997), de 12 Mg ha⁻¹ a 228 Mg ha⁻¹ (Dixon, 1995) en varios sistemas agroforestales. El potencial de los sistemas agroforestales para el almacenamiento del C varía dependiendo del tipo del sistema, la composición de especies, la edad, la ubicación geográfica y los factores ambientales (Jose, 2009).

El potencial de almacenamiento de C en suelos erosionados y degradados puede ser restaurado a través de prácticas como la replantación, el uso de

² Mg = 1 x 10⁶ g = un millón de gramos.

suplementos nutricionales, la conservación del suelo y los recursos hídricos y sistemas de cultivo más adaptados (FAO, 2009). El crecimiento del contenido de MO del suelo eleva la productividad agrícola y la mitigación del cambio climático (Benites *et al.*, 1999).

Ávila *et al.* (2001) mencionaron que el pago de servicios ambientales por fijación y almacenamiento de C en sistemas agroforestales de café representa una alternativa para dar valor agregado a la producción, que podría tener un gran potencial e importancia para los productores. Vaast *et al.* (2005) mencionaron que el pago de servicios ambientales, a través de programas locales, nacionales e internacionales, puede contribuir enormemente a la amplia adopción de estas prácticas sostenibles.

En el año 2004, la CONAFOR publicó la convocatoria y las reglas de operación del Programa de Servicios Ambientales - Captura de carbono, Biodiversidad y Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA) con un monto autorizado de 100 millones de pesos. Las reglas de operación del año 2004 para este programa en su componente de mejoramiento de sistemas agroforestales en cultivos bajo sombra indican que se pueden pagar de \$400.00 a \$500.00 por ha si se acredita la producción bajo métodos orgánicos y que se puede pagar la captura de C sobre la base de \$50.00 por Mg de CO₂ (CONAFOR, 2004).

En el año 2010 CONAFOR publicó, a través de PSA-CABSA de 2011, que ya existe el pago por servicios ambientales, sin embargo, no incluye el tema de

captura de C en el presente año. El proyecto que es útil para las organizaciones de café orgánico de Huatusco, Veracruz se encuentra en la categoría B2.2 que refiere a la conservación de la biodiversidad, ya que el pago está destinado a promover la conservación de la biodiversidad (flora y fauna silvestre), en ecosistemas forestales y sistemas agroforestales con cultivos bajo sombra. Las reglas de operación indican que se pueden pagar de 100 a 500 ha = \$16,500.00 de 501 a 1000 ha = \$33,000.00 y mayor a 1000 ha = \$44,000.00 si se acreditó la producción bajo métodos agroforestales con cultivo bajo sombra (CONAFOR, 2010).

4.6. El sistema del cultivo de café en México

El café (*Coffea arabica*. L.) es uno de los cultivos de mayor importancia económica, social, cultural y ambiental en México (Rosas *et al.*, 2008) y una actividad de gran relevancia para la población indígena y campesina que habita en las áreas montañosas del centro y sureste de México (Anta, 2006). El café en México se produce en 16 estados que son en orden de importancia: Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero, San Luis Potosí, Hidalgo, Nayarit, Tabasco, Jalisco, Colima, Michoacán, Tamaulipas, Sinaloa, México y Morelos (Fuentes, 1979).

El café es una de las plantas que puede cultivarse de las formas más variadas e imaginables, desde plantaciones en condiciones prácticamente silvestres, hasta plantaciones con sofisticados sistemas de poda y manejo; soporta las más diversas condiciones y sistemas de cultivo, a los que se

adapta fácilmente (Fuentes, 1979). La variedad más cultivada en Veracruz, México es la Typica, con ramas principales que en un principio se desarrollan ligeramente hacia arriba, pero se vuelven horizontales y después colgantes al producir mucha fruta. Hojas elípticas, acuminadas o cuneiformes y los renuevos con sus hojas tiernas son generalmente de colores bronceados (Martínez, 1993) (Figura 6). Para crecer y producir requiere dos cosas: condiciones climatológicas apropiadas entre 600 y 1200 m de altitud y de 1500 a 2500 mm de precipitación anual promedio (Moguel y Toledo, 1999).



Figura 6. *Coffea arabica* L. en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).

En México, el café ocupa una superficie de 664,794 ha, el 90% de la superficie cultivada es con café bajo sombra diversificada (Escamilla *et al.*, 2005) de las cuales el 90% correspondían a pequeñas propiedades de menos de 5 ha o 70% con no más de 2 ha (Toledo, 1996), y la superficie de

café orgánico es de 66,390 ha (Rosas *et al.*, 2008). México aportó el 66% del total mundial con una producción de 47,461 t de café orgánico en 2002 (Escamilla *et al.*, 2005).

En México del 25% al 35% de los predios producen café en sistemas especializados de sombra, y solamente el 10% lo hacen a pleno sol. Es decir que todavía la mayor parte del café, dos terceras partes, se produce en los llamados sistemas policultivo tradicionales. Las áreas cultivadas con café en México se localizan en regiones que originalmente fueron cubiertas por selvas tropicales húmedas y bosques mesófilo (Moguel y Toledo, 2004).

Por lo anterior, existe un gradiente de cinco principales modalidades de producción de café que van desde los dos sistemas tradicionales con sombra diversificada y con árboles de la vegetación original, un sistema de policultivo comercial con árboles introducidos, y finalmente dos sistemas especializados: con sombra de una sola especie o a pleno sol (Moguel y Toledo, 2004) (Figura 7).

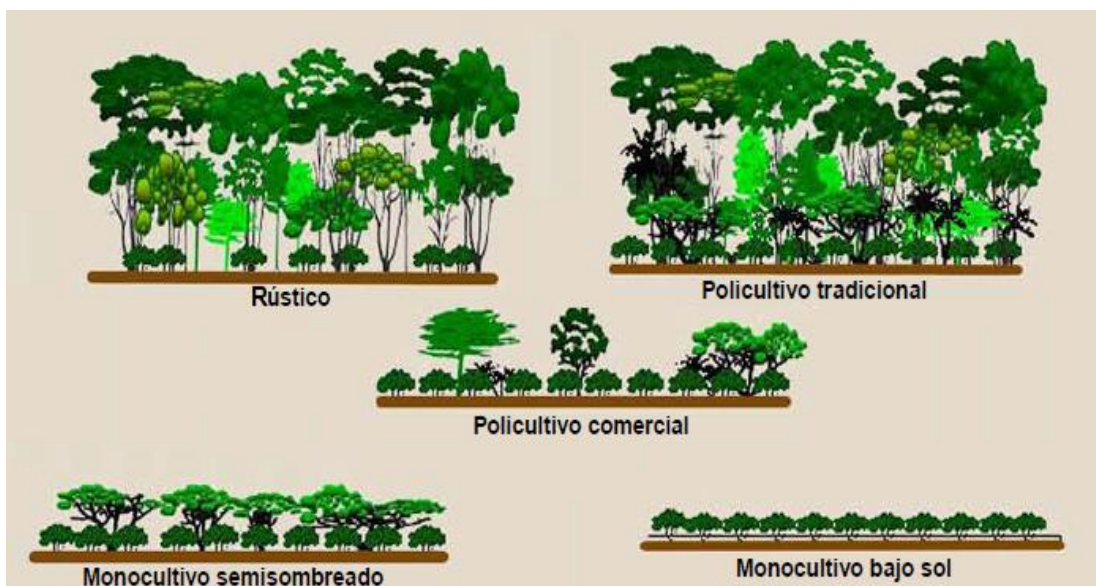


Figura 7. Los cinco sistemas de producción de café en México (Moguel y Toledo, 2004).

En la zona central de Veracruz, cuando se abren nuevas tierras a la cafeticultura, al desmontarse se dejan árboles con doble propósito, tanto para proporcionar sombra, como para aprovechar la madera para diferente uso (Martínez, 1993).

4.6.1. Sistema especializado

El sistema especializado es una modalidad de monocultivo, en el que sólo se produce café bajo sombra y se caracteriza por utilizar en forma dominante y casi única con sombreado de leguminosas del género *Inga* (Altamirano, 1998). Cabe mencionar que en estos cafetales especializados también se pueden encontrar otros árboles. Los árboles del género *Inga* son un complejo de diferentes especies que reciben nombres locales muy diversos, como vainilla, chalahuite blanco, chalahuite rojo, chalum entre otros (SAGARPA, 2008).

El sistema especializado representaba a principios de los 90's durante el siglo pasado, el 54.3% de las plantaciones cafetales en el centro de Veracruz, se constituyó como el sistema predominante (Altamirano, 1998). Sin embargo, con las crisis de bajos precios de 1989-1994 y la de 1998-2002, numerosos cafetales especializados se han convertido a policultivos comerciales y tradicionales (Escamilla y Díaz, 2002).

Las características de las leguminosas del género *Inga* que les han permitido constituirse como la sombra ideal para los cafetos son las siguientes: adaptación a los diversos ambientes cafetaleros, rápido crecimiento, facilidades para la poda, proveen sombra, cuentan con gran capacidad de regulación, tienen sistema radical profundo, los árboles no son muy altos, frondosos, de fuste mediano, de buen porte, con ramas extendidas y estratificadas, por lo general en forma de sombrilla o para sol. Asimismo, conservan el follaje durante todo el año y mantienen un volumen adecuado durante el verano, sombra tenue y uniforme, cierta resistencia a vientos, se aprovechan para leña y en algunas especies los frutos son comestibles (arilo y semilla), no presentan espinas, producen suficiente incorporación de MO al suelo (gran aporte de "sámago" y hojarasca), tienen capacidad fijadora de nitrógeno, no compiten con el cafeto por absorción de agua y nutrientes, y no son hospederas de plagas y enfermedades que lo afecten (Escamilla y Díaz, 2002). Sin embargo, implican una gran desventaja porque promueven la eliminación total de la variación genética de las especies de sombra, el cambio y homogenización de los recursos genéticos de café, promoviendo

asimismo la introducción de nuevas variedades altamente productivas. Por lo tanto, su impacto en la pérdida de la biodiversidad es considerable (Altamirano, 1998).

En el sistema especializado (Figura 8) se requiere un marco de plantación con un arreglo topológico definido con densidades de sombra que varían desde 40 hasta 400 árboles por ha, en función a las condiciones ambientales (altitud, exposición y características edáficas) y a las especies de *Inga* en particular. Se ha determinado que 100 árboles por ha de *Inga* proporcionan 40-60% de sombra. Las densidad de plantación se encuentran en un rango desde 1000 hasta 3300 cafetos por ha (Escamilla y Díaz, 2002).



Figura 8.El sistema de café especializado en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).

4.6.2. Sistema de policultivo tradicional

Un sistema de policultivo de café es la combinación, asociación o intercalación de otras especies útiles con el cafeto (Altamirano, 1998). La composición de su sombra presenta una alta variedad de especies vegetales, que incluyen elementos tanto de la vegetación natural como de especies cultivadas, tanto nativos como introducidas, con propósitos bien definidos (Rodríguez, 1994) (Figura 9). Los sistemas de policultivo son una estrategia alternativa a nivel de sistema de producción para hacer frente al deterioro económico de las pequeñas unidades de producción agrícola (Altamirano, 1998).

El sistema policultivo tradicional es muy parecido al sistema natural, ambos son plantaciones de café en sistemas agroforestales con sombra altamente diversificada, similares en estructura horizontal y vertical. Este sistema aprovecha integralmente el cafetal, combinando la producción de café como estrategia comercial, y la obtención y recolección de diversos productos, como estrategia de auto subsistencia. En esta combinación de estrategias es importante el aporte complementario de alimentos en la dieta familiar. Las densidades de población fluctúan entre 800 a 1600 plantas por ha, y en algunos casos llegan a las 2500. En varios predios se observan trazos en dirección a la pendiente, que en terrenos de ladera o bajo ciertas condiciones de manejo, como el uso del azadón, pueden ocasionar fuertes problemas erosivos. El 80% de los cafeticultores mexicanos que tienen sistema tradicional no aplican fertilizantes químicos, solo el 20% restante pueden aplicar una o dos veces (Escamilla y Díaz, 2002). Este sistema de cultivo es el de mayor distribución en las regiones cafetaleras de México, practicado por pequeños productores, y con alta participación indígena (Escamilla *et al.*, 1994). Representa el 31.5% de los predios cafetaleros en el estado de Veracruz (Altamirano, 1998).

Son plantaciones de café bajo sombra en cuya composición existe una gran diversidad de árboles nativos o de vegetación natural, así como de árboles introducidos que han sido sembrados por los propios productores, principalmente frutales como los plátanos, mangos, cítricos (naranjas, limones y mandarinas), pomarrosa, nísperos. Este sistema aprovecha

integralmente el cafetal, combinando la producción de café como estrategia comercial, y la obtención y recolección de diversos productos destinados para autoconsumo (SAGARPA, 2008). Para el consumo familiar hay aportes en la dieta alimenticia, el tratamiento de enfermedades, la generación de combustibles, la construcción y el mejoramiento de la vivienda, la satisfacción de necesidades psíquicas (ceremoniales, ornamentales) y la preservación del medio ambiente mediante la conservación de la biodiversidad (Escamilla y Díaz, 2002).



Figura 9. El sistema de café policultivo tradicional en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).

En México, el cultivo del café es una de las actividades económicas más importantes en la captación de divisas. Algunas de las opciones para mejorar los ingresos de los pequeños y medianos productores de café, han sido el enriquecimiento de los cafetales con especies maderables, y/o la diversificación de la producción del café asociada con otros cultivos como la Inga y frutales, entre otros. El café cultivado en sistemas agroforestales proporciona una amplia gama del contenido de C; estos necesitan ser reconocidos a través de incentivos locales, nacionales e internacionales para mejorar el sustento rural. Además, los productos que ofrecen los servicios ambientales tienen doble valor, como bien de consumo que se caracteriza por una determinada calidad, y como un servicio ambiental, que en este caso tiene la ventaja de proteger el medio ambiente.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Características del área de estudio

5.1.1. Localización geográfica

El área de estudio se localiza en el campo experimental del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma Chapingo, el cual se ubica a los 19° 09' de latitud Norte y los 96° 57' de longitud Oeste, en el km 6 de la carretera Huatusco-Xalapa, en el sitio conocido como Tlaxopa, jurisdicción de Tepecingo, municipio de Huatusco, Veracruz, a una altitud de 1334 m (Pérez, 2004) (Figura 10).

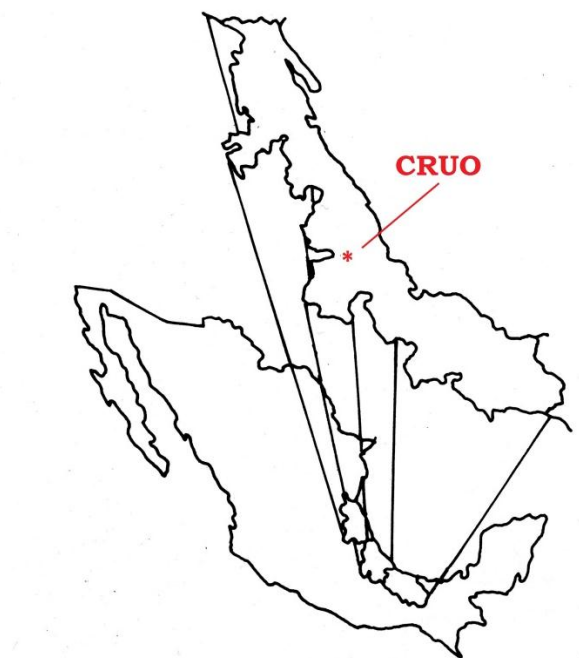


Figura 10. Ubicación geográfica del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) en el estado de Veracruz (Pérez, 2004).

5.1.2. Geología y relieve

El CRUO está situado en el extremo oriental del eje neovolcánico, denominado localmente como sierra de Chiconquiaco, una de las diez unidades orogénicas en México reconocidas por Tamayo (1999). Su origen se remonta a finales del terciario, hace 10 millones de años aproximadamente (De Cerna, 1974).

El área está constituida en su totalidad por rocas ígneas extrusivas que incluyen depósitos consolidados de tobas líticas y cenizas finas y gruesas con poco grado de consolidación (Montiel y Robledo, 1998); las tobas son de color rojo, vítreas, de composición andesítica y basáltica y en menor proporción obsidiana las cenizas presentan texturas piroclásticas con gran contenido de pómez, finas y gruesas con poco grado de consolidación (Beristain, 2000).

5.1.3. Fisiografía e hidrografía

En estudio realizado por Licona (1982) en el CRUO, identifica la fisiografía por la presencia de un área de lomerío (60%), alternando con laderas (30%) y valles (10%), los cuales se diferencian por la forma, pendiente, vegetación y tipo de suelo (Figura 11). El grande pendiente varía de 3 a 60 % (Licona, 1986; Montiel y Robledo, 1998). En cuanto a la hidrografía, el área se ubica dentro de la cuenca hidrológica intermedia alta del río Jamapa, presentándose al norte del predio un afluente secundario denominando río Citlalapan (dos puentes), el cual desemboca en Boca del Río, Veracruz (Beristain, 2000).

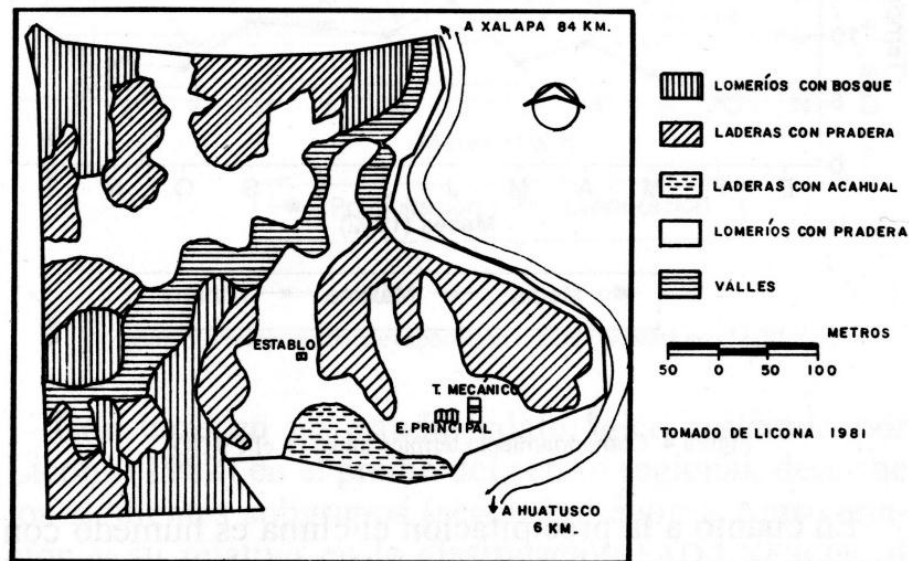


Figura 11. Caracterización fisiográfica del predio del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) (Licona, 1981, citado por Pérez, 2004).

5.1.4. Clima

El registro de la estación meteorológica del centro regional indican que la temperatura y la precipitación media anual han variado notablemente, la primera ha ascendido de 17.2 °C a 18.8 °C y la segunda de 1700.17 mm a 1745 mm; lo que hace suponer un cambio en los factores climáticos de la región (Pérez, 2004).

El clima que prevalece en el centro regional está representado por la fórmula climática (A)C(m)w”b(i’)g; esto es una transición entre los cálidos A y los templados C (Cisneros *et al.*, 1993) con una temperatura media anual de 17.2 °C; la temperatura más alta se presenta en mayo y es de 20.4 °C; en tanto que la más baja ocurre en enero con 14.4 °C (Pérez, 2004) (Figura 12). Un fenómeno climático importante es la presencia esporádica de heladas,

ubicándose entre 3 y 4 días al año concentradas en los meses de diciembre a febrero (Montiel y Robledo, 1998).

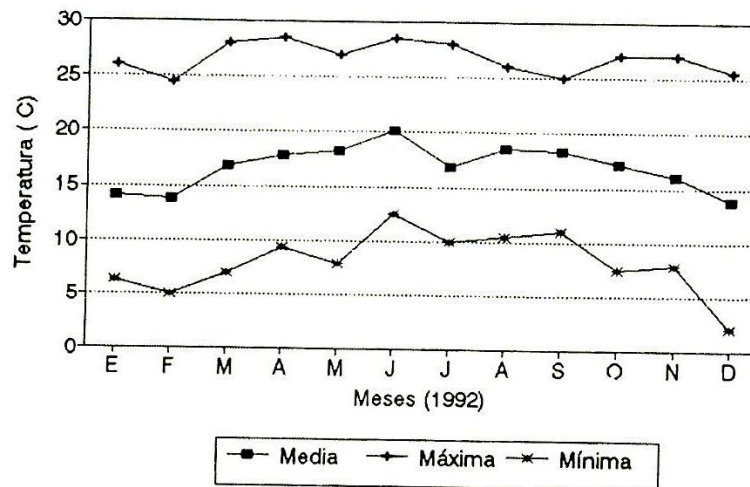


Figura 12. Comportamiento térmico anual en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO)(Pérez, 2004).

En cuanto a la precipitación las lluvias se presentan en verano, con una media anual de 1700.17 mm. El mes más seco es marzo con 30.90 mm y el más lluvioso septiembre con 373.6 mm; su distribución define una curva normal con presencia de canícula corta en el mes de agosto (Pérez, 2004).

En cuanto a la evaporación, esta tiende a tener su máximo en los meses más lluviosos y de alta temperatura de mayo a septiembre, con una máxima aproximada a los 140 mm, mientras que en invierno en los meses de Noviembre a Febrero se presentan los menores valores con una evaporación mínima aproximada de 50 mm (Figura 13).

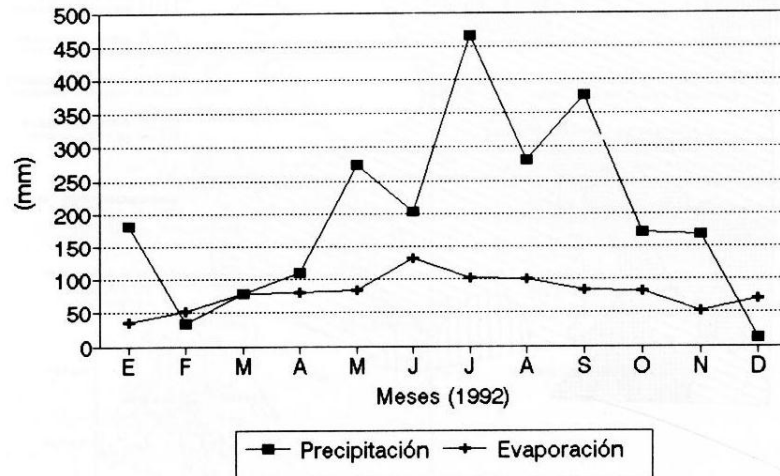


Figura 13. Precipitación y evaporación media mensual en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO)(Pérez, 2004).

5.1.5. Suelo

Los suelos, en general, son de origen volcánico, de materiales finamente divididos, presentan una gran cantidad de minerales sin cristalización, por lo que no existen estructuras definidas. Son suelos 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) (Figura 14).

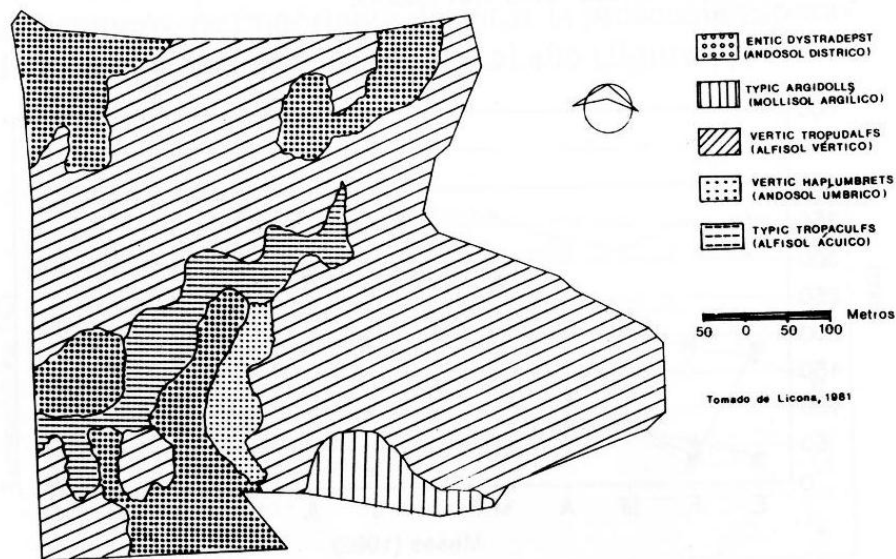


Figura 14. Mapa de suelos en el predio del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO)(Licona, 1981, citado por Pérez, 2004).

Los suelos presentes en el CRUO según Montiel y Robledo (1998), tienen un perfil A/C, con una profundidad de más de 70 cm. El pH varía entre 5.2 y 6.0.

Los Andosoles tienen una alta friabilidad, dada por la poca agregación de sus partículas y la baja densidad aparente, menor de 0.85 g cm^{-3} , y la capacidad de retener gran cantidad de humedad (Cisneros *et al.*, 1993), y la capa superficial contiene alto contenido de materia orgánica (Florescano y Ortiz, 2010).

5.1.6. Vegetación

La vegetación dominante en el CRUO está representada por bosque mesófilo, sumamente perturbado por la introducción de la ganadería extensiva y el cultivo del café. Esta comunidad vegetal presenta tres estratos: el superior que alcanza los 28 y 30 m de altura, el intermedio ubicado entre

los 18 y 20 m y el inferior situado entre 4 y 6 m (Pérez *et al.*, 1996), en relictos bien conservados el estrato herbáceo no se presenta (Cisneros *et al.*, 1993). Según una lista florística elaborada en un relicto de vegetación, de un poco más de una ha, determinaron 44 familias, con 64 géneros y 84 especies (Pérez, 2004). Los troncos de los árboles pueden alcanzar dos metros de diámetro (Florescano y Ortiz, 2010).

Los géneros predominantes encontrados son *Liquidambar*, *Quercus*, *Meliosoma*, *Cornus*, *Ilex* y *Clethra*; los estratos superiores tienen mayor diversidad en comparación con los de clima templado (Beristain, 2000). En el Anexo 1 se describen las especies de mayor predominancia en este tipo de ecosistema.

5.2. Descripción de los tratamientos

5.2.1. Sistema especializado (ESP)

Es una modalidad de monocultivo, en la que sólo se produce café bajo sombra no diversa que se caracteriza por utilizar principalmente árboles del género *Inga*. El arreglo topológico del sistema de plantación consiste de marco real de 6 x 6 m con café (*Coffea arabica* L.) en un arreglo de 1.5 x 2 m. Este se localiza entre los 19°10'26" N y 96°57' 58" O y a 1357 m de altitud, y su superficie fue de 0.5 ha con una producción estimada de 6000 kg ha⁻¹ de café cereza y una época de cosecha que empieza desde enero hasta mayo. La pendiente del terreno fue de 51%.

Antes del sistema especializado en el lugar de muestreo había bosque mesófilo de montaña (hace 11 años).

5.2.2. Sistema policultivo tradicional (PTR)

Consiste en una plantación de café bajo sombra en cuya composición existe una gran diversidad de árboles nativos o de vegetación natural así como de *Persea schiedeana* (chinene), *Inga* spp. (Inga), y *Grevillea robusta* (grevillea). Los cafetos presentaron un arreglo topológico de 2 x 2 m. Este se localiza a 19°10'26" N y 96°58'04" O y a 1320 m de altitud, y su superficie fue de 0.3 ha con una producción estimada de 1650 kg ha⁻¹ de café cereza y una época de cosecha que empieza desde enero hasta mayo. La pendiente de terreno fue de 9%.

Antes del sistema policultivo tradicional en el lugar de muestreo había un sistema de potrero con pastoreo de ganado bovino (hace 30 años).

5.2.3. Bosque mesófilo de montaña (BMM)

Consiste en un área florística de plantas vasculares; de importancia forestal: *Liquidambar straciflua* L. (ocozote), *Meliosma alba* (quiavis), *Persea* spp. (aguacatillo), *Solanum muricatum* (hierba mora), *Chamaedorea tepejilote* (tepejilote); y de importancia ornamental numerosas orquídeas y helechos (Anexo 1). Este se localiza a 19°10' 45" N y 96°58' 03" O, y a 1284 m de altitud. Se ubica sobre tres condiciones de microrrelieve: vega de río, ladera y meseta. La pendiente de terreno fue de 47%.

El área de estudio estuvo dividida en tres sistemas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Identificación de los sistemas naturales y agroforestales evaluados en el campo experimental del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).

Nombre del sistema	Clave de identificación	Superficie (ha)	Pendiente del terreno (%)	Establecimiento (año)
Sistema especializado (19°10'26" N y 96°57' 58" O)	ESP	0.5	51	2000
Sistema policultivo tradicional (19°10'26" N y 96°58'04" O)	PTR	0.3	9	1981
Bosque mesófilo de montaña (19°10' 45" N y 96°58' 03" O)	BMM	1.1	47	1980

Los sistemas agroforestales ESP y PTR están aproximadamente a 100m de distancia entre ellos, y la distancia entre los sistemas agroforestales y el BMM es aproximadamente de 1000m (Figura 15).

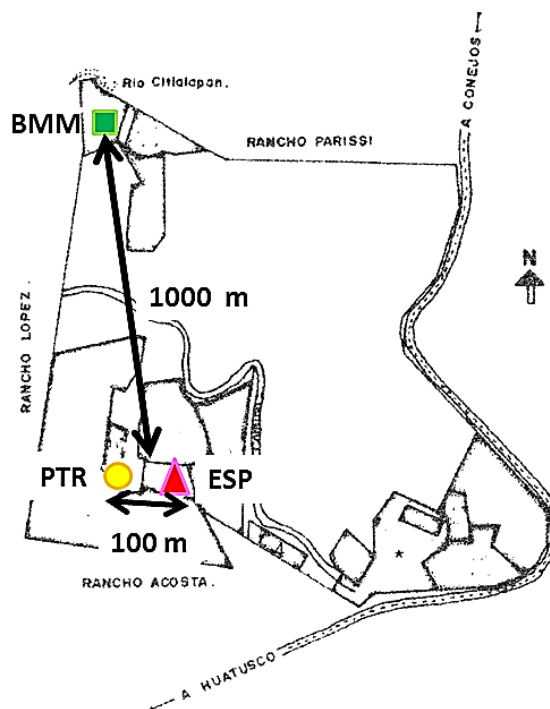


Figura 15. Distancia entre los sistemas agroforestales estudiados en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO).

5.3. Muestreo de suelo y medición de biomasa

El diseño de las unidades de muestreo (UM) fue de tipo sistemático. Para fines estadísticos se colocaron tres UM en sentido Norte – Sur (UM 2, 3 y 4) y una en sentido Este – Oeste (UM 1) en cada sistema del estudio (Figura 16). Las UM fueron marcos rectangulares de 25 x 4 m (100 m²) (Etchevers *et al.*, 2005).

Para obtener el valor promedio de las UM se tomaron en cuenta los valores de los puntos N y S de cada una de las unidades (UM 2, 3 y 4) y de los puntos E y O de la UM1, y así se obtuvieron muestras representativas de cada una de las UM que se utilizaron para calcular las características de la biomasa vegetal (arbustiva, herbácea y mantillo) y del suelo a cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30 y 30-60 cm) (Etchevers *et al.*, 2005.; Rüginitz *et al.*, 2008) (Figura 17).

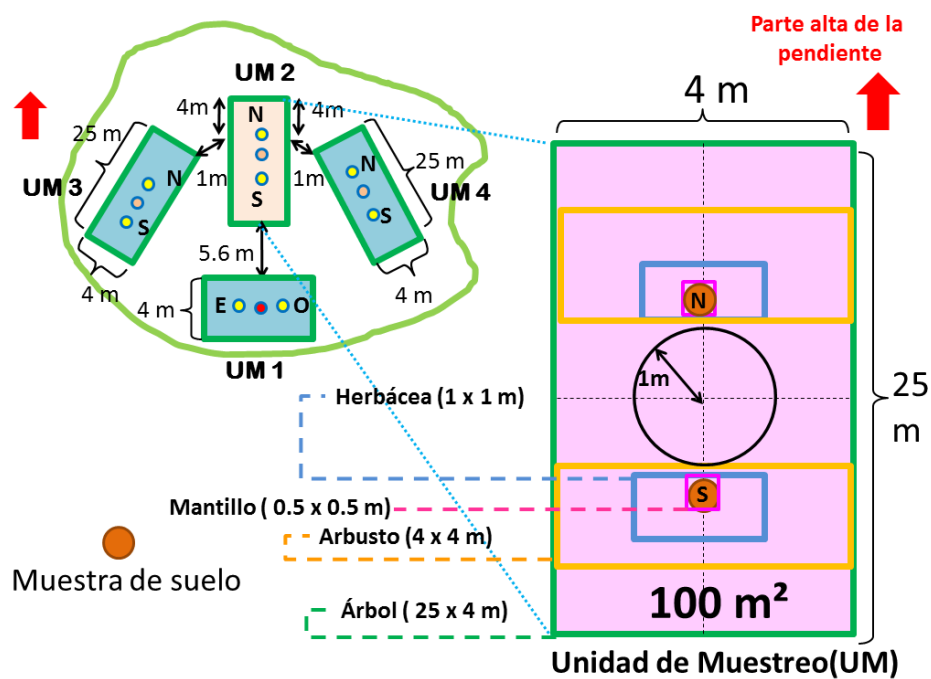


Figura 16. Esquematización de la unidad de muestreo (UM) utilizada en el sistema agroforestal.

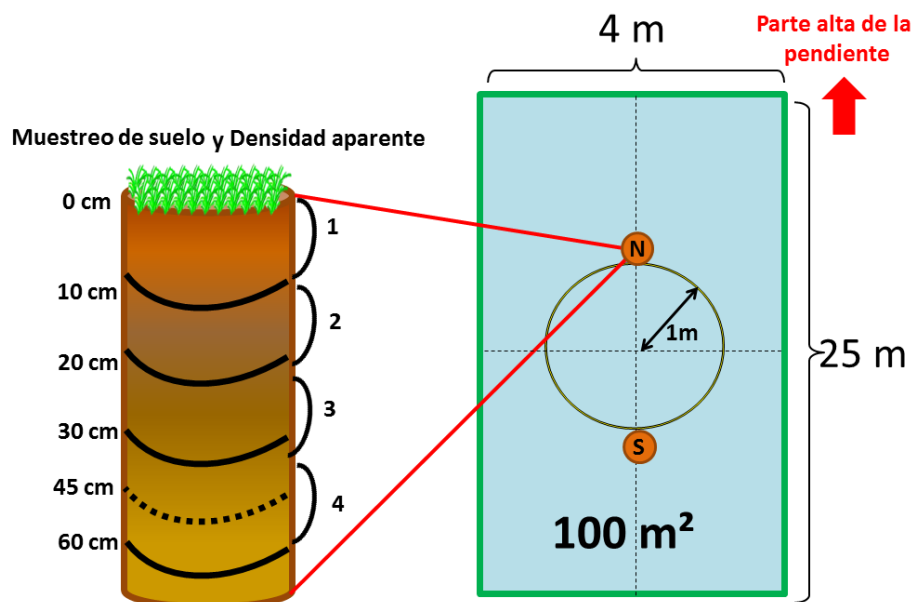


Figura 17. Esquematización de las profundidades del muestreo del suelo.

Para la medición del C edáfico en los sistemas estudiados se colectaron muestras de dos pozos por UM. Las características del pozo fueron: 80 cm de largo, 60 cm de ancho, 50 cm de profundidad, y se realizaron a un metro del centro de la UM (Figura 18). El muestreo del suelo se utilizó un tubo muestreador de PVC de 10 cm de largo y 5.5 cm de diámetro. El tubo se golpeó verticalmente con una tabla de madera y un martillo o maceta hasta penetrar totalmente en cada profundidad (0-10, 10-20, 20-30 y 30-60 cm); posteriormente se extrajo la muestra del tubo, y se guardó en una bolsa de plástico etiquetada para transportarse al laboratorio (Figura 19).

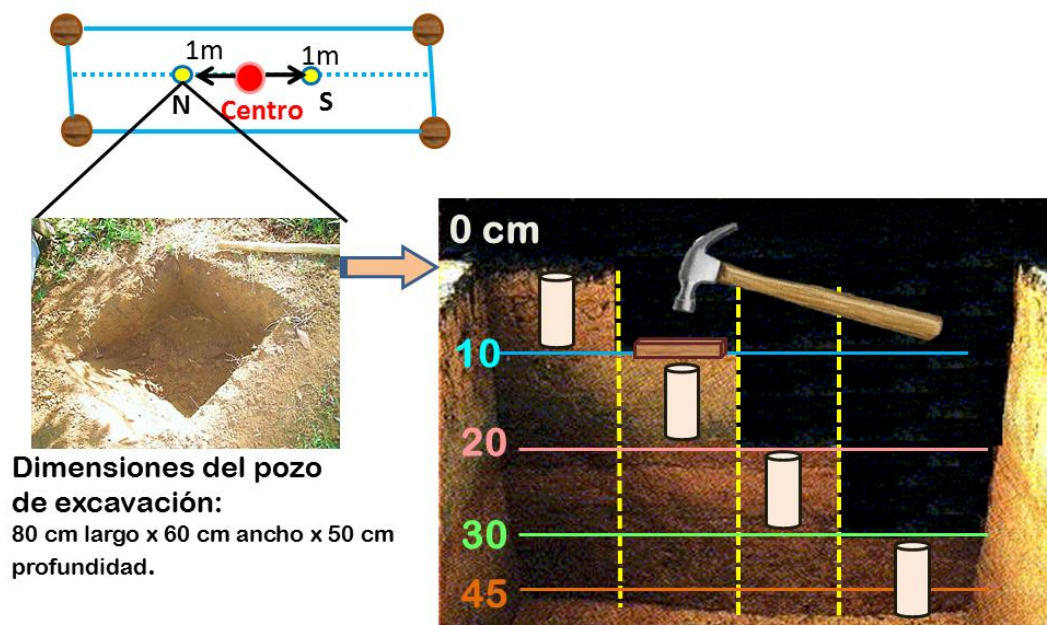


Figura 18. Muestreo de suelo a cuatro profundidades (0-10,10-20,20-30 y 30-60 cm) en sistemas agroforestales y forestal.



Figura 19. Procedimiento de toma de muestra del suelo.

La metodología seguida para el presente trabajo corresponde a lo establecido por Rüginitz *et al.* (2008), donde para determinar la biomasa vegetal total se utilizó la siguiente ecuación:

$$BVT = (BA + Ba + BTC + BH + BM + BR)$$

Donde:

BVT = biomasa vegetal total (Mg ha^{-1})

BA = biomasa arbórea (Mg ha^{-1})

Ba = biomasa arbustiva (incluye cafetos) (Mg ha^{-1})

BTC = biomasa de troncos caídos (Mg ha^{-1})

BH = biomasa herbácea (Mg ha^{-1})

BM = biomasa de mantillo³(Mg ha^{-1})

BR = biomasa de raíces (Mg ha^{-1})

5.3.1. Biomasa arbórea (BA)

Para evaluar las especies arbóreas se utilizó toda el área disponible de la UM (25 x 4 m), considerando todos los árboles dentro de ella cuyo diámetro a la altura del pecho (Dap = 1.30 m) fuera mayor que 5 cm (Etchevers *et al.*, 2005.; Rüginitz *et al.*, 2008) (Figura 20).

³Incluye hojarasca, residuos agrícolas y estiércoles.



Figura 20. Medición del diámetro a la altura del pecho (Dap) de la vegetación arbórea.

Para calcular la biomasa de los árboles (chinene y grevillea) en los sistemas agroforestales se utilizó la siguiente ecuación (Segura *et al.*, 2006):

$$Y = a + b \times \log_{10} (D)$$

Donde:

$Y = \log_{10}$ biomasa arriba del suelo en kilogramos

$a = -0.834$

$$b = 2.223$$

D = Dap en centímetros

$\log_{10}$ = logaritmo en base 10

Para calcular la biomasa de los árboles de *Inga* spp. por individuo en los sistemas agroforestales se utilizó la siguiente ecuación (Segura *et al.*, 2006):

$$Y = a + b \times \log_{10} (D)$$

Donde:

Y = $\log_{10}$ biomasa arriba del suelo en kilogramos

$$a = -0.889$$

$$b = 2.317$$

D = Dap en centímetros

$\log_{10}$ = logaritmo en base 10

Para calcular la biomasa aérea del plátano por individuo se utilizó la siguiente ecuación (Van Noordwijk *et al.*, 2002):

$$Y = 0.030 D^{2.13}$$

Donde:

Y = biomasa en kilogramos

D = Dap en centímetros

Para calcular la biomasa de los árboles en BMM se utilizó la siguiente ecuación (Brown, 1997, citados por Pearson *et al.*, 2005):

$$Y = \exp (-2.289 + 2.649 \times \ln (D) - 0.021 \times (\ln D)^2)$$

Donde:

Y = biomasa arriba del suelo en kilogramos

exp = exponente

ln = logaritmo natural

D = Dap en centímetros

Luego, para calcular la cantidad de biomasa por ha, se sumó la biomasa de todos los árboles medidos y registrados tanto en la parcela de 25 x 4 m.

$$BA = BT \times 0.1$$

Donde:

BA = biomasa arbórea vegetal total (Mg ha^{-1})

BT = biomasa total (Kg) en la UM de 25 x 4 m

0.1 = factor de conversión en la UM de 25 x 4 m

5.3.2. Biomasa arbustiva, cafetos y otras especies de arbustos (Ba)

Para la evaluación de vegetación arbustiva se utilizaron cuadros de 4 x 4 m (16 m^2), colocados en 1 m del centro de la UM, tomando como referencia el Norte. Luego se midió el diámetro de tallo arriba de 15 cm de suelo (Figura 21).

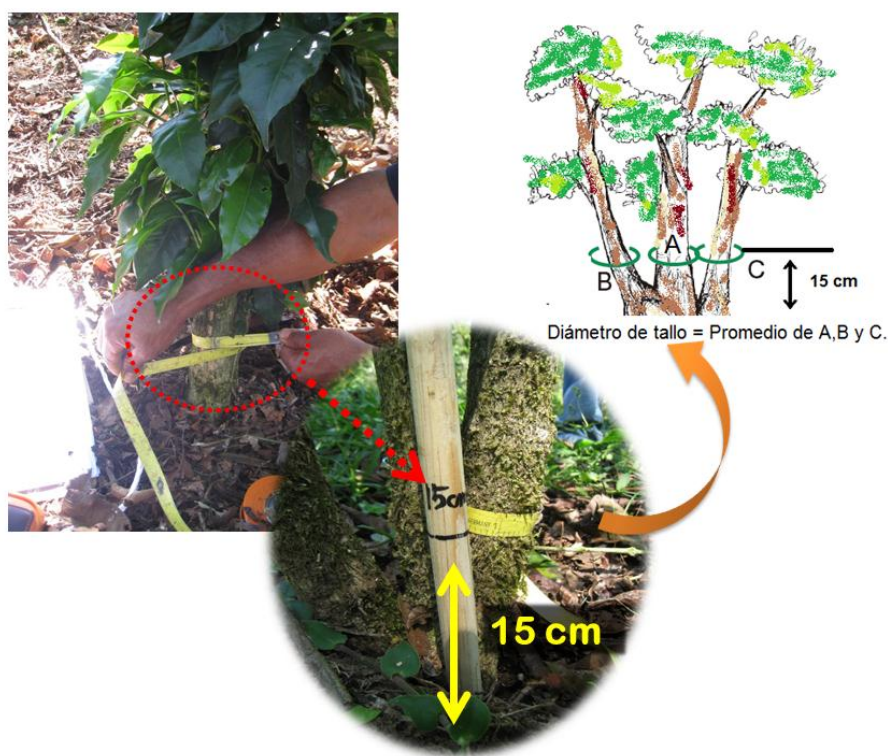


Figura 21. Medición de diámetro de los tallos de los cafetos.

Para calcular la biomasa aérea del café se utilizó la siguiente ecuación (Segura *et al.*, 2006):

$$Y = a + b \times \log_{10} (D) + c \times \log_{10} (H)$$

Donde:

$Y = \log_{10}$ Biomasa en kilogramos

$a = -1.113$ (constante)

$b = 1.578$ (constante)

$c = 0.581$ (constante)

D = diámetro de tallo arriba de 15 cm de suelo en centímetros

H = altura en metros

$\log_{10}$ = logaritmo en base 10

Luego, para calcular la cantidad de biomasa arbustiva por ha, se sumó la biomasa de todas las especies arbustivas (cafetos y otras especies) medidas.

$$Ba = BaSUM \times 625 \times 10^{-3}$$

Donde:

Ba = biomasa arbustiva vegetal total (Mg ha⁻¹)

BaSUM = biomasa total (kg) en la subunidad de muestreo (SUM) de 4 x 4 m

625×10^{-3} = factor de conversión en la SUM de 4 x 4 m

5.3.3. Biomasa de troncos caídos (BTC)

Para estimar la biomasa de troncos caídos > 5 cm de diámetro y > 50 cm de largo, el cálculo se realizó de la siguiente manera (Hairiah *et al.*, 2001):

$$BAC = \pi r^2 \times L \times 0.43$$

Donde:

BAC = biomasa de troncos caídos en gramos

π = π , constante (3.1416)

r = radio en centímetros

L = largo del tronco caído en centímetros

0.43 = densidad de tronco caído (g cm⁻³) (Pearson *et al.*, 2005)

Luego, para calcular la cantidad de biomasa por ha, se sumó la biomasa de todos los troncos caídos medidos.

$$BTC = BAC \times 10^{-4}$$

Donde:

BTC = biomasa de troncos caídos total (Mg ha^{-1})

BAC = biomasa total (g) en la UM de 25 x 4 m

10^{-4} = factor de conversión

5.3.4. Biomasa herbácea (BH)

Para evaluar la vegetación herbácea se utilizó un marco de 1 x 1 m (1 m^2), colocado a 1 m del centro de UM y dentro de subcuadrante de 4 x 4 m. En cada muestreo se cortó el material vegetal a ras de suelo (herbáceas) y se levantó el mantillo y los residuos hasta dejar limpia la sección dentro del marco de 0.5 m. Las muestras fueron guardadas en bolsas plásticas para el transporte y de papel para su secado en la estufa. Las bolsas fueron previamente identificadas y después enviadas al laboratorio para el secado de las muestras en horno-estufa de aire forzado a 75°C , y se pesó para determinar su peso seco (Figura 22).

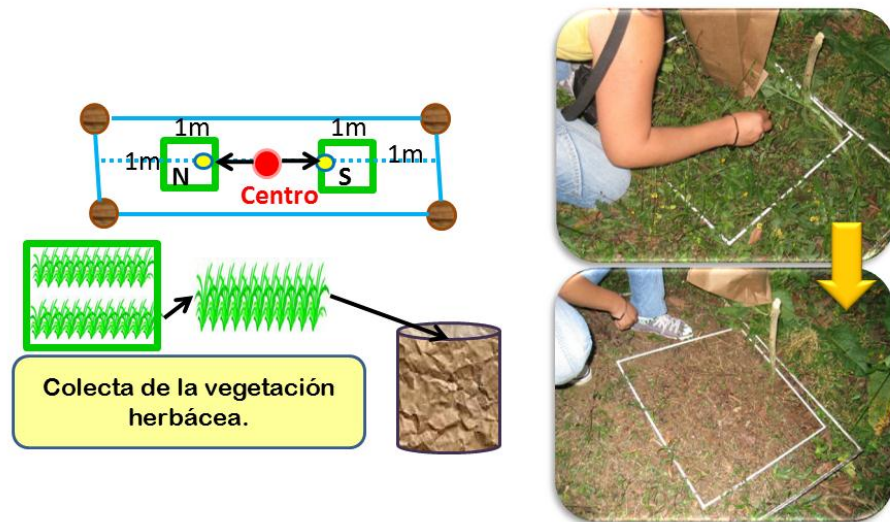


Figura 22. Procedimiento para el muestreo de la vegetación herbácea.

La biomasa herbácea se calculó con la fórmula:

$$BH = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0.01$$

Donde:

BH = biomasa herbácea, materia seca ($Mg\ ha^{-1}$)

PSM = peso seco (g) de la muestra colectada

PFM = peso fresco (g) de la muestra colectada

PFT = peso fresco total (g) por metro cuadrado

0.01 = factor de conversión

5.3.5. Biomasa de mantillo (BM)

El muestreo de mantillo se realizó también en forma sistemática con subcuadrantes de 0.5 x 0.5 m (0.25 m²) colocados en el dentro del marco para muestreo de biomasa herbácea. Se recolectó y se pesó el mantillo, la hojarasca, los residuos agrícolas y el estiércol acumulados, según fuera el caso. Las bolsas fueron previamente identificadas y después enviadas al laboratorio para el secado de las muestras en horno-estufa de aire forzado a 75 °C, y se pesó para determinar su peso seco (Figura 23).

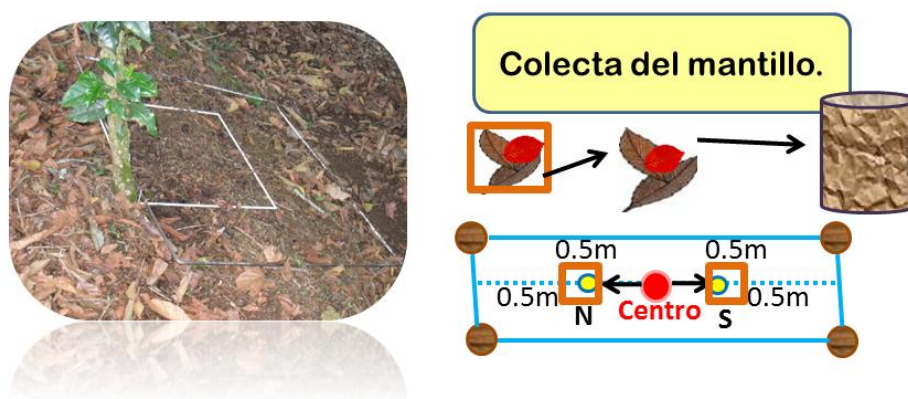


Figura 23. Procedimiento para el muestreo de mantillo.

La biomasa de mantillo se calculó con la fórmula:

$$BM = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0.04$$

Donde:

BM = biomasa de mantillo, materia seca (Mg ha⁻¹)

PSM = peso seco de la muestra colectada

PFM = peso fresco de la muestra colectada

PFT = peso fresco total por metro cuadrado

0.04 = factor de conversión

5.3.6. Biomasa de raíces (BR)

Para estimar la biomasa de raíces, el cálculo se realizó con la siguiente ecuación (Cairns *et al.*, 1997; IPCC, 2003):

$$BR = \exp [-1.0587 + 0.8836 \times \ln(BAE)]$$

Donde:

BR = biomasa de raíces, materia seca (Mg ha^{-1})

exp = exponente

ln = logaritmo natural

BAE = biomasa arbórea, arbustiva y herbácea, materia seca (Mg ha^{-1})

5.3.7. Carbono en la biomasa vegetal total

Para estimar la cantidad de C en la biomasa vegetal total se utilizó la siguiente manera:

$$CBV = BVT \times 0.5$$

Donde:

CBV = carbono en la biomasa vegetal total (Mg ha^{-1})

BVT = biomasa vegetal total (Mg ha^{-1})

0.5 = constante

5.3.8. Preparación de las muestras de suelo para la determinación del carbono

Las muestras de suelo se colocaron en bolsas de plástico debidamente identificadas y se trasladaron al laboratorio para su procesamiento y análisis. Se homogeneizaron las muestras en el interior de la bolsa destruyendo manualmente todos los terrones. La muestra de suelo correspondiente a cada punto de muestreo (volumen conocido) se colocaron en charolas de aluminio de aproximadamente 20 x 25 cm para determinar su peso seco. El suelo se secó al aire y a la sombra hasta alcanzar peso constante. La muestra secada al aire se pasó por un tamiz de 2 mm, para separar la grava, los restos vegetales y animales, los cuales se colocaron en frascos de vidrio (Etchevers *et al.*, 2005) (Figura 24).

El análisis de porcentaje de COS se midió por el método de Walkley and Black (1934).



Figura 24. Preparación de las muestras en laboratorio para determinar el carbono del suelo.

5.3.9. Densidad aparente del suelo

Para determinar la densidad aparente (ρ_b) del suelo se utilizó la siguiente fórmula:

$$\rho_b = \frac{\text{Peso seco del suelo} - (\text{Peso de raíces} + \text{Peso de piedras} + \text{Peso de residuos})}{\text{Volumen del cilindro de muestreo} - (V_r + V_p + V_{re})}$$

Donde:

ρ_b = densidad aparente (g cm^{-3})

Volumen del cilindro de muestreo = $\pi r^2 h$

π : π , constante (3.1416)

r: radio del cilindro en centímetros

h: altura o largo del cilindro en centímetros

Vr = volumen de las raíces en centímetros cúbicos

Vp = volumen de las piedras en centímetros cúbicos

Vre= volumen de los residuos en centímetros cúbicos

Se calculó el volumen de las raíces (Vr), el volumen de las piedras (Vp) y el volumen de los residuos (Vre) con la siguiente fórmula (Etchevers *et al.*, 2005):

Vr = peso seco de las raíces en gramos / 0.3 (g cm⁻³)

Vp = peso seco de las piedras en gramos / 2.4 (g cm⁻³)

Vre= peso seco de los residuos en gramos / 0.3 (g cm⁻³)

Donde:

0.3 (g cm⁻³)= densidad media de las raíces y los residuos

2.4 (g cm⁻³)= densidad real media de las piedras

5.3.10. Cálculo del carbono en el suelo

La cantidad de COS se determinó mediante la siguiente ecuación (Etchevers *et al.*, 2005):

$$\text{COS} = \text{CC} \times \rho_b \times P$$

Donde:

COS = carbono orgánico en el suelo (Mg ha^{-1})

CC = contenido de carbono (%)

ρ_b = densidad aparente (g cm^{-3})

P = profundidad de muestreo (cm)

5.4. Cálculo del carbono total

Para determinar el carbono total (CT) almacenado en las diferentes UM se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{CT} = \text{CBV} + \text{COS}$$

Donde:

CT = carbono total de la UM (Mg ha^{-1})

CBV = carbono en la biomasa vegetal total (Mg ha^{-1})

COS = carbono orgánico en el suelo (Mg ha^{-1})

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Carbono almacenado en los árboles

En el Cuadro 2 se presenta el contenido de C en los árboles con un Dap >5 cm de dos sistemas agroforestales y del BMM. La máxima cantidad de C almacenado en los árboles se encuentra en el BMM, con una cantidad 293.9 Mg ha⁻¹. Este resultado puede adjudicarse a la mayor densidad de árboles y a una mayor diversidad de especies, además de la edad del bosque. Este es un bosque prácticamente virgen, por lo que debe tener mucho más de 30 años (Pérez, 2004). El BMM contó con un mayor número de árboles (1125 por ha), esta cantidad fue aproximadamente diez veces mayor a la de los sistemas agroforestales evaluados (125 por ha). Las principales especies que se encontraron son: *Zyzygium* spp. (ocelo, guayabillo), con un promedio de 38%. Otras especies existentes fueron *Ilex quersetorum* (barrilillo, chocholian) con 16%, *Quercus xalapensis* (encino roble) y *Quercus acutifolia* (encino rojo) con 7%, *Liquidambar styraciflua* L. (ocozote), *Phoebe* spp. (hijarillo), *Meliosma alba* (quiabiz) y *Comocladia repanda* (hincha huevos) con 4 %, *Clethra* spp. (marangola) con el 2 %; y el 13% restante fueron los árboles no identificados o árboles muertos en pie. El error estándar del contenido C en árboles del BMM fue el mayor (83.1), esa diferencia se explica por los tamaños de *Quercus acutifolia* (encino rojo) o de *Quercus xalapensis* (encino roble), que presentaron valores de 72.9 cm y 60.8 cm, respectivamente.

El sistema agroforestal con PTR (20.9 Mg ha^{-1}) registró mayor contenido de C comparado con el sistema ESP (5.3 Mg ha^{-1}). Ambos sistemas contaron con la misma densidad de árboles (125 por ha), sin embargo, el PTR presentó tres especies arbóreas, *Persea schiedeana* (chinene), *Inga* spp. (Inga), y *Grevillea robusta* (grevillea), las cuales registraron una gran cantidad de C almacenado, y tuvo un promedio en Dap de 28.1 cm, a diferencia el sistema ESP que registró un valor de 17.8 cm en el promedio del Dap.

Las diferencias obtenidas en cuanto al valor de contenido de C a pesar de contar con la misma densidad de árboles, se explican probablemente por la existencia de especies arbóreas que contienen biomasa distinta y al uso que se le da a las especie.

Cuadro 2. Biomasa y contenido promedio de carbono en árboles.

Variable	Tipo de sistema		
	Café Especializado (ESP)	Café en Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
Dap* (cm)			
Promedio (plátano)	14.5	-	-
Promedio (Inga)	22.7	23.4	-
Promedio (otros)	-	35.3	18.2
Valor máximo	28.7	52.3	72.9
Valor mínimo	12.5	18.2	5.1
Biomasa**(Mg ha ⁻¹)			
Biomasa promedio	10.7 ± 7.5	41.8 ± 20.7	587.9 ± 166.3
Valor máximo	32.2	96.9	1014.2
Valor mínimo	0	0	201.7
Contenido de C (Mg ha ⁻¹)			
Carbono promedio	5.3 ± 3.8	20.9 ± 10.3	293.9 ± 83.1
Valor máximo	16.1	48.4	507.1
Valor mínimo	0	0	100.9
Prueba t***	b	b	a
N****	5	5	45

*Dap: Diámetro a la altura del pecho (1.30 m).

**Biomasa promedio por una planta (kg/planta);

Plátano: 9.3 (kg/planta). Inga: 200.2 (kg/planta).

El restante de las especies que se utilizaron en la ecuación alométrica: 535.9 (kg/planta).

***Letras iguales indican diferencias no significativas (p<0.05).

****Número total de árboles de cuatro UM de 100 m².

6.2. Carbono almacenado en los arbustos (Cafetos)

Con respecto a la cantidad de C en los arbustos en los dos sistemas con café, hubo una diferencia ligeramente superior al C del sistema ESP (2.8 Mg ha⁻¹), aunque desde el punto de vista estadístico no fue significativa entre los sistemas estudiados. En el PTR fue de 1.7 Mg ha⁻¹. La diferencia entre los dos sistemas fue la densidad por ha, 2281 cafetos en el sistema ESP y 1406

cafetos en el PTR. El valor promedio de biomasa de un cafeto fue igual a 2.4 kg planta⁻¹ en los dos sistemas.

Por otra parte, para medir la biomasa de los arbustos (DAP < 5 cm) del BMM se utilizó la ecuación alométrica para café. La cantidad de contenido de C en los arbustos del bosque fue menor (1.5 Mg ha⁻¹) que el de los sistemas agroforestales. Actualmente el diámetro del tronco que se encontró por arriba de 15 cm de la superficie del suelo fue de 2 cm, este es menor comparado con los de los de cafetos, que fue de 6.25 cm a ese nivel. La densidad de arbustos del bosque fue en mayor cantidad (6719). La condición de los arbustos en el BMM fue la gran densidad, sin embargo, el diámetro del tallo resultó menor (Cuadro 3).

Cuadro 3. Biomasa y contenido promedio de carbono en arbustos.

Variable	Tipo de sistema		
	Café Especializado (ESP)	Café en Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
D₁₅* (cm)			
Café	6.9	5.6	-
Otros	-	-	2.0
Valor máximo	9.1	8.3	4.6
Valor mínimo	1.8	3.8	0.6
Altura (m)			
Café	2.0	3.2	-
Otros	-	-	2.0
Valor máximo	3.9	3.7	5.1
Valor mínimo	0.5	2.7	0.5
Biomasa** (Mg ha⁻¹)			
Biomasa	5.5 ± 1.3	3.3 ± 1.1	3.0 ± 0.4
Valor máximo	8.6	5.8	4.0
Valor mínimo	3.3	0.5	2.2
Contenido de C (Mg ha⁻¹)			
Carbono	2.8 ± 0.6	1.7 ± 0.6	1.5 ± 0.2
Valor máximo	4.3	2.9	2.0
Valor mínimo	1.6	0	1.1
Prueba t***			
	a	a	a
N****			
	29	18	86

*Diámetro del tronco a 15 cm arriba del suelo.

**Biomasa promedio por cafeto: ESP 2.4 (kg/planta), PTR 2.4 (kg/planta).

Biomasa promedio de arbusto de BMM 0.45 (kg/planta).

***Letras iguales indican diferencias no significativas (p<0.05).

****Número total de cafetos o arbustos de cuatro UM de 16 m².

Dávalos *et al.* (2008) presentaron la información sobre la cantidad de C almacenado por la vegetación leñosa de árboles de sombra en los cafetos del centro del estado de Veracruz, México. Este autor encontró que el contenido de C varía de 4.5 Mg ha⁻¹ para sistema especializado a 16 Mg ha⁻¹ para policultivo, que son valores inferiores a los resultados de este estudio, los cuales fueron 8 Mg ha⁻¹ y 22.6 Mg ha⁻¹ (arbórea y café), respectivamente.

6.3. Carbono almacenado en troncos caídos

En el caso de la biomasa de troncos caídos (Cuadro 4), el número de troncos caídos por ha fue igual (150) en el PTR y en el BMM. Sin embargo, el tamaño del tronco en cuanto a diámetro promedio y largo del tallo en BMM se registró aproximadamente dos veces más grueso y tres veces más largo que en el PTR. En el BMM existió mayor nivel de componentes de vegetación que presentan mayor cantidad de biomasa en cuanto a troncos caídos que otros sistemas.

El sistema agroforestal estaba en buenas condiciones ya que los productores así lo mantuvieron, y en lo que se refiere a troncos caídos fueron retirados en cuanto son detectados. La diferencia en el número de troncos entre los sistemas agroforestales estaba dada en la pendiente que cada uno de estos presenta en su terreno. El sistema ESP registró menor cantidad de biomasa por tronco, lo cual se relacionó con la pendiente del terreno (51%), ya que los troncos rodaron hacia la parte inferior, donde se encuentra el bosque. Por el contrario, en el terreno del PTR se destinó mayor tiempo al mantenimiento de la tierra donde existió un canal dentro del sistema y la falta de pendiente (9%) obligó al productor a mantener limpio el terreno.

Cuadro 4. Biomasa y contenido promedio de carbono en troncos caídos.

Variable	Tipo de sistema		
	Café Especializado (ESP)	Café en Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
Diámetro (cm)			
Promedio	7.0	8.7	16.0
Valor máximo	-	12.7	29.7
Valor mínimo	-	5.4	7.8
Largo (cm)			
Promedio	98.0	109.8	356.2
Valor máximo	-	175.0	603.0
Valor mínimo	-	51.0	124.0
Biomasa (Mg ha ⁻¹)			
Biomasa	0.04 ± 0.04	0.39 ± 0.26	7.90 ± 4.38
Valor máximo	0.16	1.13	18.41
Valor mínimo	0	0	0.58
Contenido de C (Mg ha ⁻¹)			
Carbono	0.02 ± 0.02	0.19 ± 0.13	3.95 ± 2.19
Valor máximo	0.08	0.57	9.20
Valor mínimo	0	0	0.29
Prueba t*	a	a	a
N**	1	6	6

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$).

**Número de tronco caído total de cuatro unidades de muestreo de 100m².

6.4. Carbono almacenado en herbáceas y mantillo

El PTR presentó la mayor cantidad de C en el estrato herbáceo con 0.76 Mg ha⁻¹, que fue significativamente diferente de los otros dos sistemas. En el sistema ESP se presentó muy poca cantidad de biomasa herbácea (0.02 Mg ha⁻¹) (Cuadro 5), este valor es semejante a 0.027 Mg ha⁻¹ en un sistema especializado de Perú (Lapeyre *et al.*, 2004). El BMM tuvo un valor mayor (0.14 Mg ha⁻¹) que el sistema ESP, el cual es inferior a 0.8 Mg ha⁻¹ a lo encontrado en un bosque mesófilo de montaña de Perú (Lapeyre *et al.*,

2004). Sin embargo, estadísticamente no existió diferencia significativa entre PTR y BMM.

Cuadro 5. Biomasa y contenido promedio de carbono en herbáceas.

Variable	Tipo de sistema		
	Café Especializado (ESP)	Café en Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
Biomasa (Mg ha^{-1})			
Biomasa	0.05 ± 0.01	1.52 ± 0.20	0.27 ± 0.06
Valor máximo	0.08	1.93	0.39
Valor mínimo	0.02	1.09	0.12
Contenido de C (Mg ha^{-1})			
Carbono	0.02 ± 0.01	0.76 ± 0.10	0.14 ± 0.03
Valor máximo	0.04	0.96	0.20
Valor mínimo	0.01	0.55	0.06
Prueba t*	b	a	a

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$).

En el caso del contenido de C del estrato del mantillo no existió diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos (Cuadro 6). El contenido de C en el mantillo fue 5.55 Mg ha^{-1} (ESP), 4.53 Mg ha^{-1} (PTR) y 5.47 Mg ha^{-1} (BMM). En el ESP se tuvo una mayor cantidad de mantillo, y el valor máximo (15.4 Mg ha^{-1}) fue casi el doble de la cantidad de otros sistemas. Los valores del presente estudio fueron superiores a los reportados por de Lapeyre *et al.* (2004) en Perú, 3.98 Mg ha^{-1} (ESP) y 3.51 Mg ha^{-1} (BMM), y de Medina *et al.* (2003) en Nicaragua, 1.7 Mg ha^{-1} (ESP) y 0.97 Mg ha^{-1} (PTR). Se encontró el mantillo en los sistemas agroforestales debido a que el muestreo se realizó en la época de cosecha de café. Además hubo menor densidad de árboles

en el sistema ESP. Las condiciones anteriores disminuyen la velocidad de la descomposición de la hojarasca. En cambio, una parte del mantillo en el BMM estuvo en un avanzado grado de descomposición. El caso de la descomposición alta del mantillo podría explicarse por la densidad y diversidad de árboles.

Cuadro 6. Biomasa y contenido promedio de carbono en mantillo.

Variable	Tipo de sistema		
	Café Especializado (ESP)	Café en Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
Biomasa (Mg ha ⁻¹)			
Biomasa	11.10 ± 6.63	9.07 ± 1.55	10.94 ± 1.26
Valor máximo	30.85	13.07	14.02
Valor mínimo	2.99	5.59	8.84
Contenido de C (Mg ha ⁻¹)			
Carbono	5.55 ± 3.32	4.53 ± 0.77	5.47 ± 0.63
Valor máximo	15.43	6.54	7.01
Valor mínimo	1.50	2.80	4.42
Prueba t*	a	a	a

*Letras iguales indican diferencias no significativas (p<0.05).

La ausencia de la biomasa herbácea en el sistema ESP puede deberse a la estructura y cantidad de mantillo. El estrato superior de este sistema estaba cubierto por mantillo, lo cual interrumpe el paso de la luz solar. Ocurrió lo mismo en el BMM, dando como resultado la poca cantidad de plantas herbáceas encontrada, debido a la interferencia de la luz solar por la alta densidad de árboles observada encima de este estrato.

6.5. Carbono almacenado en las raíces

En este caso la cantidad de C en raíces se registró indirectamente con la ayuda de la ecuación para calcular la biomasa aérea (arbórea, arbustiva y herbácea). Por lo tanto, la cantidad de raíces varía proporcionalmente a la cantidad de biomasa arbórea. La mayor cantidad de C se encontró en el BMM (48.15 Mg ha⁻¹), ya que en este sistema se registró la máxima cantidad de árboles. En los otros dos sistemas agroforestales no existió diferencia estadísticamente significativa (Cuadro 7), sin embargo, en el sistema PTR se tuvo aproximadamente la doble cantidad de biomasa en la raíz en comparación con el sistema ESP. El aumento de la biomasa de la raíz en el PTR puede deberse a la existencia de gran cantidad de biomasa arbórea, de la especie *Persea schiedeana* (Chinene), y al cultivo de más especies de árboles dentro del sistema.

Los resultados obtenidos en la concentración de C en la raíz en el BMM, supera al resultado encontrado en un bosque mesófilo de montaña en México, aunque no se detalla en que parte del país, de 36 Mg ha⁻¹ obtenidos por Masera *et al.* (2001); Ordóñez (2004) e INE-SEMARNAT (2005), citados por Vega-López (2009). Así como también a los reportados por Etchevers *et al.* (2001) encontrados en Oaxaca, México con un valor de 7.78 Mg ha⁻¹.

Cuadro 7. Biomasa y contenido promedio de carbono en raíces.

Variable	Tipo de sistema		
	Café Especializado (ESP)	Café en Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
Biomasa (Mg ha ⁻¹)			
Biomasa	3.92 ± 1.59	9.94 ± 3.73	96.29 ± 21.14
Valor máximo	8.17	21.13	157.65
Valor mínimo	0.99	0.71	38.14
Contenido de C (Mg ha ⁻¹)			
Carbono	1.96 ± 0.86	4.97 ± 2.15	48.15 ± 12.21
Valor máximo	4.10	10.6	78.80
Valor mínimo	0.50	0.4	19.10
Prueba t*	b	b	a

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$).

6.6. Características y el contenido de carbono edáfico

6.6.1. Textura y pH del suelo

Se determinó el pH y la textura para los diferentes sistemas evaluados, y se clasificaron con ayuda del triángulo de texturas. El mayor porcentaje de arena se presentó en el sistema del BMM, por lo que el suelo fue clasificado texturalmente como franco arenoso. El pH de este sistema tuvo un valor de 5.5. Condiciones similares en cuanto a textura y pH se presentaron para los sistemas ESP y PTR con un pH de 5.7 y 5.5, respectivamente, y clasificados como ácidos, mientras que la clasificación textural fue la misma para ambos sistemas, la cual fue franco arcilloso (Cuadro 8).

Según Grijpma (2008) los buenos suelos forestales tienen un gran volumen de poros, divididos casi proporcionalmente en los microporos y macroporos. Los suelos arenosos tienen una buena aireación, pero retienen el agua en menor grado. Los suelos arcillosos retienen mucha agua pero su aireación es deficiente por su gran volumen de poros capilares y escaso volumen de macroporos.

Cuadro 8. Textura y pH promedio del suelo en los sistemas estudiados.

Tipo de sistema	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)	CLASIFICACION	pH
ESP	38.7	28.1	33.6	Franco arcilloso	5.7
PTR	43.1	24.6	32.3	Franco arcilloso	5.5
BMM	67.8	26.1	6.1	Franco arenoso	5.5

6.6.2. Densidad de aparente del suelo

Los suelos que contienen un alto nivel de MO tienen menor valor de ρ_b , lo cual es benéfico para las plantas por la buena relación que existe entre los microporos y macroporos (Fisher y Binkley, 2000).

Se calculó la ρ_b , para obtener los datos de COS almacenado. El rango de la ρ_b en los suelos estudiados, osciló entre 0.3 y 1.14 g cm⁻³ en los sistemas estudiados. Los valores más bajos se encontraron en el BMM, su ρ_b osciló entre 0.3 y 0.78 g cm⁻³, con valores medios entre 0.42 y 0.52 g cm⁻³. También el valor de contenido de humedad en el sistema de BMM fue más alto que en los sistemas agroforestales. El contenido de humedad promedio fue de 82.01 % y osciló entre 73.13 a 93.21 % (Cuadro 9). En relación con la profundidad

de suelo, en el primer intervalo se presentó el valor de la ρ_b inferior y de la humedad superior en el último intervalo (30-60 cm), esto es debido a que cuenta con una mayor cantidad del residuo acumulado y un alto nivel de la actividad biológica que en la superficie de la tierra y una textura arenosa.

Los valores de ρ_b en el caso de sistemas agroforestales fueron parecidos (Cuadro 9), la ρ_b promedio tomando en cuenta todas las profundidades fue de 0.93 g cm^{-3} y 0.96 g cm^{-3} ; de igual forma el contenido de humedad promedio fue de 41% y 43%, respectivamente.

En el sistema ESP la ρ_b osciló entre 0.72 y 1.14 g cm^{-3} , y en cuanto a los promedios por intervalo de profundidad, los valores se encuentran entre 0.89 y 0.96 g cm^{-3} . La ρ_b aumenta ligeramente entre los 10 y los 60 cm de profundidad.

En lo que se refiere al PTR, la ρ_b osciló entre 0.83 y 1.11 g cm^{-3} , y en cuanto a los promedios por intervalo de profundidad, los valores se encontraron entre 0.90 y 0.99 g cm^{-3} . El valor de ρ_b aumentó entre las capas de 0-30 cm. En cuanto a la humedad esta se concentró en un grado ligeramente mayor en los primeros diez centímetros, mientras que por debajo permaneció de manera constante en cada una de las capas muestreadas.

Cuadro 9. Características físicas del suelo a diferentes profundidades en los sistemas estudiados.

Café Especializado (ESP)						
Profundidad(cm)	ρ_b^* (g cm ⁻³)				CV** (%)	Humedad (%)
	Min	Max	Medio	DE		
0 -10	0.85	1.07	0.92	0.08	8.32	37.26
10-20	0.72	0.99	0.89	0.10	10.85	41.38
20-30	0.85	1.08	0.95	0.09	9.59	43.30
30-60	0.79	1.14	0.96	0.12	12.67	41.98
Café en Policultivo Tradicional (PTR)						
0 -10	0.83	0.98	0.90	0.05	5.86	46.48
10-20	0.89	1.05	0.96	0.06	6.71	42.13
20-30	0.89	1.11	0.99	0.06	6.25	41.53
30-60	0.83	1.10	0.97	0.10	10.07	41.08
Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)						
0 -10	0.30	0.58	0.42	0.09	21.27	78.51
10-20	0.42	0.78	0.52	0.11	22.10	73.13
20-30	0.45	0.62	0.48	0.06	12.08	83.20
30-60	0.38	0.51	0.44	0.04	9.67	93.21
N=8						

* ρ (g cm⁻³): Densidad aparente. Min: Mínimo. Max: Máximo. Medio: Promedio.

DE: Desviación Estándar.

**CV: Coeficiente de Variación.

6.6.3. Carbono orgánico del suelo

Los resultados presentados en las gráficas muestran el comportamiento del porcentaje de COS en cada uno de los sistemas (Figura 25). En el PTR y en el BMM las líneas de tendencia se mueven de manera inversa, demostrando que la densidad es inversamente proporcional al porcentaje de COS, mientras que en el sistema ESP aunque las líneas no tienen esa forma se muestra la misma tendencia de proporcionalidad. Sin embargo, el contenido de COS en las primeras capas de la superficie del suelo de los sistemas estudiados fue alto decreciendo a medida que la profundidad aumentaba, lo cual es semejante a lo encontrado por Fassbender (1993).

El sistema con mayor porcentaje de COS fue el del BMM; el valor promedio fue de 8.64% (0-10 cm), contenido de COS disminuyó a medida que se incrementa la profundidad, de tal forma que entre 30-60 cm se encontró un valor de 3.9%. En los dos sistemas restantes el porcentaje de COS fue similar: el valor de la primera capa (0-10 cm) fue 3.45% y 4.27% en ESP y PTR, respectivamente. En cada profundidad del suelo del BMM se tuvo casi el doble COS comparado con los sistemas agroforestales. En los sistemas estudiados con el COS en la primera capa (0-10 cm) fue casi el doble del encontrado en la capa de 30-60cm (Cuadro 10).

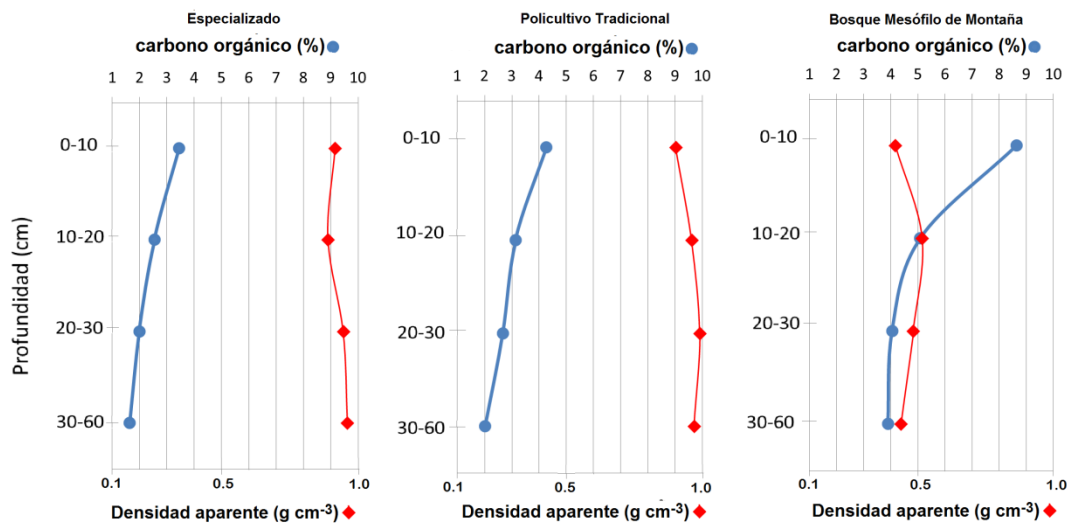


Figura 25. Carbono orgánico y densidad aparente en cada profundidad del suelo.

Cuadro 10. Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades en los sistemas estudiados.

Especializado (ESP)					
Profundidad (cm)	Carbono orgánico* (%)				CV** (%)
	Min	Max	Medio	DE	
0 -10	2.49	4.17	3.45	0.72	20.89
10-20	1.10	3.50	2.55	1.13	44.38
20-30	0.83	3.44	2.00	1.32	66.15
30-60	0.68	2.84	1.64	0.98	60.12
Policultivo tradicional (PTR)					
0 -10	3.73	4.88	4.27	0.49	11.47
10-20	2.87	3.44	3.15	0.23	7.40
20-30	2.38	2.87	2.69	0.21	8.00
30-60	1.34	2.41	2.02	0.50	24.90
Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)					
0 -10	6.93	9.97	8.64	1.30	15.01
10-20	4.14	5.82	5.08	0.72	14.13
20-30	2.53	5.24	4.05	1.16	28.53
30-60	1.26	5.95	3.90	2.00	51.36
N=8					

*Min: Mínimo. Max: Máximo. Medio: Promedio. DE: Desviación Estándar.

**CV: Coeficiente de Variación.

6.6.4. Contenido de carbono en el suelo

En el caso del COS almacenado, no existió diferencia estadísticamente significativa entre los sistemas estudiados (Cuadro 11). La proporción del contenido de C de cada profundidad en los sistemas agroforestales y el BMM fue muy similar en ambos. Se registró una disminución del contenido de C a medida que la profundidad de cada una de las capas aumentaba, esto ocurrió en cada uno de los sistemas (Figura 26). En la primera capa de suelo (0-10 cm) se registró la mayor concentración de C, de aproximadamente 25% del total en los sistemas (Figura 27). El PTR fue en el que se obtuvo la mayor cantidad de C (154.3 Mg ha^{-1}) con una varianza menor, en el sistema ESP

fue donde se encontró la menor cantidad (117.1 Mg ha^{-1}), aunque lo dicho anteriormente no genera diferencia estadísticamente hablando, ya que la comparación de medias así lo demuestra. En el BMM se tuvo la mayor cantidad del COS, y el menor valor de la ρ_b (Figura 25). Woomer *et al.* (1994) mencionaron que la mayor velocidad de reciclaje de la MO y disminuye el C almacenado en el suelo, debido al aumento las actividades microbianas en áreas tropicales.

Factores edáficos como el contenido de arcilla ayudan a explicar la mayor concentración de COS; otro factor a considerar es el contenido de MO, ya que para este caso el contenido de C es directamente proporcional a la cantidad de MO del suelo (MOS). De manera indirecta y en combinación con el contenido de arcilla en el suelo, el sistema ESP y PTR contribuyen a la captura de C debido a que la humedad que se conserva en el suelo también es un factor a tomar en cuenta en la estimación del contenido de C en el suelo.

Otro factor que ayuda a determinar la cantidad de C en el suelo es el historial del sistema en cuanto al cambio de uso de suelo. Tomando en cuenta que el sistema ESP era bosque en el año 2000, y se debe considerar el C acumulado durante esa época. Por otra parte, al PTR se le han estado agregando cantidades considerables de MO desde los últimos treinta años, que a diferencia de los tratamientos con fertilizantes químicos, el PTR induce a la acumulación de C en el suelo, cuando años era potrero, mientras que el BMM tiene las condiciones naturales que lo caracterizan: alta humedad, gran

cantidad de MO que se deposita constantemente sobre la superficie del suelo (Manahan, 2007), así como una mayor cantidad de especies arbóreas y con alta densidad de individuos por unidad de superficie.

Soto-Pinto *et al.* (2009) informaron que la cantidad de C almacenado en las tres profundidades del suelo que estudiaron (0-10, 10-20, y 20-30 cm) de un sistema agroforestal de café en Chiapas, México, fue de 50.5 Mg ha⁻¹, 53.4 Mg ha⁻¹ y 47.1 Mg ha⁻¹ en ESP, de 45.1 Mg ha⁻¹, 37.4 Mg ha⁻¹ y 30.3 Mg ha⁻¹, respectivamente en el policultivo tradicional. Los valores del sistema especializado reportados por este autor son superiores a los resultados de este estudio. Por otro lado, en PTR los valores son semejantes en cada profundidad de hasta 30 cm. En un estudio realizado en Nicaragua y reportados por Medina *et al.* (2003), el contenido de COS en el sistema especializado es parecido (76.93 Mg ha⁻¹) y el de PTR es superior (75.72 Mg ha⁻¹) a lo encontrado en el presente estudio a una profundidad de 0-30 cm. Ávila *et al.* (2001) encontraron 153.9 Mg ha⁻¹ y 184.4 Mg ha⁻¹ de C almacenado en el suelo en una profundidad de 0-25 cm en sistema agroforestal con café como monocultivo y como policultivo en Costa Rica.

Cuadro 11. Contenido promedio de carbono orgánico en el suelo a diferentes profundidades de estudio.

Profundidad (cm)	Café Especializado (ESP)	Café en Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
Contenido de C (Mg ha ⁻¹)			
0-10	31.6 ± 3.03	38.4 ± 1.72	36.0 ± 0.22
10-20	22.7 ± 5.01	30.3 ± 0.84	25.1 ± 0.26
20-30	18.2 ± 5.65	26.5 ± 0.50	19.7 ± 1.96
30-60	44.5 ± 11.58	59.2 ± 9.04	47.4 ± 10.93
0-60	117.1 ± 23.92 a*	154.3 ± 9.74 a	128.2 ± 12.84 a
N	8	8	8

*Letras iguales indican diferencias no significativas (p<0.05).

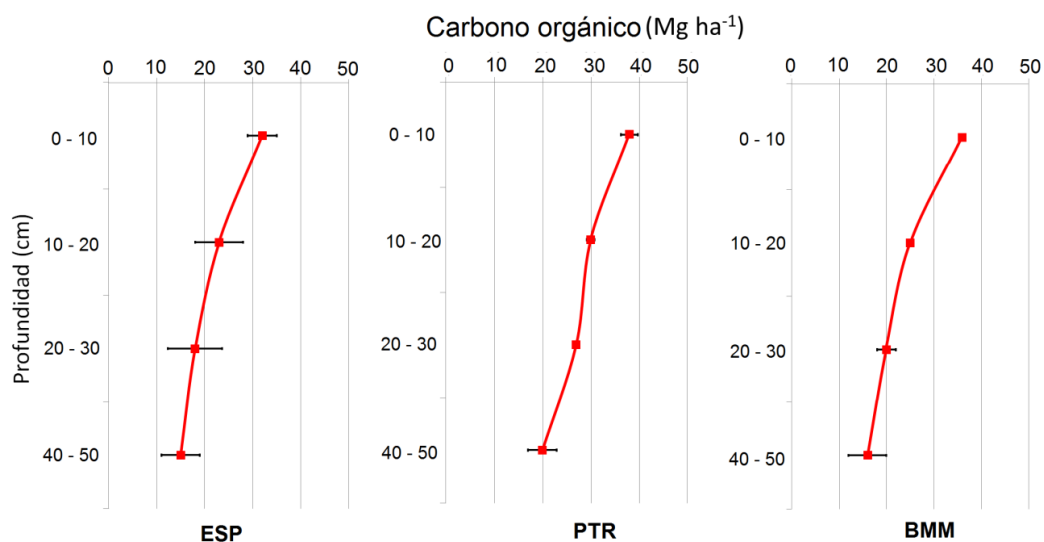


Figura 26. Contenido de carbono orgánico en cada profundidad de los sistemas estudiados.

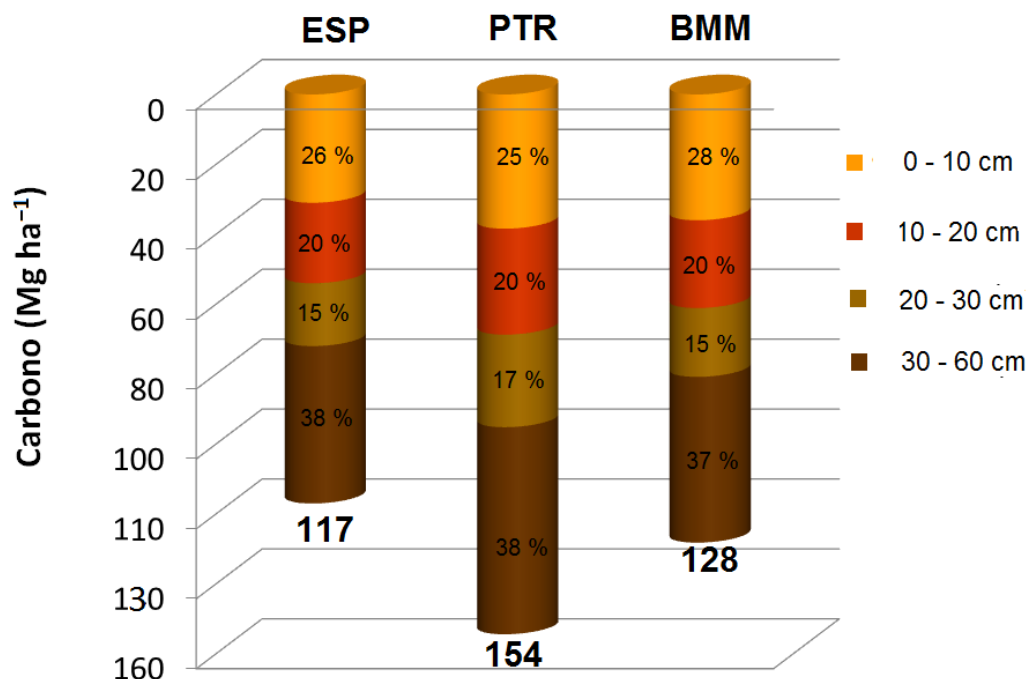


Figura 27. Comparación del contenido total de carbono (Mg ha⁻¹) y porcentaje (%) por profundidad del suelo estudiada en sistemas agroforestales.

6.6.5. Distribución del contenido de carbono por componentes del sistema

En el sistema ESP, el componente que constituyó la mayor proporción de C almacenado fue el suelo (0-60 cm de profundidad) que sumó el 88% (117.1 Mg ha⁻¹) del total, seguido por el C asociado al mantillo y a los árboles. Los contenidos de C tuvieron valores similares: 5.55 Mg ha⁻¹ (4%) y 5.28 Mg ha⁻¹ (4%), en mantillo y en árboles, respectivamente. La menor cantidad de C se registró en los troncos caídos y en el estrato herbáceo (0.02 Mg ha⁻¹, 0.02%).

En el PTR, el componente que reportó el mayor contenido de C también fue el suelo (0-60 cm de profundidad) con el 82% (154.3 Mg ha⁻¹) del total, seguido de los árboles (20.9 Mg ha⁻¹, 11%). El contenido de C asociado a la raíz y al mantillo fueron similares en ambos componentes, aproximadamente

el 3% de total: 5.17 Mg ha⁻¹ y 4.53 Mg ha⁻¹, respectivamente. Los menores valores del C asociados en este sistema fueron los registrados en los troncos caídos (0.19 Mg ha⁻¹, 0.1%).

A diferencia de los otros sistemas, la mayor cantidad del C almacenado en BMM se debió principalmente al componente arbóreo (293.9 Mg ha⁻¹, 61%), seguido del componente suelo y de las raíces (128.2 Mg ha⁻¹, 27% y 48.15 Mg ha⁻¹, 10%, respectivamente). La menor cantidad del C almacenado fue la del componente herbáceo (0.14 Mg ha⁻¹, 0.03%) (Figura 28 y Cuadro 12).

Los porcentajes de C almacenado en el suelo en los sistemas agroforestales fueron de 88% y 82% de C total en ESP y PTR, respectivamente. Un comportamiento similar de la distribución del C se observó en un sistema agroforestal de café en Nicaragua (Suárez, 2002), donde el suelo (0-50 cm) resultó ser la fuente con mayor potencial de C almacenado, que fue aportado en un 90% (por el ESP) y un 89% (por el PTR) al C total.

Los valores del C total en la biomasa aérea en el sistema ESP de 14 Mg ha⁻¹ y 305 Mg ha⁻¹ para el BMM fueron inferiores a los reportados por Lapeyre *et al.* (2004), con 19 Mg ha⁻¹ (el sistema Especializado) y 485 Mg ha⁻¹ (Bosque Mesófilo de Montaña) en Perú.

El C total almacenado en los sistemas agroforestales en un estudio llevado a cabo en Chiapas, México varía de 213.8 Mg ha⁻¹ en ESP a 167.4 Mg ha⁻¹ en PTR en una profundidad de 0-30 cm (Soto-Pinto *et al.*, 2009). En Costa Rica, Ávila *et al.* (2001) encontraron 164.3 Mg ha⁻¹ de C total en monocultivo y 195

Mg ha⁻¹ en policultivo (0-25 cm de profundidad) sin raíz, lo que se traduce en más del 89% de C almacenado en el suelo en sistemas agroforestales. En Oaxaca, México, Etchevers *et al.* (2001) reportaron 152 Mg ha⁻¹ de COS en el sistema especializado (0-105 cm de profundidad).

Los valores para el BMM encontrados en el presente estudio se asemejan a lo reportado por Masera *et al.* (2001), Ordóñez (2004) y INE-SEMARNAT (2005), citados por Vega-López (2009), en bosque de neblina; estos autores estimaron un contenido de C total de 430 Mg ha⁻¹ en México, aunque no se detalla en que parte del país. Por otra parte Etchevers *et al.* (2001) reportaron un valor de 255 Mg ha⁻¹ en un bosque mesófilo de Oaxaca (0-105 cm de profundidad), que es un valor inferior a los resultados de este estudio.

Cuadro 12. Distribución del contenido promedio de carbono en cada uno de los componentes de los sistemas estudiados.

Estrato	Café Especializado (ESP)		Café en Policultivo Tradicional (PTR)		Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	
	C (Mg ha ⁻¹)	(%)	C (Mg ha ⁻¹)	(%)	C (Mg ha ⁻¹)	(%)
Arbórea	5.28 ^{b*}	4	20.9 ^b	11	293.9 ^a	61
Arbustiva	2.76 ^a	2	1.67 ^a	0.9	1.52 ^a	0.3
Troncos caídos	0.02 ^a	0.02	0.2 ^a	0.1	3.95 ^a	0.8
Herbáceo	0.02 ^b	0.02	0.76 ^a	0.4	0.14 ^a	0.03
Mantillo	5.55 ^a	4	4.53 ^a	2	5.47 ^a	1.1
Raíz	2.02 ^b	2	5.17 ^b	3	48.15 ^a	10
Suelo**	117.1 ^a	88	154.3 ^a	82	128.2 ^a	27
Total	132.7 ^b	100	187.6 ^b	100	481.4 ^a	100

*Letras iguales indican diferencias no significativas entre sistemas por estrato (p<0.05).

**Profundidad de 0 a 60 cm.

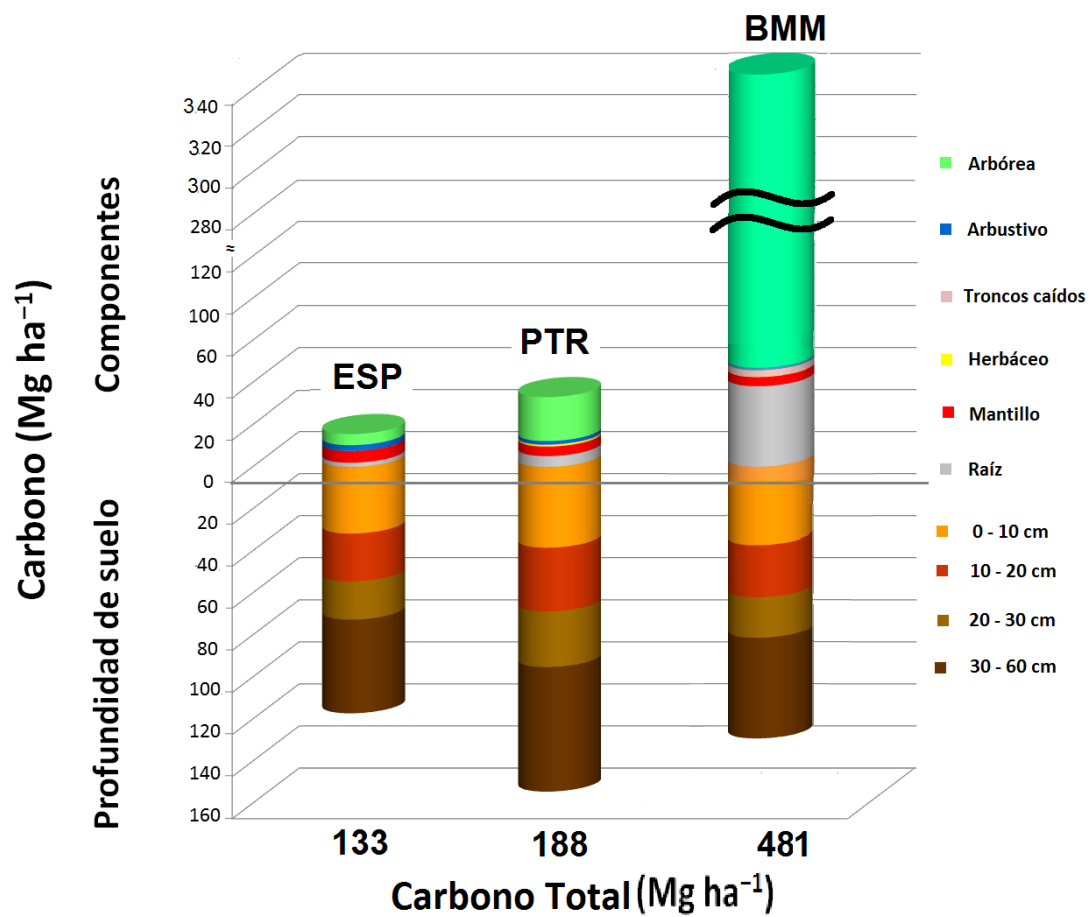


Figura 28. Distribución del contenido promedio de carbono orgánico por componente en los sistemas estudiados.

7. CONCLUSIONES

La mayor cantidad significativa ($p < 0.05$) de carbono total (CT) se encontró en el Bosque Mesófilo de Montaña (BMM) (61%) superando a los dos sistemas agroforestales Especializado (ESP) (4%) y Policultivo Tradicional (PTR) (11%) con los que se comparó; esto debido a que fue el sistema en el que se registró la mayor concentración de biomasa arbórea. En lo que respecta al contenido de carbono orgánico del suelo (COS), se encontró que no hubo diferencia estadísticamente significativa entre los sistemas agroforestales y el BMM. Sin embargo, la mayor cantidad de COS se registró en los sistemas agroforestales, con un 88% en el sistema ESP y 82% en el PTR, y 27% en el BMM.

- La mayor cantidad de CT para este estudio se registró en el BMM con 481 Mg ha^{-1} , seguido del PTR con 188 Mg ha^{-1} . El menor contenido de CT fue registrado en el sistema ESP con un valor de 133 Mg ha^{-1} .
- En cuanto a la biomasa aérea, el sistema de BMM sobresale de los dos sistemas agroforestales con un contenido de C de 305 Mg ha^{-1} . Los sistemas PTR y ESP de 28 Mg ha^{-1} y 14 Mg ha^{-1} , respectivamente.
- El contenido de COS se determinó en diferentes profundidades del suelo, entre los sistemas agroforestales y el BMM no existió diferencia estadísticamente significativa, pero cabe resaltar que la mayor

cantidad de C se registró en la capa superficial de 0 a 10 cm, sobresaliendo ligeramente el PTR con un contenido de C de 38.4 Mg ha⁻¹, mientras que los contenidos para los sistemas ESP y BMM fueron de 31.6 Mg ha⁻¹ y 36.0 Mg ha⁻¹, respectivamente, para la misma profundidad. Estos valores disminuyeron gradualmente en todos los casos a medida que aumentó la profundidad de muestreo.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar más estudios comparativos en la región con diferentes sistemas agroforestales de café, así como también sistemas que involucren especies endémicas y otras asociaciones para precisar la cantidad del C almacenado.

Resaltar la importancia de los cultivos de café bajo sombra con asociaciones de árboles de usos múltiples que representen un contenido significativo de C en la biomasa aérea

Impulsar con una metodología clara e implementar el pago de servicio ambientales directamente al productor ya sea por el gobierno, o en colaboración con las empresas y ONG's, no sólo nacionales sino también internacionales.

9. BIBLIOGRAFIA

- Altamirano B., J.L. 1998. Evaluación integral del sistema policultivo café-plátano-macadamia, en el municipio de Chocaman, Veracruz. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp: 8-43.
- Anta F., S. 2006. El café de sombra: un ejemplo de pago de servicios ambientales para proteger la biodiversidad. México. Gaceta ecológica 80: 19-31.
- Arriaga, L. y L. Gómez. 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. *In*: Cambio climático: una visión desde México. Martínez J. y A. Fernández (comps.). Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México. pp: 255- 266.
- 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.
- Banco Mundial. 2010. Desarrollo y Cambio Climático; panorama general. Informe sobre desarrollo mundial. Washington, DC, USA. 60 p.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soil of the world. *European journal of soil science* 47: 157-163.
- Benites, J., R. Dudal and P. Koohafkan. 1999. Land, the platform for local food security and global environmental protection. *In*: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin American and the Caribbean. Proceedings of the IFAD/FAO expert consultation. Roma, Italy. pp: 37-42.

- Beristain R., B. 2000. Diagnóstico integral de las áreas productivas y colecciones agrobotánicas del CRUO/UACH, Huatusco, Veracruz. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico Agropecuario. Veracruz, México. pp: 1-16.
- Biological and Environmental Research Information System. Oak ridge national laboratory, U.S.A. 2008. Carbon cycling. <https://public.ornl.gov/site/gallery/detail.cfm?id=445&topic=43&citation=&general=&restsection=BERPublic>. [Consultado: 15/10/11].
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Forestry Paper 134. Roma, Italy. 55 p.
- Cairns M., A., S. Brown, E.H. Helmer and G.A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1- 11.
- Canet C., R. 2010. Mitigación y adaptación al cambio climático en la agricultura y la ganadería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. España. 16 p.
- CCA (Comisión para la Cooperación Ambiental). 2001. México y el incipiente mercado de emisiones de Carbono. Montreal, Canadá. 115 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2011. Agricultura y Cambio Climático. Parte del problema y parte de la solución. http://www.ciat.cgiar.org/es/Paginas/cambio_climatico.aspx. [Consultado: 05/10/11].
- CICC (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático). 2007. Estrategia Nacional de Cambio Climático México. 157 p.
- Ciesla, W.M. 1996. Cambio climático. Bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. FAO, Roma, Italia. 175 p.
- Cisneros S., V.M., D. Martínez P, S. Díaz C, J. A. Torres R, C. Guadarrama Z y A. Cruz L. 1993. Clima. *In*: Caracterización de la agricultura de la zona centro de Veracruz. Centro Regional Universitario Oriente

- (CRUO). Universidad Autónoma Chapingo. Veracruz, México. pp: 15-20.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2004. Acuerdo que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa para desarrollar el mercado de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de sistemas agroforestales. (PSA-CABSA). Diario Oficial de la Federación del 24 de noviembre del 2004. Jalisco, México. 25p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2010. Cuarta sección secretaria de medio ambiente y recursos naturales. REGLAS de Operación del Programa ProArbol 2011. CONAFOR. Jalisco, México. 91p.
- Conde, C., M. Ferrer y R. Araujo. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura de México. *In*: Cambio climático: una visión desde México. Martínez J. y A. Fernández (comps.). Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México. pp: 227- 238.
- Dávalos S., R., M.I. Rodríguez M y E. Martínez P. 2008. Almacenamiento de carbono. *In*: Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad, manejo y conservación. Instituto Nacional de Ecología. México. Manson, R.H., V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehltreter (eds.). pp: 223-233.
- De Cerna, Z. 1974. La evolución geológica del panorama fisiográfico de México. *In*: El escenario geográfico de México. Bonfil, G (ed.). Instituto Nacional de Antropología e Historia. Distrito Federal, México. pp: 19-55.
- De Jong, B., R. Tipper y J. Taylor. 1997. A framework for monitoring and evaluating carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2: 231-246.
- Dixon, R.K. 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases. *Agroforestry Systems* 31: 99-116.

- Energex; The carbon cycle. 2010.
http://www.energex.com.au/switched_on/being_green/being_green_carbon.html. [Consultado: 14/08/11].
- Escamilla P., E. 1993. El café cereza en México: tecnología de la producción. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 116 p.
- Escamilla P., E., A.L. Licona V, S. Díaz C, H.V. Santoyo C, R. Sosa y L. Rodríguez R. 1994. Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México. Un análisis tecnológico. Revista de Historia 30: 41-67.
- Escamilla P., E. y S. Díaz C. 2002. Sistema de cultivo de café en México. Universidad Autónoma Chapingo. Veracruz, México. 57 p.
- Escamilla P., E., O. Ruíz R, G. Díaz P, C. Landeros S, D.E. Platas R, A. Zamarripa C y V.A. González H. 2005. El agroecosistema café orgánico en México. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología 76: 5-16.
- Etchevers, J., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. *In*: Simposio Internacional y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. 19 p.
- Etchevers, J. D., C. M. Monreal, C. Hidalgo, M. Acosta, J. Padilla y R. M. López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2009. Perfil para el cambio climático. Roma, Italia. 28 p.
- Fassbender, H.M. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE). 2a. ed. Turrialba. Costa Rica. 491 p.

- Figuerola E., P. 2009. Sistemas Agroforestales. Chiapas, México. 29 p.
- Fisher, R.F. and D. Binkley. 2000. Ecology and management of forest soils. 3d. ed. John Wiley & Sons. New York.USA.pp: 61-77.
- Florescano, E. y J. Ortiz E. 2010. Atlas del patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz. I Patrimonio natural. Universidad Veracruzana. Veracruz, México. pp: 38-43.
- Fuentes F., R. 1979. Sistemas agrícolas de producción de café en México. Centro de ecodesarrollo de CONACIYT. México. 8 p.
- Grijpma, P. 2008. Manuales para educación agropecuaria: Producción forestal. Trillas. México. pp: 39-40.
- Hairiah, K., S.M. Sitompul, M. Van Noordwijk and C. Palm. 2001. Methods for sampling carbon stocks above and below ground. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF).Bogor, Indonesia. 32 p.
- Ibrahim, M., M. Chacón, C. Cuartas, J. Naranjo, G. Ponce, P. Vega, F. Casasola y J. Rojas. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas N° 45: 27-36.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2001. Cambio Climático 2001. Impactos, adaptación vulnerabilidad. Tercer Informe de Evaluación. 95 p. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/spanish/pdf/wg2sum.pdf. [Consultado: 07/08/10].
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (eds.).Institute for Global Environmental Strategies. Kanagawa, Japan. pp:113-116. http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gpqlulucf/gpqlulucf_files/Chp4/Chp4_4_Annexes.pdf. [Consultado: 15/02/11].

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007a. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA. 996 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007b. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Cambridge University Press. Ginebra, Suiza. 104 p.
- Jaramillo, V.J. 2004. El ciclo global del carbono. *In*: Cambio climático: una visión desde México. Martínez, J. y A. Fernández (comps.). Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México. pp: 77-86.
- Jose, S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefit: an overview. *Agroforest Systems* 76:1-10.
- Lal, R. 1999. Global carbon pools fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. *In*: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. Duda, R (ed.). FAO, Roma, Italy. pp: 45-52.
- Lal, R. 2006. Carbon sequestration in soils of Latin America. *In*: Carbon sequestration in soils of Latin America. Lal, R., C.C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers y E. Cerri (eds.). USDA New York. USA. pp: 42-43.
- 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(1,2):35-44.
- Licona V., A. 1982. Descripción y análisis de los suelos del terreno del Centro Regional Universitario Oriente. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, México. 60 p.

- Licona V., A. 1986. Análisis fisiográfico del área de influencia del Centro Regional Huatusco, Veracruz. Centro Regional Universitario Oriente (CRUO). Veracruz, México. 254 p.
- Llanderal O., T. 2007. Sistemas silvopastoriles. SAGARPA (Secretaría Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). Colegio de Posgrados. Montecillo, México. 8 p.
- Magaña, V., J. Matías M, R. Morales y C. Millán. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. *In: Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J. y A. Fernández (comps.). Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México. pp: 203-214.
- Manahan S., E. 2007. Introducción a la química ambiental. UNAM-Editorial Reverté. Distrito Federal, México y Barcelona, España. 725 p.
- Martínez P., D. 1993. Café. *In: Caracterización de la agricultura de la zona centro de Veracruz*. Cisneros S., V.M., D. Martínez P, S. Díaz C, J. A. Torres R, C. Guadarrama Z y A. Cruz L (eds.). Centro Regional Universitario Oriente (CRUO). Universidad Autónoma Chapingo. Veracruz, México. pp: 92- 103.
- Mayrand, K. y M. Paquin. 2004. Pago por servicios ambientales. Unisféra International Center. Montreal, Canadá. 65 p.
- Medina B., C., M. Pérez Z y J. Ruiz Q. 2003. Cuantificación del carbono almacenado en suelo de café (*Coffea arábica* L.) con sombra en la comarca palo de sombrero, Jinotega, Nicaragua. *La calera* 10: 33-39.
- Moguel, P. y V.M. Toledo. 1999. El café en México. Ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias* 43: 40-51.
- Moguel, P. y V.M. Toledo. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* 55: 2-7.
- Montagnini, F. 1992. Sistema agroforestales: principios y aplicaciones en los trópicos. 2a ed. Organización para estudios tropicales. San José, Costa Rica. 622 p.

- Montagnini, F. y P.K. Nair. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.
- Montiel R., B. y J.D. Robledo M. 1998. Caracterización, descripción y evaluación de especies frutales en el banco genético del CRUO. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana. Córdoba, Veracruz, México. pp: 32-35.
- Mutuo, P.K., G. Cadisch, A. Albrecht, C.A. Palm y L. Verchot. 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71: 43-54.
- Pearson, T., S. Brownand and N.H. Ravindranath. 2005. Integrating carbon benefit estimates into GEF projects. United Nations Development Programme (UNDP), Global Environment Facility (GEF). New York, USA. 64 p.
- Pérez P., J.R. 2004. Colecciones *ex situ* de la Universidad Autónoma Chapingo en Huatusco, Ver. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 126 p.
- Robert, M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 73 p.
- Rodríguez R., L. 1994. Sistemas de policultivo comercial de café, en la zona centro de Veracruz. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp: 16-17.
- Rodríguez V., A. 2007. Cambio climático, agua y agricultura. *Perspectivas COMUNIICA*. N°1: 13-23.
- Rosas A.J., E. Escamilla P y O. Ruiz R. 2008. Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latino Americana* 26: 375-384.

- Rügnitz T., M., M. Chacón L y R. Porro. 2008. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Consorcio Iniciativa Amazónica (IA) y Centro Mundial Agroforestal (ICRAF). Belém, Brasil. 63 p.
- SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2008. Buenas prácticas agrícolas para el cultivo del café. Manual del técnico cafetalero. Distrito Federal, México. 79 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. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 39 p.
- Segura, M., M. Kanninen and D. Suárez. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems* 68: 143–150.
- SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2009. Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. Distrito Federal, México. 93 p.
- Sheinbaum, C. y O. Masera. 2000. Mitigating carbon emissions while advancing national development priorities: the case of México. *Climatic Change* 47: 259-282.
- Soto-Pinto, L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jimenez F and B. De Jong. 2009. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest Systems* 78: 39-51.
- Suárez P., D.A. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Tesis de maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 131 p.
- Tamayo, J.L. 1999. Geografía Moderna de México. 11a.ed. Trillas. Distrito Federal. México. 512 p.

- Todd M., J., A. Claudio, R. Zayra y L. Feng. 2009. México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono. Banco Mundial. Washington, DC, USA. 186 p.
- Toledo M., V.M. 1996. Diagnóstico de los escenarios de la biodiversidad de México: Segunda fase. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología. Morelia, Michoacán, México. 112 p.
- Vaast, P., J. Beer, C. Harvey and J.M. Harmand. 2005. Environmental services of coffee agroforestry systems in Central America: a promising potential to improve the livelihoods of coffee farmers' communities. *In*: Inter-American Scientific Conference Series. Wallace H., A (ed.). pp: 35-39.
- Van Noordwijk, M., S. Rahayu, K. Hairiah, Y.C. Wulan, A. Farida and B. Verbist. 2002. Carbon stock assessment for a forest to coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China* 45: 75-86.
- Vega-López, E. 2009. Importancia económica de las áreas naturales protegidas como sumideros de carbono en México. *Economía informa* 360: 114-120.
- Villanueva, C., M. Ibrahim, F. Casasola y R. Arguedas. 2005. Las cercas vivas en las fincas ganaderas. Chaput, P (ed.). INPASA. 20 p.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science* 37:29-37.
- Woomer P., L., A. Martin, A. Albrecht, D.V.S. Resck and H.W. Scharpenseel. 1994. The importance and management of soil organic matter in the tropics. *In*: The biological management of tropical soil fertility. Woomer, P.L. and M.J. Swift (eds.). Wiley, London, UK. pp: 47- 80.
- Young, A. 1989. Agroforestry for soil conservation. *Science and Practice of Agroforestry*. CAB International, Wallingford, UK. 276 p.

10. ANEXOS

ANEXO 1. Lista de especies identificadas en el relicto de bosque mesófilo en el CRUO.

	Nombre científico	Familia
1	<i>Pseudodeeranthemum cupidatum</i> (Ness) Rald	Acanthaceae
2	<i>Ilex quersetorum</i> l.M.Johnst	Aquifoliaceae
3	<i>Brunellia mexicana</i> Stadl.	Brunelliaceae
4	<i>Cornus florida</i> ssp. <i>urbiniana</i> Wang	Cornaceae
5	<i>Saurauia belizensis</i> Lundell	Dilleniaceae
6	<i>Quercus acutifolia</i> Nee	Fagaceae
7	<i>Quercus xalapensis</i> Humb.Bonpl	Fagaceae
8	<i>Quercus insignis</i> Mart/Gal	Fagaceae
9	<i>Vismia mexicana</i> Schlecht.	Guttiferae
10	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	Hamamelidaceae
11	<i>Nectandra salicifolia</i>	Lauraceae
12	<i>Phoebe mexicana</i> Meisn.	Lauraceae
13	<i>Eugenia mexicana</i> Steud.	Myrtaceae
14	<i>Zanthoxylum helleri</i> P.Wilson	Rutaceae
15	<i>Meliosoma alba</i> (Schl.) Walp.	Sabiaceae
16	<i>Turpinia insignis</i> (H.B.K) Tulasne	Staphylaceae
17	<i>Stylax glaucescens</i> Benth.	Styracaceae
18	<i>Clethra</i> L.	Clethraceae
19	<i>Quercus germana</i>	Fagaceae
20	<i>Quercus sapotifolia</i>	Fagaceae
21	<i>Quercus acutifolia</i>	Fagaceae

ANEXO 2. Formato de recolección de información de campo.

Biomasa – Árboles ($\Theta > 5$ cm)

Cuadrante: 4 x 25 m Fecha: _____
 Sistema: _____ Clave: _____
 Unidad Muestreo #: _____ Año de establecimiento: _____
 Localización (GPS): _____
 Altitud: _____ Pendiente: _____

Orden de árbol	Nombre de árbol	Condición ¹		DAP ² (cm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Observaciones;

Condición¹: Indique para cada árbol: árbol vivo (V), muerto en pie (MP).
 Dap²: Diámetro a la altura del pecho (1.30 m).

Biomasa – Arbustos (Cafetos y otros) ($\Theta < 5$ cm)

Cuadrante: 4 x 4 m

Sistema: _____ Clave: _____

Unidad Muestreo #: _____ Punto: _____

Árbol #	Nombre o clave	Dap (cm)	Altura (m)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Unidad Muestreo #: _____ Punto: _____

Árbol #	Nombre o clave	Dap (cm)	Altura (m)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Biomasa – troncos caídos ($\Theta > 5$ cm, largo > 50 cm)

Cuadrante: 4 x 25 m

Fecha:

Sistema: _____ Clave: _____

Unidad Muestreo #: _____

Orden de troncos	diámetro de tronco > 5 cm (cm)			largo > 50 cm (cm)
1				
2				
3				
4				
5				

Biomasa – Herbácea

Cuadrante: 1 x 1 m

Sistema: _____ Clave: _____

Unidad Muestreo #: _____ Punto: N

Unidad Muestreo N°	Peso fresco total (g/m ²)	Peso seco total (g/m ²)	Peso fresco total por metro cuadrado (g/ m ²)
1			
2			
3			
4			

Unidad Muestreo #: _____ Punto: S

Unidad Muestreo N°	Peso fresco total (g/m ²)	Peso seco total (g/m ²)	Peso fresco total por metro cuadrado (g/ m ²)
1			
2			
3			
4			

Biomasa – mantillo

Cuadrante: 0.5 x 0.5 m

Sistema: _____ Clave: _____

Unidad Muestreo #: _____ Punto: N

Unidad Muestreo N°	Peso fresco total (g/0.25m ²)	Peso seco total (g/0.25m ²)	Peso fresco total por metro cuadrado (g/ m ²)
1			
2			
3			
4			

Unidad Muestreo #: _____ Punto: S

Unidad Muestreo N°	Peso fresco total (g/0.25m ²)	Peso seco total (g/0.25m ²)	Peso fresco total por metro cuadrado (g/ m ²)
1			
2			
3			
4			

ANEXO 3. Biomasa y contenido promedio de carbono en árboles.

Biomasa de árboles estimada por ecuación alométrica en café bajo sistema especializado.

ESP	Orden de árbol	Nombre	Dap* ² (cm)	Inga (Kg/ planta)		Plátano (Kg/planta)	Biomasa (Kg/100m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa Promedio (Mg/ha)	Contenido de C promedio (Mg/ha)
				Log ₁₀ (Dap)	log ₁₀ (Inga)=-0.889+2.317(log ₁₀ (Dap))	Y=0.03(Dap) ^{2.13}				
UM* ¹ 1	-	-	-				0	0	10.56	5.28
UM2	1	plátano	12.9			6.96	6.96	0.70		
UM3	1	plátano	18.2			14.49	321.50	32.15		
	2	inga	28.65	1.46	307.01					
UM4	1	plátano	12.5			6.51	93.81	9.38		
	2	inga	16.65	1.22	87.30					

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Dap: Diámetro a la altura del pecho (1.30m).

Biomasa de árboles estimada por ecuación alométrica en café bajo sistema de policultivo tradicional.

PTR	Orden de árbol	Nombre	Dap* ² (cm)	Inga (Kg/planta)		Agroforestal (Kg/planta)	Biomasa (Kg/100m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa Promedio (Mg/ha)	Contenido de C promedio (Mg/ha)
				Log ₁₀ (Dap)	log ₁₀ (Inga)= -0.889+2.317(log ₁₀ (Dap))	log ₁₀ (AF)= -0.834+2.223(log ₁₀ (Dap))				
UM1* ¹	1	inga	19.8	1.30	130.43		466.75	46.68	41.78	20.89
	2	inga	29.8	1.47	336.32					
UM2	1	chinene (aguacate)	52.3	1.72		968.79	968.79	96.88		
UM3	1	grevillea	18.2	1.26		92.71	235.68	23.57		
	2	inga	20.6	1.31	142.97					
UM4	-	-	-				0	0		

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Dap: Diámetro a la altura del pecho (1.30m).

Biomasa de árboles estimada por ecuación alométrica en bosque mesófilo de montaña.

BMM	Orden de árbol	Nombre	Dap* ² (cm)	Bosque (Kg/planta)	Biomasa (Kg/100m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa Promedio(Mg/ha)	Contenido de C promedio (Mg/ha)
				$Y = \exp(-2.289 + 2.649 \ln(\text{Dap}) - 0.021(\ln(\text{Dap}))^2)$				
UM1* ¹	1	ocozote	23	333.77	2017.36	201.74	587.87	293.93
	2	guayabillo	8.5	26.68				
	3	chocholian	16	133.51				
	4	ijarillo	12	64.32				
	5	chocholian	23.1	337.44				
	6	guayabillo	6.8	15.06				
	7	guayabillo	6.2	11.87				
	8	guayabillo	6.8	15.06				
	9	quiavis	30	650.56				
	10	barrillo	19.1	208.93				
	11	quiavis	19.5	220.16				
UM2	1	guayabillo	5.1	7.18	5628.16	562.82	587.87	293.93
	2	ocelo	8.4	25.88				
	3	ocelo	12.2	67.08				
	4	ocelo	13.3	83.54				
	5	ijarillo	9.6	36.42				
	6	ocelo	6.2	11.87				
	7	encino roble	13.2	81.96				
	8	encino roble	9.2	32.66				
	9	incha huevos	9.9	39.39				
	10	incha huevos	18.4	190.13				
	11	MP* ³	21.9	295.02				

	12	MP	11.6	59.00				
	13	MP	51.7	2529.10				
	14	ocozote	48.6	2168.92				
UM3	1	ocelo	8.4	25.88	10142.17	1014.22		
	2	†* ⁴	15.7	127.26				
	3	†	6.4	12.88				
	4	ocelo	8.3	25.10				
	5	barrilillo	14.1	96.90				
	6	ocelo	5.9	10.45				
	7	barrilillo	7.8	21.41				
	8	barrilillo	13.8	91.75				
	9	barrilillo	8.6	27.49				
	10	encino rojo	72.9	5922.26				
	11	encino roble	60.8	3780.79				
UM4	1	ocelo	7.9	22.12	5727.11	572.71		
	2	†	7.3	18.06				
	3	guayabillo	6.3	12.37				
	4	guayabillo	8.1	23.58				
	5	guayabillo	6.9	15.63				
	6	ocelo	6.1	11.39				
	7	encino rojo	48.5	2157.84				
	8	marangola	48.1	2113.87				
	9	encino rojo	40.2	1352.24				

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Dap: Diámetro a la altura del pecho (1.30m).

*³MP: Árbol muerto en pie.

*⁴†: Nombre no identificado.

ANEXO 4. Biomasa y contenido de carbono en arbustos.

Biomasa de arbustos estimada por ecuación alométrica en café bajo sistema especializado.

ESP		Orden de árbol	D ₁₅ * ² (cm)	h* ³ (m)	Log ₁₀ (D ₁₅)	Log ₁₀ (h)	café:Log ₁₀ (Y)=- 1.113+1.578log ₁₀ (D ₁₅)+0.581log ₁₀ (h)	Biomasa (Kg/16m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	N	1	6.4	1.17	0.81	0.07	1.58	1.58	0.99	3.23	5.52	2.76
	S	1	7	1.89	0.85	0.28	2.41	8.75	5.47			
		2	3.8	1.72	0.58	0.24	0.87					
		3	7.2	1.71	0.86	0.23	2.37					
		4	7.7	1.95	0.89	0.29	2.85					
		5	1.8	1.6	0.26	0.20	0.26					
UM2	N	1	7.7	1.69	0.89	0.23	2.62	7.77	4.86	6.71		
		2	5.3	1.33	0.72	0.12	1.26					
		3	9.1	2.12	0.96	0.33	3.89					
	S	1	5.6	3.28	0.75	0.52	2.33	13.71	8.57			
		2	6.2	3.8	0.79	0.58	2.98					
		3	7.8	3.23	0.89	0.51	3.90					
		4	8	3.87	0.90	0.59	4.50					
UM3	N	1	7.1	0.77	0.85	-0.11	1.46	3.87	2.42	3.53		
		2	7.8	1.41	0.89	0.15	2.41					
	S	1	7.1	0.75	0.85	-0.12	1.44	7.44	4.65			

UM4		2	8.4	0.72	0.92	-0.14	1.83					
		3	7.1	2.61	0.85	0.42	2.97					
		4	5.6	1.06	0.75	0.03	1.21					
	N	1	7.3	0.47	0.86	-0.33	1.15	17.47	10.92	8.59		
		2	6.8	0.49	0.83	-0.31	1.05					
		3	7.9	3.43	0.90	0.54	4.12					
		4	8.3	3.47	0.92	0.54	4.48					
		5	7.2	1.27	0.86	0.10	2.00					
		6	8.2	3.88	0.91	0.59	4.69					
	S	1	7.3	2.88	0.86	0.46	3.28	10.00	6.25			
		2	4.8	3.09	0.68	0.49	1.76					
		3	9.1	1.53	0.96	0.18	3.22					
		4	5.8	1.79	0.76	0.25	1.73					

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²D₁₅: Diámetro 15 cm por encima de la superficie del suelo.

*³h: Altura de café.

Biomasa de arbustos estimada por ecuación alométrica en café bajo sistema de policultivo tradicional.

PTR		Orden de árbol	D ₁₅ * ² (cm)	h* ³ (m)	Log ₁₀ (D ₁₅)	Log ₁₀ (h)	café:Log ₁₀ (Y)=- 1.113+1.578log ₁₀ (D ₁₅)+0.581log ₁₀ (h))	Biomasa (Kg/16m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	N	1	5.2	3.22	0.72	0.51	2.05	3.47	2.17	3.23	3.34	1.67
		2	4.25	2.95	0.63	0.47	1.42					
	S	1	5.5	3.66	0.74	0.56	2.41	6.87	4.29			
		2	8.3	3.44	0.92	0.54	4.46					
UM2	N	1	8	3.6	0.90	0.56	4.32	11.22	7.01	5.84		
		2	5.9	3.55	0.77	0.55	2.65					
		3	8	3.51	0.90	0.55	4.25					
	S	1	7.5	3.17	0.88	0.50	3.62	7.46	4.66			
		2	6.2	2.7	0.79	0.43	2.44					
		3	4.2	2.97	0.62	0.47	1.40					
UM3	N	1	3.8	2.8	0.58	0.45	1.15	4.29	2.68	3.85		
		2	4.35	3.22	0.64	0.51	1.55					
		3	4.35	3.36	0.64	0.53	1.59					
	S	1	6	3.44	0.78	0.54	2.67	8.04	5.03			
		2	4.4	2.9	0.64	0.46	1.48					
		3	5.5	3.2	0.74	0.51	2.23					
		4	4.5	3.3	0.65	0.52	1.66					
UM4	N	-						-	-	0.45		
	S	1	4.2	3.14	0.62	0.50	1.44	1.44	0.90			

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²D₁₅: Diámetro 15 cm por encima de la superficie del suelo.

*³h: Altura de café.

Biomasa de arbustos estimada por ecuación alométrica en bosque mesófilo de montaña.

BMM		Orden de árbol	D ₁₅ * ² (cm)	h* ³ (m)	Log ₁₀ (D ₁₅)	Log ₁₀ (h)	café:Log ₁₀ (Y)=- 1.113+1.578log ₁₀ (D ₁₅)+0.581log ₁₀ (h)	Biomasa(Kg/16m ²)	Biomasa(Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio(Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	N	1	1.7	0.65	0.23	-0.19	0.14	3.01	1.88	2.22	3.03	1.52
		2	2.8	1.96	0.45	0.29	0.58					
		3	2.6	2.5	0.41	0.40	0.59					
		4	2.8	2.74	0.45	0.44	0.70					
		5	3.2	2.16	0.51	0.33	0.76					
		6	1.8	1.39	0.26	0.14	0.24					
	S	1	1.8	2.36	0.26	0.37	0.32	4.09	2.56			
		2	1.2	0.86	0.08	-0.07	0.09					
		3	2.9	0.88	0.46	-0.06	0.38					
		4	3.5	2.9	0.54	0.46	1.03					
		5	1.9	0.97	0.28	-0.01	0.21					
		6	1.1	2.1	0.04	0.32	0.14					
		7	2.6	1.16	0.41	0.06	0.38					
		8	0.9	0.76	-0.05	-0.12	0.06					
		9	0.8	0.92	-0.10	-0.04	0.05					
		10	4	3.5	0.60	0.54	1.42					
UM2	N	1	0.8	0.81	-0.10	-0.09	0.05	4.61	2.88	2.96		
		2	2.3	2.44	0.36	0.39	0.48					
		3	1.9	1.32	0.28	0.12	0.25					
		4	1.3	1.53	0.11	0.18	0.15					

		5	2.4	2.99	0.38	0.48	0.58					
		6	2.4	2.81	0.38	0.45	0.56					
		7	2.9	2.3	0.46	0.36	0.67					
		8	2.4	1.99	0.38	0.30	0.46					
		9	2.7	3.7	0.43	0.57	0.79					
		10	2.3	1.82	0.36	0.26	0.41					
		11	1.3	2.1	0.11	0.32	0.18					
		12	0.7	0.77	-0.15	-0.11	0.04					
	S	1	0.7	0.91	-0.15	-0.04	0.04	4.85	3.03			
		2	1.5	1.09	0.18	0.04	0.15					
		3	2	1.84	0.30	0.26	0.33					
		4	0.8	0.74	-0.10	-0.13	0.05					
		5	0.9	1.06	-0.05	0.03	0.07					
		6	0.8	1.84	-0.10	0.26	0.08					
		7	4.6	4.65	0.66	0.67	2.09					
		8	3.3	1.51	0.52	0.18	0.64					
		9	1.6	2.92	0.20	0.47	0.30					
		10	2	2.6	0.30	0.41	0.40					
		11	2.4	2.74	0.38	0.44	0.55					
		12	1.4	1.19	0.15	0.08	0.15					
UM3	N	1	1.2	1.1	0.08	0.04	0.11	6.97	4.35	3.01		
		2	4.1	2.25	0.61	0.35	1.14					
		3	4.2	3.3	0.62	0.52	1.49					
		4	0.9	0.79	-0.05	-0.10	0.06					
		5	0.8	0.96	-0.10	-0.02	0.05					

		6	0.9	1.22	-0.05	0.09	0.07					
		7	2.2	0.97	0.34	-0.01	0.26					
		8	1.1	1.52	0.04	0.18	0.11					
		9	1	1.1	0.00	0.04	0.08					
		10	1.1	1.15	0.04	0.06	0.10					
		11	0.9	0.72	-0.05	-0.14	0.05					
		12	2.5	3.3	0.40	0.52	0.65					
		13	0.9	1.44	-0.05	0.16	0.08					
		14	1.2	0.93	0.08	-0.03	0.10					
		15	1.1	1.46	0.04	0.16	0.11					
		16	2.3	1.38	0.36	0.14	0.35					
		17	1.4	1.73	0.15	0.24	0.18					
		18	3.8	3.75	0.58	0.57	1.37					
		19	2.55	1.9	0.41	0.28	0.49					
		20	1.2	1.1	0.08	0.04	0.11					
	S	1	0.7	0.48	-0.15	-0.32	0.03	2.65	1.66			
		2	0.6	0.77	-0.22	-0.11	0.03					
		3	1.1	0.8	0.04	-0.10	0.08					
		4	2.7	2.59	0.43	0.41	0.64					
		5	3.4	1.83	0.53	0.26	0.76					
		6	1	1.6	0.00	0.20	0.10					
		7	3.3	3.3	0.52	0.52	1.02					
UM4	N	1	2.2	3.2	0.34	0.51	0.53	3.70	2.32	3.95		
		2	1.2	1.17	0.08	0.07	0.11					
		3	2.3	1.5	0.36	0.18	0.36					

		4	2.1	4.8	0.32	0.68	0.62						
		5	2	1.65	0.30	0.22	0.31						
		6	1.9	3.52	0.28	0.55	0.44						
		7	2.3	3.2	0.36	0.51	0.56						
		8	2.1	3.2	0.32	0.51	0.49						
		9	1.8	1.9	0.26	0.28	0.28						
	S	1	1.3	1.32	0.11	0.12	0.14	8.94	5.59				
		2	1.2	1.9	0.08	0.28	0.15						
		3	1.1	0.61	0.04	-0.21	0.07						
		4	4.2	4	0.62	0.60	1.66						
		5	2.3	3.2	0.36	0.51	0.56						
		6	4.1	1.4	0.61	0.15	0.87						
		7	4.03	4	0.61	0.60	1.56						
		8	3.2	3.2	0.51	0.51	0.95						
		9	4.6	5.12	0.66	0.71	2.21						
		10	2.6	4	0.41	0.60	0.78						

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²D₁₅: Diámetro de tallo 15 cm por encima de la superficie del suelo.

*³h: Altura de café.

ANEXO 5. Biomasa y contenido promedio de carbono en troncos caídos.

Biomasa estimada de troncos caídos por ecuación alométrica en café bajo sistema especializado.

ESP	Diámetro de tronco > 5cm (cm)	largo> 50 cm (cm)	Diámetro promedio (cm)	radio (cm)	Biomasa (g) $=\pi r^2(\text{cm}^2)h(\text{cm})0.43(\text{g}/\text{cm}^3)$	Biomasa (Kg/100m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa promedio(Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.02
UM2	-	-	-	-	-	-	-		
UM3	-	-	-	-	-	-	-		
UM4	7	98	-	3.5	1621.95	1.62	0.16		

*¹UM:Unidad de muestreo.

Biomasa estimada de troncos caídos por ecuación alométrica en café bajo sistema de policultivo tradicional.

PTR	Orden de tronco	Diámetro de tronco > 5cm (cm)			largo> 50 cm (cm)	Diámetro promedio (cm)	radio (cm)	Biomasa (g) $=\pi r^2(\text{cm}^2)h(\text{cm})0.43(\text{g}/\text{cm}^3)$	Biomasa (Kg/100m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa promedio(Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1 *	1	12.7			51	12.7	6.4	2778.4	11.34	1.13	0.39	0.20
	2	13			78	13.0	6.5	4452.4				
	3	7.1	7.2	6.5	175	6.9	3.5	2841.4				
	4	6.8	6.7	6.8	82	6.8	3.4	1268.2				
UM2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
UM3	1	5.4			113	5.4	2.7	1113.0	1.11	0.11		

UM4	1	9	7.5	6.4	160	7.6	3.8	3148.9	3.15	0.31		
-----	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	--------	------	------	--	--

*¹UM: Unidad de muestreo.

Biomasa estimada de troncos caídos por ecuación alométrica en bosque mesófilo de montaña.

BMM	Orden de tronco	Diámetro de tronco > 5cm (cm)			largo> 50 cm (cm)	Diámetro promedio (cm)	radio (cm)	Biomasa (g) = $\pi r^2(cm^2)h(cm)0.43(g/cm^3)$	Biomasa (Kg/100m ²)	Biomasa (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1*	1	7.2	8	8.2	282	7.80	3.90	5794.99	5.79	0.58	7.90	3.95
UM2	1	9	9.2	8.3	168	8.83	4.42	4427.65	184.08	18.41		
	2	23.4	36		603	29.70	14.85	179657.29				
UM3	1	23.2	24.9		481	24.05	12.03	93970.14	118.31	11.83		
	2	12.3	12.1	12.4	479	12.27	6.13	24344.64				
UM4	1	13.6			124	13.60	6.80	7746.65	7.75	0.77		

*¹UM:Unidad de muestreo.

ANEXO 6. Biomasa y contenido promedio de carbono en estratos herbáceos.

Biomasa estimada de estrato herbáceo en café bajo sistema especializado.

ESP		Peso fresco (g/m ²)	Peso seco (g/m ²)	Peso fresco (g/m ²)	Biomasa en peso seco* ² (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	N	23.84	6.63	23.84	0.0663	0.05185	0.048525	0.0242625
	S	17.82	3.74	17.82	0.0374			
UM2	N	20.98	6.74	20.98	0.0674	0.0797		
	S	26.11	9.2	26.11	0.092			
UM3	N	10.17	4.21	10.17	0.0421	0.0382		
	S	11.26	3.43	11.26	0.0343			
UM4	N	1.44	0.73	1.44	0.0073	0.02435		
	S	10.87	4.14	10.87	0.0414			

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Biomasa en peso seco (Mg ha⁻¹)=

(peso seco de la muestra colectada/peso fresco de la muestra colectada) x peso fresco total por metro cuadrado x 0.01.

Biomasa estimada de estratos herbáceos en café bajo sistema de policultivo tradicional.

PTR		Peso fresco (g/m²)	Peso seco (g/m²)	Peso fresco (g/m²)	Biomasa en peso seco*² (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1*¹	N	617.13	161.94	617.13	1.6194	1.09295	1.517675	0.7588375
	S	249.2	56.65	249.2	0.5665			
UM2	N	975.14	161.87	975.14	1.6187	1.9298		
	S	1499.23	224.09	1499.23	2.2409			
UM3	N	712.52	130.84	712.52	1.3084	1.2564		
	S	544.75	120.44	544.75	1.2044			
UM4	N	1199.35	172.48	1199.35	1.7248	1.79155		
	S	839.04	185.83	839.04	1.8583			

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Biomasa en peso seco (Mg ha⁻¹)=

(peso seco de la muestra colectada/peso fresco de la muestra colectada) x peso fresco total por metro cuadrado x 0.01.

Biomasa estimada de estratos herbáceos en bosque mesófilo de montaña.

BMM		Peso fresco (g/m²)	Peso seco (g/m²)	Peso fresco (g/m²)	Biomasa en peso seco*² (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1*¹	N	103.98	45.13	103.98	0.4513	0.2555	0.274	0.137
	S	16.96	5.97	16.96	0.0597			
UM2	N	45.18	18.86	45.18	0.1886	0.11855		
	S	11.25	4.85	11.25	0.0485			
UM3	N	132.61	63.28	132.61	0.6328	0.33025		
	S	6.03	2.77	6.03	0.0277			
UM4	N	119.54	53.56	119.54	0.5356	0.3917		
	S	73.05	24.78	73.05	0.2478			

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Biomasa en peso seco (Mg ha⁻¹)=

(peso seco de la muestra colectada/peso fresco de la muestra colectada) x peso fresco total por metro cuadrado x 0.01.

ANEXO 7. Biomasa y contenido promedio de carbono en mantillo.

Biomasa estimada de mantillo en café bajo sistema especializado.

ESP		Peso fresco (g/0.25m ²)	Peso seco (g/0.25m ²)	Peso fresco (g/m ²)	Biomasa en peso seco* ² (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	N	87.09	60.11	348.36	2.40	2.99	11.1	5.55
	S	123.82	89.42	495.28	3.58			
UM2	N	189.44	111.72	757.76	4.47	3.91		
	S	114.07	83.53	456.28	3.34			
UM3	N	345.04	210.21	1380.16	8.41	6.65		
	S	156.14	122.18	624.56	4.89			
UM4	N	1189.01	598.19	4756.04	23.93	30.85		
	S	1698.18	944.47	6792.72	37.78			

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Biomasa en peso seco (Mg ha⁻¹)=

(peso seco de la muestra colectada/peso fresco de la muestra colectada)xpeso fresco total por metro cuadradox0.01.

Biomasa estimada de mantillo en café bajo sistema de policultivo tradicional.

PTR		Peso fresco (g/0.25m ²)	Peso seco (g/0.25m ²)	Peso fresco (g/m ²)	Biomasa en peso seco* ² (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	N	319.81	236.98	1279.24	9.48	8.28	9.07	4.54
	S	262.13	177.02	1048.52	7.08			
UM2	N	484.73	285.88	1938.92	11.44	9.32		
	S	321.13	180.32	1284.52	7.21			
UM3	N	259.74	143.51	1038.96	5.74	5.59		
	S	268.23	135.99	1072.92	5.44			
UM4	N	297.25	201.32	1189	8.05	13.07		
	S	619.94	452.26	2479.76	18.09			

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Biomasa en peso seco (Mg ha⁻¹)=

(peso seco de la muestra colectada/peso fresco de la muestra colectada)xpeso fresco total por metro cuadradox0.01.

Biomasa estimada de mantillo en bosque mesófilo de montaña.

BMM		Peso fresco (g/0.25m ²)	Peso seco (g/0.25m ²)	Peso fresco (g/m ²)	Biomasa en peso seco* ² (Mg/ha)	Biomasa promedio por UM (Mg/ha)	Biomasa promedio (Mg/ha)	Contenido de C (Mg/ha)
UM1* ¹	N	497.14	267.51	1988.56	10.70	8.84	10.94	5.47
	S	361.73	174.51	1446.92	6.98			
UM2	N	425.12	225.08	1700.48	9.00	8.94		
	S	388.97	221.85	1555.88	8.87			
UM3	N	525.24	309.03	2100.96	12.36	14.02		
	S	750.49	392.07	3001.96	15.68			
UM4	N	806.02	374.31	3224.08	14.97	11.95		
	S	434.36	222.99	1737.44	8.92			

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²Biomasa en peso seco (Mg ha⁻¹)=

(peso seco de la muestra colectada/peso fresco de la muestra colectada)x peso fresco total por metro cuadradox0.01.

ANEXO 8. Biomasa y contenido promedio de carbono en raíz.

Biomasa estimada de raíz por ecuación alométrica en café bajo sistema especializado.

ESP	Biomasa (Mg/ha)				Biomasa raíz (Mg/ha)		Contenido de C (Mg/ha)
	árbol	arbusto	herbácea	aéreo total	$Y=\exp(-1.0587+0.8836\ln(BAT^{*2}))$	Promedio	
UM1* ¹	0	3.23	0.05	3.28	0.99	3.92	1.96
UM2	0.70	6.71	0.08	7.49	2.06		
UM3	32.15	3.53	0.04	35.72	8.17		
UM4	9.38	8.59	0.02	17.99	4.46		

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²BAT: Biomasa aéreo total (Mg ha⁻¹).

Biomasa estimada de raíz por ecuación alométrica en café bajo sistema de policultivo tradicional.

PTR	Biomasa (Mg/ha)				Biomasa raíz (Mg/ha)		Contenido de C (Mg/ha)
	árbol	arbusto	herbácea	aéreo total	$Y=\exp(-1.0587+0.8836\ln(BAT^{*2}))$	Promedio	
UM1* ¹	46.68	3.23	1.09	51.00	11.19	9.94	4.97
UM2	96.88	5.84	1.93	104.65	21.13		
UM3	23.57	3.85	1.26	28.68	6.73		
UM4	0.00	0.45	1.79	2.24	0.71		

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²BAT: Biomasa aéreo total (Mg ha⁻¹).

Biomasa estimada de raíz por ecuación alométrica en bosque mesófilo de montaña.

BMM	Biomasa (Mg/ha)				Biomasa raíz (Mg/ha)		Contenido de C (Mg/ha)
	árbol	arbusto	herbácea	aéreo total	$Y=\exp(-1.0587+0.8836\ln(BAT^{*2}))$	Promedio	
UM1 ^{*1}	201.74	2.22	0.26	204.21	38.14	96.29	48.15
UM2	562.82	2.96	0.12	565.89	93.87		
UM3	1014.22	3.01	0.33	1017.55	157.65		
UM4	572.71	3.95	0.39	577.06	95.50		

*¹UM: Unidad de muestreo.

*²BAT: Biomasa aéreo total (Mg ha⁻¹).

ANEXO 9. Textura y pH del suelo en los sistemas agroforestal de café.

#	Tratamiento		Profundidad (cm)	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)	CLASIFICACION	pH
1	ESP1	N	0-10	32.04	34.72	33.24	Franco Arcilloso	5.12
2			10-20	42.04	30.72	27.24	Franco Arcilloso	
3			20-30	40.04	30.72	29.24	Franco Arcilloso	
4			30-60	34.04	40.72	35.24	Franco Arcilloso	
5		S	0-10	42.04	28.72	29.24	Franco Arcilloso	5.75
6			10-20	36.04	30.72	33.24	Franco Arcilloso	
7			20-30	36.04	28.72	35.24	Franco Arcilloso	
8			30-60	38.04	28.72	33.24	Franco Arcilloso	
9	ESP2	N	0-10	44.04	24.72	31.24	Franco Arcilloso	5.76
10			10-20	36.04	24.72	39.24	Franco Arcilloso	
11			20-30	34.04	26.72	39.24	Franco Arcilloso	
12			30-60	36.04	26.72	37.24	Franco Arcilloso	
13		S	0-10	28.04	28.72	43.24	Arcilla	5.78
14			10-20	36.04	26.72	37.24	Franco Arcilloso	
15			20-30	40.04	22.72	37.24	Franco Arcilloso	
16			30-60	34.04	26.72	39.24	Franco Arcilloso	
17	ESP3	N	0-10	38.04	20.72	41.24	Arcilla	5.5
18			10-20	46.04	28.72	25.24	Franco	
19			20-30	42.04	24.72	33.24	Franco Arcilloso	
20			30-60	42.04	22.72	35.24	Franco Arcilloso	
21		S	0-10	36.04	30.72	33.24	Franco Arcilloso	6.08
22			10-20	34.04	28.72	37.24	Franco Arcilloso	
23			20-30	25.32	29.44	45.24	Arcilla	
24			30-60	27.32	27.44	45.24	Arcilla	
25	ESP4	N	0-10	35.22	25.44	39.24	Franco Arcilloso	5.8

26			10-20	46.2	30	23.8	Franco	
27			20-30	36.2	34	29.8	Franco Arcilloso	
28			30-60	54.2	26	19.8	Franco Arcilloso	
29			0-10	46.2	30	23.8	Franco	
30		S	10-20	52.2	26	21.8	Franco Arcillo Arenoso	5.48
31			20-30	54.2	24	21.8	Franco Arcillo Arenoso	
32			30-60	34.2	28	37.8	Franco Arcilloso	
33	PTR1	N	0-10	48.2	24	27.8	Franco Arcillo Arenoso	5.69
34			10-20	50.2	24	25.8	Franco Arcillo Arenoso	
35			20-30	32.2	24	43.8	Arcilla	
36			30-60	34.2	22	43.8	Arcilla	
37		S	0-10	36.2	28	35.8	Franco Arcilloso	5.44
38			10-20	44.2	26	29.8	Franco Arcilloso	
39			20-30	40.2	26	33.8	Franco Arcilloso	
40			30-60	30.2	26	43.8	Arcilla	
41	PTR2	N	0-10	38.2	32	29.8	Franco Arcilloso	5.77
42			10-20	34.2	28	37.8	Franco Arcilloso	
43			20-30	40.2	24	35.8	Franco Arcilloso	
44			30-60	36.2	22	41.8	Arcilla	
45		S	0-10	50.2	24	25.8	Franco Arcillo Arenoso	5.7
46			10-20	36.2	26	37.8	Franco Arcilloso	
47			20-30	38.2	26	35.8	Franco Arcilloso	
48			30-60	40.2	22	37.8	Franco Arcilloso	
49	PTR3	N	0-10	40.2	28	31.8	Franco Arcilloso	5.57
50			10-20	48.2	24	27.8	Franco Arcilloso	
51			20-30	28.04	32.72	39.24	Franco Arcilloso	
52			30-60	52.04	16.72	31.24	Franco Arcillo Arenoso	
53		S	0-10	54.04	22.72	23.24	Franco Arcillo Arenoso	5.28
54			10-20	46.04	24.72	29.24	Franco Arcilloso	

55			20-30	56.04	22.72	21.24	Franco Arcillo Arenoso	
56			30-60	44.04	24.72	31.24	Franco Arcilloso	
57	PTR4	N	0-10	46.04	26.72	27.24	Franco Arcilloso	5.09
58			10-20	56.04	20.72	23.24	Franco Arcillo Arenoso	
59			20-30	46.04	24.72	29.24	Franco Arcilloso	
60			30-60	42.04	22.72	35.24	Franco Arcilloso	
61		S	0-10	52.04	24.72	23.24	Franco Arcillo Arenoso	5.63
62			10-20	56.04	20.72	23.24	Franco Arcillo Arenoso	
63			20-30	44.04	24.72	31.24	Franco Arcilloso	
64			30-60	40.04	20.72	39.24	Franco Arcilloso	
65	BMM1	N	0-10	76.04	16.72	7.24	Arena Francosa	5.65
66			10-20	78.04	14.72	7.24	Arena Francosa	
67			20-30	82.04	10.72	7.24	Arena Francosa	
68			30-60	86.04	6.72	7.24	Arena Francosa	
69		S	0-10	78.04	14.72	7.24	Arena Francosa	5.62
70			10-20	66.04	26.72	7.24	Franco Arenoso	
71			20-30	68.04	24.72	7.24	Franco Arenoso	
72			30-60	86.04	6.72	7.24	Franco Arenoso	
73	BMM2	N	0-10	70.04	22.72	7.24	Franco Arenoso	5.17
74			10-20	64.04	28.72	7.24	Franco Arenoso	
75			20-30	70.04	22.72	7.24	Franco Arenoso	
76			30-60	65.48	28	6.52	Franco Arenoso	
77		S	0-10	69.48	24	6.52	Franco Arenoso	5.36
78			10-20	65.48	30	4.52	Franco Arenoso	
79			20-30	63.48	32	4.52	Franco Arenoso	
80			30-60	67.48	28	4.52	Franco Arenoso	
81	BMM3	N	0-10	55.48	36	8.52	Franco Arenoso	5.67
82			10-20	63.48	32	4.52	Franco Arenoso	
83			20-30	67.48	28	4.52	Franco Arenoso	

84		S	30-60	67.48	28	4.52	Franco Arenoso	5.32
85			0-10	59.48	32	8.52	Franco Arenoso	
86			10-20	61.48	34	4.52	Franco Arenoso	
87			20-30	69.48	26	4.52	Franco Arenoso	
88			30-60	65.48	30	4.52	Franco Arenoso	
89	BMM4	N	0-10	63.48	30	6.52	Franco Arenoso	5.46
90			10-20	61.48	32	6.52	Franco Arenoso	
91			20-30	61.48	34	4.52	Franco Arenoso	
92			30-60	63.48	32	4.52	Franco Arenoso	
93		S	0-10	57.48	34	8.52	Franco Arenoso	5.43
94			10-20	65.48	30	4.52	Franco Arenoso	
95			20-30	63.48	32	4.52	Franco Arenoso	
96			30-60	67.48	28	4.52	Franco Arenoso	

ANEXO 10. Características físicas a diferentes profundidades del suelo en los sistemas agroforestales de café.

Densidad aparente (g cm^{-3})

#	Tratamiento		Profundidad (cm)	Peso (g)					Volumen (cm^3)					Densidad Aparente: ^{*6} (g cm^{-3})
				A: Suelo seco al aire	B: Raíces secas	C: Piedras secas	D: Residuos secos	E ^{*1} : Suelo sin B,C,D.	F: Suelo seco al aire	G: ^{*2} Raíces	H: ^{*3} Piedras	I: ^{*4} Residuos	J: ^{*5} Suelo sin G,H,I.	
1	ESP1	N	0 -10	216.40	0.05	3.78	0.02	212.55	237.58	0.15	1.57	0.07	235.78	0.90
2			10 -20	222.55	0.02	-	0.02	222.51	237.58	0.08	-	0.06	237.45	0.94
3			20-30	202.59	0.01	1.43	0.01	201.14	237.58	0.05	0.60	0.02	236.92	0.85
4			30-60	187.55	0.003	-	-	187.55	237.58	0.01	-	-	237.57	0.79
5		S	0-10	229.24	0.09	-	0.05	229.09	237.58	0.32	-	0.18	237.09	0.97
6			10 -20	217.17	0.07	0.03	0.01	217.06	237.58	0.23	0.01	0.04	237.31	0.91
7			20-30	212.64	0.08	-	0.02	212.54	237.58	0.28	-	0.05	237.25	0.90
8			30-60	215.40	0.02	-	0.02	215.36	237.58	0.05	-	0.07	237.46	0.91
9	ESP2	N	0-10	253.47	0.11	0.32	0.23	252.80	237.58	0.36	0.14	0.78	236.31	1.07
10			10 -20	241.88	0.03	11.52	0.005	230.33	237.58	0.09	4.80	0.02	232.68	0.99
11			20-30	258.07	0.004	2.53	0.005	255.54	237.58	0.01	1.05	0.02	236.50	1.08

12			30-60	271.89	-	2.74	0.18	268.97	237.58	-	1.14	0.59	235.85	1.14
13		S	0-10	202.68	0.97	2.31	0.23	199.17	237.58	3.22	0.96	0.77	232.62	0.86
14			10 -20	230.36	0.25	1.58	0.04	228.49	237.58	0.82	0.66	0.13	235.97	0.97
15			20-30	240.86	0.05	2.07	-	238.74	237.58	0.17	0.86	-	236.55	1.01
16			30-60	258.45	-	1.14	0.02	257.29	237.58	-	0.47	0.07	237.04	1.09
17	ESP3	N	0-10	229.02	0.08	0.86	0.06	228.02	237.58	0.26	0.36	0.21	236.76	0.96
18			10 -20	190.91	-	30.05	1.33	159.53	237.58	-	12.52	4.44	220.63	0.72
19			20-30	223.57	0.01	28.54	0.04	194.98	237.58	0.02	11.89	0.13	225.54	0.86
20			30-60	221.02	-	12.07	0.01	208.95	237.58	-	5.03	0.02	232.53	0.90
21		S	0-10	217.22	0.76	20.03	0.004	196.43	237.58	2.53	8.35	0.01	226.70	0.87
22			10 -20	232.64	0.28	6.49	0.05	225.82	237.58	0.93	2.70	0.17	233.78	0.97
23			20-30	266.18	0.02	29.04	0.04	237.09	237.58	0.05	12.10	0.12	225.31	1.05
24			30-60	263.11	0.05	12.52	-	250.54	237.58	0.17	5.22	-	232.20	1.08
25	ESP4	N	0-10	213.57	0.35	7.65	0.44	205.14	237.58	1.15	3.19	1.47	231.77	0.89
26			10 -20	186.49	0.38	2.66	1.17	182.28	237.58	1.28	1.11	3.90	231.29	0.79
27			20-30	207.39	0.14	2.10	0.26	204.90	237.58	0.45	0.88	0.85	235.40	0.87
28			30-60	216.01	0.05	5.15	-	210.81	237.58	0.18	2.14	-	235.26	0.90
29		S	0-10	201.98	0.45	2.71	0.01	198.80	237.58	1.51	1.13	0.04	234.90	0.85
30			10 -20	214.18	0.29	17.59	0.002	196.30	237.58	0.98	7.33	0.01	229.27	0.86
31			20-30	233.96	0.17	6.23	0.003	227.55	237.58	0.57	2.60	0.01	234.40	0.97
32			30-60	220.87	0.04	7.62	0.01	213.20	237.58	0.13	3.18	0.03	234.25	0.91
33	PTR1	N	0-10	237.27	0.04	7.34	0.13	229.75	237.58	0.14	3.06	0.43	233.95	0.98
34			10 -20	212.78	0.01	0.49	-	212.28	237.58	0.04	0.21	-	237.34	0.89

35			20-30	232.62	0.01	9.08	1.83	221.71	237.58	0.03	3.78	6.09	227.69	0.97
36			30-60	218.81	0.01	1.35	0.31	217.14	237.58	0.04	0.56	1.03	235.95	0.92
37		S	0-10	210.80	0.08	3.66	0.27	206.79	237.58	0.27	1.52	0.89	234.90	0.88
38			10 -20	233.35	0.04	2.02	0.03	231.27	237.58	0.14	0.84	0.09	236.52	0.98
39			20-30	233.78	0.03	6.72	1.06	225.97	237.58	0.10	2.80	3.54	231.15	0.98
40			30-60	216.01	0.01	-	0.08	215.92	237.58	0.02	-	0.27	237.29	0.91
41	PTR2	N	0-10	197.80	0.16	0.71	0.72	196.21	237.58	0.52	0.30	2.40	234.37	0.84
42			10 -20	245.71	0.12	1.36	0.45	243.78	237.58	0.41	0.57	1.49	235.12	1.04
43			20-30	240.42	0.12	0.34	0.16	239.80	237.58	0.39	0.14	0.54	236.51	1.01
44			30-60	257.03	0.01	1.10	0.06	255.86	237.58	0.02	0.46	0.21	236.89	1.08
45		S	0-10	216.56	0.60	-	0.75	215.21	237.58	2.01	-	2.50	233.07	0.92
46			10 -20	250.41	0.10	0.30	0.04	249.97	237.58	0.33	0.12	0.13	237.00	1.05
47			20-30	264.00	0.01	0.59	-	263.40	237.58	0.02	0.25	-	237.31	1.11
48			30-60	245.78	0.005	0.33	0.03	245.41	237.58	0.02	0.14	0.11	237.32	1.03
49	PTR3	N	0-10	226.04	0.08	1.21	0.003	224.75	237.58	0.27	0.50	0.01	236.81	0.95
50			10 -20	227.08	0.12	2.78	0.002	224.18	237.58	0.40	1.16	0.01	236.02	0.95
51			20-30	212.83	0.004	0.84	0.01	211.97	237.58	0.01	0.35	0.05	237.17	0.89
52			30-60	236.35	-	0.06	-	236.29	237.58	-	0.02	-	237.56	0.99
53		S	0-10	218.81	0.45	1.11	0.09	217.15	237.58	1.51	0.46	0.31	235.30	0.92
54			10 -20	236.71	0.11	1.44	0.01	235.15	237.58	0.35	0.60	0.04	236.59	0.99
55			20-30	226.91	0.07	0.57	0.28	225.99	237.58	0.24	0.24	0.93	236.18	0.96
56			30-60	197.61	0.004	1.38	0.23	195.99	237.58	0.01	0.58	0.76	236.23	0.83
57	PTR4	N	0-10	196.94	0.19	3.21	1.02	192.52	237.58	0.63	1.34	3.41	232.21	0.83

58			10 -20	211.20	0.35	0.36	0.003	210.49	237.58	1.16	0.15	0.01	236.26	0.89
59			20-30	242.10	0.29	1.15	0.19	240.47	237.58	0.96	0.48	0.63	235.51	1.02
60			30-60	262.92	-	0.93	0.02	261.97	237.58	-	0.39	0.07	237.13	1.10
61		S	0-10	214.04	0.21	0.31	0.43	213.08	237.58	0.71	0.13	1.45	235.30	0.91
62			10 -20	213.53	0.02	0.39	0.09	213.03	237.58	0.07	0.16	0.29	237.06	0.90
63			20-30	235.63	0.01	0.70	0.05	234.86	237.58	0.05	0.29	0.17	237.07	0.99
64			30-60	211.29	0.07	3.69	1.78	205.76	237.58	0.23	1.54	5.92	229.89	0.90
65	BMM 1	N	0-10	138.48	0.24	0.76	1.09	136.39	237.58	0.79	0.32	3.64	232.84	0.59
66			10 -20	186.25	0.16	1.29	0.34	184.46	237.58	0.54	0.54	1.14	235.37	0.78
67			20-30	147.76	0.12	0.01	0.03	147.60	237.58	0.40	0.0004	0.12	237.07	0.62
68			30-60	120.37	0.16	0.12	0.02	120.07	237.58	0.54	0.05	0.08	236.92	0.51
69		S	0-10	105.37	0.35	0.31	2.92	101.80	237.58	1.17	0.13	9.73	226.56	0.45
70			10 - 20	120.02	0.10	0.25	0.08	119.59	237.58	0.34	0.10	0.28	236.86	0.50
71			20-30	117.08	0.02	0.06	0.19	116.81	237.58	0.05	0.03	0.64	236.86	0.49
72			30-60	114.35	0.07	-	-	114.28	237.58	0.22	-	-	237.36	0.48
73	BMM 2	N	0-10	88.70	0.37	3.04	1.98	83.31	237.58	1.22	1.27	6.61	228.49	0.36
74			10 -20	102.71	0.23	1.44	0.70	100.35	237.58	0.75	0.60	2.33	233.90	0.43
75			20-30	106.94	0.05	0.47	0.36	106.06	237.58	0.16	0.20	1.20	236.03	0.45
76			30-60	97.71	0.03	0.58	0.10	97.00	237.58	0.11	0.24	0.33	236.91	0.41
77		S	0-10	87.69	0.53	0.56	2.49	84.12	237.58	1.75	0.23	8.29	227.31	0.37
78			10 -20	98.92	0.06	0.20	0.69	97.97	237.58	0.20	0.08	2.31	234.99	0.42
79			20-30	107.96	0.07	0.28	0.27	107.33	237.58	0.24	0.12	0.91	236.32	0.45
80			30-60	90.18	0.05	0.33	0.57	89.23	237.58	0.16	0.14	1.89	235.39	0.38

81	BMM 3	N	0-10	84.95	0.72	0.02	0.56	83.65	237.58	2.41	0.01	1.85	233.31	0.36
82			10 -20	125.70	0.20	0.20	0.05	125.25	237.58	0.68	0.08	0.16	236.66	0.53
83			20-30	112.83	0.09	0.12	0.04	112.59	237.58	0.29	0.05	0.12	237.12	0.47
84			30-60	101.72	0.02	0.61	0.09	101.00	237.58	0.08	0.25	0.28	236.96	0.43
85		S	0-10	108.03	0.82	0.34	0.66	106.21	237.58	2.75	0.14	2.19	232.50	0.46
86			10 -20	119.30	0.66	0.32	0.28	118.04	237.58	2.19	0.13	0.94	234.32	0.50
87			20-30	107.00	0.07	0.09	0.34	106.50	237.58	0.24	0.04	1.14	236.16	0.45
88			30-60	110.58	0.02	0.29	0.03	110.25	237.58	0.05	0.12	0.09	237.32	0.46
89	BMM 4	N	0-10	71.86	0.39	0.30	2.71	68.47	237.58	1.30	0.12	9.02	227.14	0.30
90			10 -20	114.78	0.26	0.19	0.05	114.28	237.58	0.86	0.08	0.17	236.47	0.48
91			20-30	113.12	0.08	0.80	0.07	112.17	237.58	0.27	0.33	0.24	236.74	0.47
92			30-60	101.95	0.12	0.02	0.25	101.56	237.58	0.41	0.01	0.82	236.34	0.43
93		S	0-10	110.63	0.32	-	0.36	109.95	237.58	1.05	-	1.21	235.32	0.47
94			10 - 20	115.69	0.06	0.52	0.06	115.05	237.58	0.21	0.22	0.20	236.96	0.49
95			20-30	106.90	0.06	0.22	0.17	106.46	237.58	0.19	0.09	0.57	236.73	0.45
96			30-60	98.05	0.15	0.53	0.07	97.30	237.58	0.51	0.22	0.22	236.63	0.41

*¹E=A-(B+C+D). *²G=B/0.3. *³H=C/2.4. *⁴I=D/0.3. 0.3=la densidad de las raíces y residuos. 2.4=la densidad de las piedras.

*⁵J=F-(G+H+I). *⁶Densidad aparente = E/J. (Etchevers *et al.*, 2005).

Tratamiento: ESP = Café Especializado. PTR= Café en Policultivo Tradicional. BMM= Bosque Mesófilo de Montaña.

Humedad gravimétrica del suelo (%).

#	Tratamiento		Profundidad (cm)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad * ¹ (%)	Volumen de agua* ² (%)
1	ESP1	N	0-10	10.00	7.07	41.44	37.36
2			10-20	10.03	7.43	34.99	32.79
3			20-30	10.05	7.14	40.76	34.60
4			30-60	10.34	7.16	44.41	35.06
5		S	0-10	10.00	7.10	40.85	39.47
6			10-20	10.38	7.42	39.89	36.49
7			20-30	10.32	7.33	40.79	36.54
8			30-60	10.22	7.31	39.81	36.10
9	ESP2	N	0-10	10.34	7.48	38.24	40.90
10			10-20	10.14	6.97	45.48	45.02
11			20-30	10.47	7.17	46.03	49.73
12			30-60	10.62	7.21	47.30	53.94
13		S	0-10	10.36	7.66	35.25	30.18
14			10-20	10.68	7.37	44.91	43.49
15			20-30	10.74	7.22	48.75	49.21
16			30-60	10.15	6.93	46.46	50.43
17	ESP3	N	0-10	10.11	7.60	33.03	31.81
18			10-20	10.31	7.23	42.60	30.80

19			20-30	10.27	6.84	50.15	43.35
20			30-60	10.24	7.39	38.57	34.65
21		S	0-10	10.46	7.58	37.99	32.92
22			10-20	10.19	6.91	47.47	45.85
23			20-30	10.20	6.89	48.04	50.55
24			30-60	10.47	7.01	49.36	53.26
25	ESP4	N	0-10	10.18	7.34	38.69	34.25
26			10-20	10.37	7.33	41.47	32.68
27			20-30	10.35	7.32	41.39	36.03
28			30-60	10.55	7.69	37.19	33.33
29		S	0-10	10.42	7.86	32.57	27.56
30			10-20	10.67	7.95	34.21	29.29
31			20-30	10.19	7.81	30.47	29.58
32			30-60	10.06	7.58	32.72	29.78
33	PTR1	N	0-10	10.49	7.53	39.31	38.60
34			10-20	10.66	7.76	37.37	33.42
35			20-30	10.20	7.35	38.78	37.76
36			30-60	10.21	7.37	38.53	35.46
37		S	0-10	10.21	7.08	44.21	38.92
38			10-20	10.29	7.23	42.32	41.38
39			20-30	10.14	7.04	44.03	43.05
40			30-60	10.76	7.49	43.66	39.73
41	PTR2	N	0-10	10.36	6.99	48.21	40.36

42			10-20	10.20	7.26	40.50	41.99
43			20-30	10.11	7.15	41.40	41.97
44			30-60	10.85	7.70	40.91	44.18
45		S	0-10	10.16	6.43	58.01	53.56
46			10-20	10.12	7.19	40.75	42.98
47			20-30	10.81	7.91	36.66	40.69
48			30-60	10.24	7.29	40.47	41.85
49	PTR3	N	0-10	10.58	7.30	44.93	42.64
50			10-20	10.44	7.33	42.43	40.30
51			20-30	10.86	7.60	42.89	38.34
52			30-60	10.71	7.38	45.12	44.88
53		S	0-10	10.36	7.34	41.14	37.97
54			10-20	10.62	7.72	37.56	37.34
55			20-30	10.36	7.42	39.62	37.91
56			30-60	10.26	7.29	40.74	33.80
57	PTR4	N	0-10	10.72	7.11	50.77	42.10
58			10-20	10.18	6.65	53.08	47.29
59			20-30	10.47	6.99	49.79	50.83
60			30-60	10.30	7.37	39.76	43.92
61		S	0-10	10.21	7.03	45.23	40.96
62			10-20	10.27	7.18	43.04	38.67
63			20-30	10.40	7.48	39.04	38.67
64			30-60	10.89	7.81	39.44	35.30

65	BMM1	N	0-10	10.64	6.22	71.06	41.63
66			10-20	10.16	6.47	57.03	44.70
67			20-30	10.63	5.54	91.88	57.20
68			30-60	10.13	5.06	100.20	50.78
69		S	0-10	10.21	4.94	106.68	47.93
70			10-20	10.60	5.97	77.55	39.16
71			20-30	10.68	5.94	79.80	39.35
72			30-60	10.70	5.23	104.59	50.36
73	BMM2	N	0-10	10.15	5.82	74.40	27.13
74			10-20	10.44	5.78	80.62	34.59
75			20-30	10.31	5.75	79.30	35.64
76			30-60	10.73	6.23	72.23	29.57
77		S	0-10	10.32	6.01	71.71	26.54
78			10-20	10.48	5.80	80.69	33.64
79			20-30	10.63	5.48	93.98	42.68
80			30-60	10.83	5.30	104.34	39.55
81	BMM3	N	0-10	10.71	6.21	72.46	25.98
82			10-20	10.48	6.19	69.31	36.68
83			20-30	10.49	5.98	75.42	35.81
84			30-60	10.65	5.70	86.84	37.01
85		S	0-10	10.83	6.53	65.85	30.08
86			10-20	10.11	6.15	64.39	32.44
87			20-30	10.74	5.94	80.81	36.44

88			30-60	10.36	5.47	89.40	41.53
89	BMM4	N	0-10	10.32	5.46	89.01	26.83
90			10-20	10.19	5.61	81.64	39.45
91			20-30	10.65	6.11	74.30	35.21
92			30-60	10.27	5.41	89.83	38.60
93		S	0-10	10.79	6.10	76.89	35.92
94			10-20	10.27	5.91	73.77	35.82
95			20-30	10.34	5.44	90.07	40.50
96			30-60	10.31	5.20	98.27	40.41

*¹Método Gravimétrico: (Peso suelo húmedo – Peso suelo seco por horno)/ Peso suelo seco por horno x 100.

*²Volumen de agua: Humedad (%) x Densidad aparente (g cm⁻³).

Tratamiento: ESP = Café Especializado. PTR= Café en Policultivo Tradicional. BMM= Bosque Mesófilo de Montaña.

ANEXO 11. Contenido de carbono orgánico en el suelo.

#	Tratamiento		Profundidad (cm)	Carbono orgánico* ¹ (%)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Profundidad (cm)	Contenido de C * ² (Mg ha ⁻¹)
1	ESP1	N	0-10	3.67	0.90	10	33.07
2			10-20	2.91	0.94	10	27.27
3			20-30	3.31	0.85	10	28.11
4			30-60	2.77	0.79	30	65.54
5		S	0-10	3.86	0.97	10	37.26
6			10-20	4.09	0.91	10	37.37
7			20-30	3.57	0.90	10	31.98
8			30-60	2.91	0.91	30	79.19
9	ESP2	N	0-10	3.21	1.07	10	34.35
10			10-20	2.54	0.99	10	25.08
11			20-30	0.92	1.08	10	9.90
12			30-60	0.80	1.14	30	27.34
13		S	0-10	3.53	0.86	10	30.18
14			10-20	1.85	0.97	10	17.93
15			20-30	0.74	1.01	10	7.48
16			30-60	0.57	1.09	30	18.41
17	ESP3	N	0-10	2.81	0.96	10	27.04
18			10-20	1.15	0.72	10	8.27

19			20-30	1.33	0.86	10	11.42
20			30-60	1.54	0.90	30	41.47
21		S	0-10	2.16	0.86	10	18.69
22			10-20	1.05	0.96	10	10.16
23			20-30	0.53	1.05	10	5.52
24			30-60	0.47	1.08	30	15.12
25	ESP4	N	0-10	4.76	0.88	10	42.03
26			10-20	3.65	0.79	10	28.68
27			20-30	3.04	0.87	10	26.46
28			30-60	2.24	0.90	30	60.25
29		S	0-10	3.59	0.85	10	30.34
30			10-20	3.14	0.86	10	26.85
31			20-30	2.59	0.97	10	25.09
32			30-60	1.79	0.91	30	48.87
33	PTR1	N	0-10	3.12	0.98	10	30.66
34			10-20	3.42	0.89	10	30.61
35			20-30	3.06	0.97	10	29.74
36			30-60	1.71	0.92	30	47.22
37		S	0-10	4.34	0.88	10	38.16
38			10-20	3.46	0.98	10	33.84
39			20-30	2.45	0.98	10	23.87
40			30-60	0.98	0.91	30	26.61
41	PTR2	N	0-10	5.11	0.84	10	42.71

42			10-20	2.81	1.04	10	29.13
43			20-30	2.42	1.01	10	24.48
44			30-60	2.49	1.08	30	80.81
45		S	0-10	4.65	0.92	10	42.89
46			10-20	2.93	1.05	10	30.90
47			20-30	2.34	1.11	10	25.93
48			30-60	2.32	1.03	30	71.85
49							
50	PTR3	N	0-10	4.24	0.95	10	40.20
51			10-20	3.52	0.95	10	33.46
52			20-30	3.25	0.89	10	29.01
53			30-60	1.66	0.99	30	49.62
54		S	0-10	3.90	0.92	10	35.97
55			10-20	2.79	0.99	10	27.74
56			20-30	2.49	0.96	10	23.86
57			30-60	2.22	0.83	30	55.17
58	PTR4	N	0-10	4.16	0.83	10	34.42
59			10-20	3.39	0.89	10	30.15
60			20-30	2.85	1.02	10	29.10
61			30-60	2.14	1.10	30	70.86
62		S	0-10	4.63	0.90	10	41.92
63			10-20	2.91	0.90	10	26.15
64			20-30	2.63	0.99	10	26.08
			30-60	2.67	0.89	30	71.58

65	BMM1	N	0-10	6.49	0.58	10	37.97
66			10-20	3.54	0.78	10	27.74
67			20-30	3.13	0.62	10	19.47
68			30-60	1.05	0.51	30	15.95
69		S	0-10	7.36	0.45	10	32.96
70			10-20	4.73	0.50	10	23.88
71			20-30	1.93	0.49	10	9.53
72			30-60	1.47	0.48	30	21.25
73	BMM2	N	0-10	9.85	0.36	10	35.77
74			10-20	6.03	0.43	10	25.82
75			20-30	4.79	0.45	10	21.50
76			30-60	4.84	0.41	30	59.43
77		S	0-10	10.08	0.37	10	37.17
78			10-20	5.61	0.42	10	23.37
79			20-30	5.69	0.45	10	25.83
80			30-60	7.06	0.38	30	80.17
81	BMM3	N	0-10	8.09	0.36	10	28.95
82			10-20	4.17	0.53	10	22.04
83			20-30	3.72	0.47	10	17.67
84			30-60	2.71	0.43	30	34.67
85		S	0-10	5.71	0.46	10	26.02
86			10-20	5.96	0.50	10	29.97
87			20-30	3.37	0.45	10	15.18

88			30-60	1.74	0.46	30	24.21
89	BMM4	N	0-10	12.94	0.30	10	38.84
90			10-20	4.99	0.48	10	24.12
91			20-30	6.26	0.47	10	29.64
92			30-60	2.89	0.43	30	37.23
93		S	0-10	8.28	0.47	10	38.63
94			10-20	6.54	0.49	10	31.75
95			20-30	3.49	0.45	10	15.70
96			30-60	2.07	0.41	30	25.58

*¹Método Walkley-Black (1934).

*²Contenido de carbono orgánico (Mg ha⁻¹)

= Carbono orgánico del suelo (%) x Densidad aparente (g cm⁻³) x Profundidad del suelo (cm).

Tratamiento: ESP = Café Especializado. PTR= Café en Policultivo Tradicional. BMM= Bosque Mesófilo de Montaña.