



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

CARBONO Y NITRÓGENO EN EL SUELO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES CAFETALEROS Y SISTEMA NATURAL

TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA:

VIANCA AZUCENA ARÉVALO MADRIGAL



Abril 2016
Chapingo, Estado de México

**CARBONO Y NITRÓGENO EN EL SUELO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES CAFETALEROS Y SISTEMA NATURAL**

Tesis realizada por Vianca Azucena Arévalo Madrigal 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. David Cristóbal Acevedo

ASESOR:



Dra. María Edna Álvarez Sánchez

ASESOR:



Dra. Rosa María García Núñez

DEDICATORIA

A Dios quien me dio la fe, la fortaleza y la salud para terminar este trabajo.

A mi esposo, por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

A mis padres, hermanos, hermanas, sobrinos y sobrinas, por sus constantes muestras de cariño y apoyo incondicional

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca.

A los profesores, Dr. David Cristóbal Acevedo, Dra. María Edna Álvarez Sánchez y Dra. Rosa María García Núñez, por dirigir y asesor la presente tesis. Por sus acertadas observaciones y recomendaciones para mejorar esta investigación.

Al M. C. Julio César de la Cruz Osorio por su apoyo en el trabajo de campo y por sus sugerencias en la redacción de la presente tesis.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Vianca Azucena Arévalo Madrigal

Fecha de nacimiento: 12 de mayo de 1988

Lugar de nacimiento: La Fraylesca, Villa Corzo, Chiapas

CURP: AEMV880512MCSRDN06

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Cedula profesional: 8186038



Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo (2004-2007).

Licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables en la Universidad Autónoma Chapingo (2007-2011).

CARBONO Y NITRÓGENO EN EL SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CAFETALEROS Y SISTEMA NATURAL

CARBON AND NITROGEN IN THE SOIL IN COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS AND NATURAL SYSTEM

Vianca Azucena Arévalo Madrigal¹ y David Cristóbal Acevedo²

RESUMEN

Se evaluó el efecto de dos sistemas agroforestales cafetaleros de diferente edad: maduro (SAM) y nuevo (SAN), y de un sistema natural (SN) en la concentración y contenido de carbono y nitrógeno en forma de: nitrógeno total, nitrógeno orgánico, nitrógeno mineral, amonio y nitratos, además de la relación carbono/nitrógeno (C/N) en el suelo. En el campo se tomaron muestras de suelo a tres intervalos de profundidad: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. En los tres sistemas, la mayor concentración y contenido de carbono orgánico y de nitrógeno en sus diferentes formas se encontró en la profundidad de 0-10 cm. Los valores obtenidos disminuyeron gradualmente en todos los casos a medida que aumentó la profundidad de muestreo, presentando diferencias estadísticas significativas, excepto en amonio, nitratos y N-min donde no se tuvo efecto de la profundidad. La relación C/N, tendió a aumentar con la profundidad. El SAN presentó en promedio una concentración y contenido de carbono superior a los otros dos sistemas pero estadísticamente solo se diferenció del SN. En los dos sistemas agroforestales no hubo diferencia estadística significativa en la concentración y contenido de nitrógeno total y orgánico y ambos fueron superiores estadísticamente a lo encontrado en el sistema natural. A pesar de que la concentración y contenido de amonio, nitratos y nitrógeno mineral fueron menores en el SN, estadísticamente no hubo diferencias entre los sistemas, indicando que no se tuvo efecto de estos en la disponibilidad de estas formas del nitrógeno. En promedio, la mejor relación C/N se registró en el SN y el SAN.

Palabras clave: Sistemas agroforestales, suelo, concentración, contenido, carbono, nitrógeno.

ABSTRACT

The effect of two different-aged coffee agroforestry systems, mature (SAM) and new (SAN), plus a natural system (SN), were evaluated in terms of the concentration and content of carbon and nitrogen as total nitrogen, organic nitrogen, mineral nitrogen, ammonium and nitrates, in addition to the carbon/nitrogen (C/N) ratio in the soil. In the field, soil samples were taken at three depth intervals: 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm. In the three systems, the highest concentration and content of organic carbon and nitrogen in its different forms were found at the 0-10 cm depth interval. The values obtained decreased gradually in all cases as the sampling depth increased, showing significant statistical differences, except in ammonium, nitrates and mineral-N where depth had no effect. The C/N ratio tended to increase with depth. The SAN presented a higher average carbon concentration and content than the other two systems but only differed statistically from SN. In the two agroforestry systems there was no significant statistical difference in the concentration and content of total and organic nitrogen and both were statistically higher to that found in the natural system. Although the concentration and content of ammonium, nitrates and mineral nitrogen were lower in the SN, statistically there was no difference between the systems, indicating that they had no effect on the availability of these forms of nitrogen. On average, the best C/N ratio was recorded in the SN and in the SAN.

Keywords: Agroforestry systems, soil, concentration, content, carbon, nitrogen.

¹ Tesista

² Director

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	v
ABSTRACT	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Hipótesis	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1. Carbono	5
3.1.1. Ciclo del carbono	6
3.1.2. Carbono orgánico del suelo.....	7
3.1.3. Carbono en sistemas agroforestales	9
3.1.4. Impacto ambiental	10
3.2. Nitrógeno	10
3.2.1. Ciclo del nitrógeno.....	11
3.2.2. Nitrógeno en el suelo	15
3.2.3. Nitrógeno en sistemas agroforestales	15
3.2.4. Impacto ambiental	17
3.3. Relación Carbono/Nitrógeno	18
3.4. Sistemas agroforestales con café	20
3.4.1. Cafetal tradicional o rusticano	21
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
4.1. Área de estudio.....	22
4.2. Descripción de los sistemas.....	23
4.2.1. Sistema agroforestal maduro (SAM)	24
4.2.2. Sistema agroforestal nuevo (SAN)	24
4.2.3. Sistema natural (SN)	25
4.3. Muestreo de suelo	25

4.3.1. Delimitación de las unidades de muestreo	26
4.4. Secado de las muestras.....	29
4.5. Determinación de las concentraciones de carbono y nitrógeno en el suelo....	29
4.6. Contenidos de carbono y nitrógeno en el suelo.....	30
4.7. Relación carbono/nitrógeno	31
4.8. Análisis estadístico	31
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
5.1. Carbono Orgánico del Suelo (COS)	32
5.1.1. Concentración en las tres profundidades	32
5.1.2. Concentración en los tres sistemas.....	33
5.1.3. Contenido en las tres profundidades	35
5.1.4. Contenido en los tres sistemas	36
5.2. Nitrógeno	38
5.2.1. Nitrógeno total (N-total) y orgánico (N-orgánico)	38
Concentración en las tres profundidades	38
Concentración en los tres sistemas.....	40
Contenido en las tres profundidades.....	42
Contenido en los tres sistemas	44
5.2.2. Amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y nitrógeno mineral (N-min)	45
Concentración en las tres profundidades	45
Concentración en los tres sistemas.....	48
Contenido en las tres profundidades.....	50
Contenido en los tres sistemas	51
5.3. Relación carbono/nitrógeno en las tres profundidades.....	53
5.3.1 Relación carbono/nitrógeno en los tres sistemas	55
6. CONCLUSIONES	57
7. RECOMENDACIONES	59
8. LITERATURA CITADA	61
9. ANEXOS.....	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Identificación de los sistemas evaluados en la comunidad La Fraylesca.	23
Cuadro 2. Coordenadas de las unidades de muestreo.	27
Cuadro 3. Porcentaje de COS en las tres profundidades.	33
Cuadro 4. Porcentaje de COS en los tres sistemas.	34
Cuadro 5. Contenido de COS en las tres profundidades.	36
Cuadro 6. Contenido de COS en los tres sistemas.	36
Cuadro 7. Concentración del N-total y N-orgánico en las tres profundidades.	40
Cuadro 8. Concentración de N-total y N-orgánico en los tres sistemas.	41
Cuadro 9. Contenido de N-total y N- orgánico en las tres profundidades.	43
Cuadro 10. Contenido de N-total y N-orgánico en los tres sistemas.	44
Cuadro 11. Contenido de N-total y N-orgánico en los tres sistemas en la profundidad de 0-30 cm.	45
Cuadro 12. Concentración de amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y N-mineral en las tres profundidades.	47
Cuadro 13. Concentración de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas.	48
Cuadro 14. Concentración de amonio, nitratos y N-mineral en los tres sistemas en la profundidad de 0-30 cm.	49
Cuadro 15. Contenido de amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y N-mineral en las tres profundidades.	51
Cuadro 16. Contenido de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas.	52
Cuadro 17. Contenido de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas en la profundidad de 0-30 cm.	52
Cuadro 18. Relación C/N en las tres profundidades.	54
Cuadro 19. Relación C/N en los tres sistemas.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del carbono (Fuente: Energex, 2010).....	7
Figura 2. Ciclo del nitrógeno (Fuente: Coyne, 2000).....	12
Figura 3. Modalidades de producción de café (Moguel y Toledo, 2004).	20
Figura 4. Localización de la comunidad La Fraylesca.	22
Figura 5. Localización de los tres sistemas evaluados en la comunidad La Fraylesca.	24
Figura 6. Delimitación y georreferenciación de las UM.	26
Figura 7. Apertura de pozo para muestreo.....	27
Figura 8. Extracción de suelo con pala en las profundidades de muestreo.	28
Figura 9. Muestras colocadas en bolsas de plástico.	28
Figura 10. Secado de las muestras.....	29
Figura 11 (a), (b) y (c). Comportamiento del carbono orgánico en los sistemas.....	32
Figura 12. Concentración de COS en los tres sistemas.	34
Figura 13 (a), (b) y (c). Comportamiento del contenido de COS en las tres profundidades.	35
Figura 14. Contenido de COS en los tres sistemas.....	37
Figura 15 (a), (b) y (c). Comportamiento de la concentración de N-total en las tres profundidades.	39
Figura 16 (a), (b) y (c). Comportamiento de la concentración de N-orgánico en las tres profundidades.....	39
Figura 17 (a) y (b). Concentración de N-total y N-orgánico en los tres sistemas.	41
Figura 18 (a), (b) y (c). Comportamiento del contenido de N-total y N-orgánico en las tres profundidades.....	43
Figura 19 (a) y (b). Contenido de N-total y orgánico en los tres sistemas.	45
Figura 20. (a), (b) y (c). Comportamiento de la concentración de amonio y nitratos en las tres profundidades.....	46
Figura 21 (a), (b) y (c). Comportamiento del N-min en las tres profundidades.	47
Figura 22 (a), (b) y (c). Concentración de amonio, nitratos y N-mineral en los tres sistemas.	49
Figura 23 (a), (b) y (c). Comportamiento del amonio y nitratos en las tres profundidades.	50
Figura 24 (a), (b) y (c). Comportamiento del N-mineral en las tres profundidades.	51
Figura 25. Contenido de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas.	53
Figura 26 (a), (b) y (c). Relación C/N en las tres profundidades.....	54
Figura 27. Relación C/N en los tres sistemas.	56

1. INTRODUCCIÓN

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) se están incrementando por actividades antrópicas como el cambio en los usos de la tierra. Esto ha provocado incremento en el calentamiento global que probablemente excede la tasa crítica en la que los ecosistemas son capaces de adaptarse a cambios climáticos (Lal, 2004; IPCC, 2007). En los últimos años se ha puesto especial énfasis en el suelo como reservorio de carbono (C) a escala global, por la importancia que tiene para evaluar los cambios en las concentraciones de carbono atmosférico (Johnson *et al.*, 2002). El contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) llega a superar en dos o tres veces los depósitos de C de la biomasa aérea (Etchevers *et al.*, 2001; Lal, 2007; SSSA, 2014).

Los bosques son reconocidos como sistemas importantes que ofrecen servicios ambientales debido a su capacidad de almacenamiento y secuestro de CO₂; sin embargo, no son los únicos con esa capacidad, puesto que se tienen sistemas agroforestales como los cafetales con sombra que tienen un alto potencial para ser incorporados en el mercado del carbono (Sartorio, 2002; Ortiz, 2004; Pineda *et al.*, 2005) ya que al incluir especies arbóreas, asumen una importante función en la retención de C en los suelos y en la madera (Mutuo *et al.*, 2005).

El nitrógeno (N), después del agua, es uno de los principales factores limitantes para el desarrollo de los cultivos, y su concentración es considerada como indicador de fertilidad del suelo. Así también, es indispensable para la fotosíntesis; es decir, para que las plantas fijen el carbono del aire, acumulen materia seca y produzcan rendimientos económicamente atractivos (Arana, 2003). Hay que destacar la importancia de la producción de los residuos

vegetales en el ciclo del N, que en gran parte depende del tipo de especies involucradas en dichos sistemas y de su manejo.

En los sistemas agroforestales (SAF) cafetaleros los árboles y arbustos utilizados como sombra permiten una captura más eficiente de la energía solar y favorecen la adsorción, retención o captura de carbono y nitrógeno sobre y bajo el suelo (Arana 2003; Beer *et al.* 2003). Además, mediante sus raíces profundas aumentan la disponibilidad de N, reciclan nutrientes y mantienen el sistema en un estado de equilibrio dinámico, al reducir la dependencia del sistema sobre insumos externos (Beer *et al.*, 1998; Gliessman, 2002). Así también, las hojas caídas juegan un papel importante al proveer cobertura al suelo modificando el ambiente edáfico, conforme se descompone, esta hojarasca se convierte en fuente importante de materia orgánica (Altieri, 1999; Gliessman, 2002).

Los SAF pueden verse como una alternativa para el uso y manejo de los recursos naturales en regiones tropicales y sub tropicales, ya que cumplen con diferentes funciones de importancia en los sistemas como: diversificar la agricultura, aumentar el nivel de materia orgánica en el suelo, fijar nitrógeno atmosférico, reciclar nutrientes, modificar el microclima y optimizar la producción del sistema, en función del rendimiento sostenido (Gliessman, 2002). La demanda creciente de madera o de árboles vivos por sus funciones ecológicas (fijación de N y C), son elementos que alimentan el interés de plantar más árboles, incluyendo las asociaciones agroforestales (Jiménez *et al.*, 2001).

Por lo antes descrito, en esta investigación se pretende contribuir al conocimiento del C y N en los SAF's, por lo que el objetivo fue evaluar el efecto de dos sistemas agroforestales cafetaleros y un sistema natural en las concentraciones y contenidos de carbono y nitrógeno en el suelo.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de dos sistemas agroforestales cafetaleros y un sistema natural sobre la concentración y contenido de carbono y nitrógeno en el suelo, para aportar información de los sistemas en relación a las formas de nitrógeno presentes, la relación carbono/nitrógeno y al reservorio de carbono orgánico.

2.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la concentración y el contenido de carbono orgánico del suelo para determinar los reservorios de carbono en los sistemas.
- Cuantificar la concentración y el contenido de nitrógeno en el suelo en forma de nitrato, amonio, N-mineral, N-orgánico y N-total para determinar las cantidades presentes en los sistemas.
- Obtener la relación C/N para determinar qué sistema tiene una mejor condición en la producción de nitrógeno asimilable en el suelo.
- Cuantificar la concentración y contenido de carbono orgánico y nitrógeno en sus diferentes formas, así como la relación C/N, a tres profundidades del suelo para determinar el comportamiento de estos, conforme se incrementa la profundidad.

2.3. Hipótesis

- El sistema agroforestal nuevo, debido a las aportaciones constantes de material vegetal, tiene una mayor concentración y, por lo tanto, un mayor contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo.
- El sistema agroforestal nuevo tiene una mayor concentración y un mayor contenido de nitrógeno en el suelo en sus diferentes formas.
- El sistema agroforestal nuevo tiene una mejor condición en la producción de nitrógeno asimilable en el suelo.
- La capa superficial tienen una mayor concentración y contenido de carbono orgánico y nitrógeno en sus diferentes formas, así como una mejor relación C/N.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Carbono

El carbono (C) es el elemento químico fundamental de los compuestos orgánicos, que circula por los océanos, la atmósfera, el suelo y subsuelo. El C pasa de un depósito a otro por medio de procesos químicos, físicos y biológicos. La atmósfera es el menor y el más dinámico de los reservorios del ciclo del carbono, pero todos los cambios que ocurren en este reservorio tienen una estrecha relación con los cambios del ciclo global de carbono y del clima. Gran parte del carbono presente en la atmósfera ocurre en la forma de CO₂ (Rügnitz *et al.*, 2009).

El CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO₂ participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y troncos). Al crecer, éste incrementa su follaje, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en su conjunto forman la copa) así como su altura y el grosor de su tronco. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, este a su vez, aporta nuevamente CO₂ al entorno (Masera, 1995).

Cualquier actividad relacionada al uso del suelo que modifique la cantidad de biomasa en la vegetación y en el suelo, tiene el potencial de alterar la cantidad de carbono almacenado y emitido hacia la atmósfera, lo que afecta directamente la dinámica del clima de la tierra (Rügnitz *et al.*, 2009).

3.1.1. Ciclo del carbono

Este ciclo describe los intercambios de carbono entre las cuatro reservas naturales de este elemento, que son: la atmósfera, los océanos, los sedimentos fósiles y la biosfera terrestre, de los cuales depende la regulación del clima en el planeta. El movimiento del C ocurre a diferentes escalas espacio-temporales, que van desde el nivel molecular, pasando por el organísmico hasta el global (Jaramillo, 2004).

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 materia orgánica (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. 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 (Seeberg-Elverfeldt, 2010) (Figura 1).

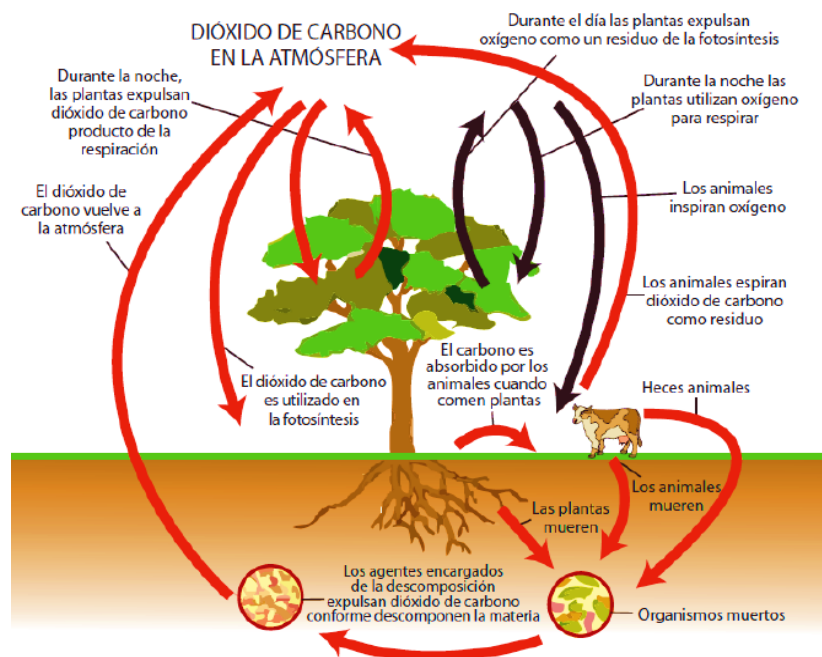


Figura 1. Ciclo del carbono (Fuente: Energex, 2010).

3.1.2. Carbono orgánico del suelo

El suelo comparado con la vegetación es el que mayor cantidad de carbono almacena (SSSA, 2014), aunque cabe aclarar, que estos contenidos dependerán de la profundidad del mismo (Segura *et al.*, 2005). La asimilación de carbono se estima en más del 89%, y ésta corresponde principalmente al carbono del suelo (Ávila *et al.*, 2001),

Los suelos constituyen un compartimiento terrestre que actúa como reservorio de carbono orgánico, por lo general, muchos suelos tienen gran capacidad de secuestro de carbono. La potencialidad de los suelos para almacenar materia orgánica y la extensión de la cubierta edáfica en su conjunto explican su importancia en el balance global de carbono. La gestión de la materia orgánica del suelo permite incidir a corto y medio plazo en el secuestro de carbono (Porta *et al.*, 2003). Robert (2002), mencionó que la forma orgánica representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima a nivel global en cerca de 1,500 Pg de C a un metro de profundidad, lo cual es el doble de lo

que almacena la atmósfera (750 Pg) y casi el doble de la cantidad almacenada en la vegetación (650 Pg).

La captura y retención de carbono en el suelo depende de factores definidos, limitantes o reductores. Los factores definidos se refieren al origen del material parental, las características geomorfológicas (pendiente y orientación de ladera) y a la composición mineral del suelo. Estas características están asociadas con la textura, profundidad, densidad aparente, fragmentos de roca, drenaje y grado de erodabilidad (Fisher, 2000; Robert, 2001; Lal, 2005). Los factores limitantes son la producción primaria neta, la composición del bosque y el clima (temperatura y humedad); mientras que los factores reductores incluyen actividades humanas relacionadas con la agricultura y la silvicultura. La tala de bosques, las rozas, las transformaciones de pradera a tierra de labor, el sistema de cultivo (laboreo continuado, mínimo de conservación), las quemas de bosques y de rastrojos, pueden aumentar o disminuir el contenido de materia orgánica del suelo o bien generar dióxido de carbono (CO₂) (medio aerobio) o CO₂ y metano (CH₄) (medio anaerobio) hacia la atmósfera (Fisher, 2000; Porta *et al.*, 2003).

En los estudios de secuestro de carbono en los suelos, los aspectos a tener en cuenta son (Macías y Campos, 2002): capacidad de un suelo para actuar como sumidero de carbono, mecanismos de fijación, efectos del tipo de uso de suelo sobre el contenido de materia orgánica, balance de carbono en un determinado ecosistema, efectos beneficiosos del incremento de carbono en el suelo (estructura, porosidad, capacidad de retención de agua disponible para las plantas, fertilidad, etc.), efectos derivados de la rehabilitación de suelos degradados, efectos derivados de las reforestaciones y planificación del uso de los suelos. Por su parte, Mena (2008) y FAO (2002) coinciden en que son varios los factores que favorecen la retención del carbono en el suelo y permiten mayores tasas de recambio, siendo estas: hojarasca (aporte de residuos) con concentraciones altas de asimilados ricos en nutrimentos, carbohidratos,

aireación, altas temperaturas, textura arenosa, acidez y superficies con poca carga.

3.1.3. Carbono en sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales son una mejor opción para la mitigación del cambio climático que los océanos, y otras opciones terrestres debido a los beneficios ambientales secundarios, tal como ayudar a alcanzar la seguridad alimentaria y asegurar la tenencia de la tierra en países en desarrollo, incrementando los ingresos de la granja, restaurando y manteniendo la biodiversidad subterránea y aérea (Pandey, 2002).

La agroforestería es reconocida como una estrategia para la fijación de carbono en el suelo bajo las actividades de aforestación o reforestación, pero el conocimiento sobre la dinámica del carbono en el suelo de los sistemas agroforestales no es la adecuada (Nair *et al.*, 2009). Los SAF representan una oportunidad para reducir las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmosfera, por el incremento del contenido de carbono en los campos agrícolas (Hergoualc'h *et al.*, 2012). Rodríguez *et al.* (2009) afirman que a mayor productividad biológica del sistema ocurre un mayor contenido de carbono, por lo tanto, los agroecosistemas pueden tener mayor capacidad de fijar carbono que otros sistemas naturales e incluso que los bosques tropicales maduros.

La adopción de prácticas agroforestales es una alternativa de desarrollo rural sustentable para el trópico mexicano, debido a que contribuyen a la reducción de emisiones de dióxido de carbono, principal causante del efecto invernadero, amortiguan la presión sobre los ecosistemas vulnerables (bosques y selvas) y aportan bienestar socioeconómico a las comunidades rurales (Casanova *et al.*, 2011). Así también tienen una estrategia importante para la captación de carbono debido al potencial de almacenamiento en sus múltiples especies de plantas y en el suelo (Montagnini y Nair, 2004).

3.1.4. Impacto ambiental

El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los gases de efecto invernadero de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración atmosférica y por el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El CO_2 es responsable del 50% del calentamiento global debido a la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Casanova *et al.*, 2011).

Cantidades enormes de CO_2 entran cada año a la atmósfera como consecuencia del uso generalizado de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural). Debido al constante intercambio de CO_2 entre la atmósfera y el océano (el cual puede absorber una gran parte de CO_2), solamente parte del CO_2 antropogénico permanece en la atmósfera (Mena, 2008).

Es importante resaltar que México se encuentra dentro de los 15 países con mayor emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Según las estadísticas actuales, las emisiones netas totales anuales de CO_2 alcanzaron 444 millones de toneladas, lo que representa aproximadamente el 2% de las emisiones mundiales y el 96% de las emisiones nacionales. De esta cantidad, cerca del 70% corresponden a diversos procesos de combustión de los sectores energético, industrial, de transporte y otros servicios, y el 30% restante se origina del proceso del cambio del uso del suelo, relacionado principalmente con la agricultura y ganadería convencional (Casanova *et al.*, 2011).

3.2. Nitrógeno

El nitrógeno es esencial para todos los seres vivos. Cerca del 98% del nitrógeno de todo el mundo se encuentra en tierra sólida, dentro de la estructura química de roca, tierra y sedimento. El resto se mueve en un ciclo dinámico entre la atmósfera, océanos, lagos, corrientes, plantas y animales (Porter *et al.*, 2000).

La atmósfera es el reservorio más grande de nitrógeno con un 79% en su forma elemental (N_2), sin embargo metabólicamente no está disponible para su asimilación por las plantas superiores que no poseen mecanismos para romper el triple enlace covalente (Philippot y Germon, 2005). Por lo que, tanto las plantas y todos los organismos, desde los herbívoros hasta los depredadores y descomponedores, que aseguran su alimentación a través de materiales sintetizados por las plantas deben esperar a que el nitrógeno atmosférico sea fijado, esto es, que sea extraído del aire y se enlace a moléculas de hidrógeno u oxígeno para formar compuestos inorgánicos utilizables, principalmente amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) (Vitousek *et al.*, 1997).

Favela *et al.* (2006), mencionaron que el N se encuentra en la planta en forma orgánica e inorgánica y forma parte de los aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, enzimas, clorofila y alcaloides. Aunque el N inorgánico se puede acumular en forma de nitrato, el N orgánico predomina por el mayor peso molecular de las proteínas vegetales. Alrededor del 80% del N que absorbe la planta, se utiliza para formar proteínas, el 10% ácidos nucleicos, el 5% aminoácidos solubles, y el resto otros compuestos.

3.2.1. Ciclo del nitrógeno

Los procesos principales que componen el ciclo del nitrógeno son: la fijación del nitrógeno, la toma de nitrógeno (crecimiento de organismos), la mineralización del nitrógeno (desintegración), la nitrificación y la denitrificación (Arthur, 2000; Hayatsu *et al.*, 2008). Dicho ciclo se esquematiza en la Figura 2.

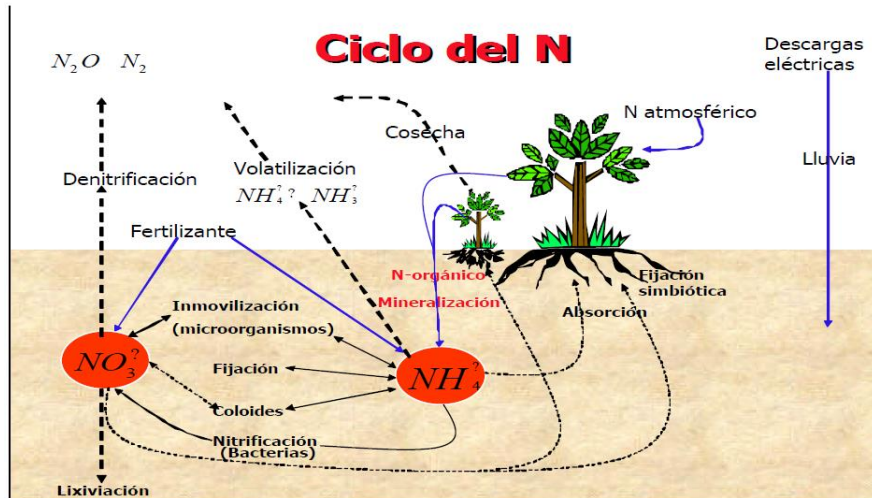


Figura 2. Ciclo del nitrógeno (Fuente: Coyne, 2000).

Fijación

La cantidad de nitrógeno gaseoso que se fija en un momento dado por procesos naturales, representa sólo una pequeña adición al reservorio de nitrógeno previamente fijado, que circula entre los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas terrestres. Aunque gran parte de ese nitrógeno tampoco está disponible, sino que se encuentra atrapado en la materia orgánica de los suelos en restos de material vegetal y animal parcialmente podridos, que deben ser descompuestos por microorganismos. Estos liberan el nitrógeno en forma de amonio o nitratos, permitiendo que se recicle a través de la cadena alimenticia. Las principales fuentes naturales de fijación que constituyen nuevas entradas de nitrógeno gaseoso a este ciclo, son los relámpagos junto con el agua de lluvia y la actividad de organismos fijadores (Vitousek *et al.*, 1997).

Mineralización

La mineralización es el proceso de transformación de nitrógeno orgánico a nitrógeno mineral e involucra dos subprocesos: amonificación y nitrificación (Castellanos *et al.*, 2000). La amonificación es la transformación del N orgánico a N amoniacal ($N-NH_4$) es un importante proceso microbiano, no solo por que

proporciona la materia prima para la nitrificación posterior, sino porque genera nitrógeno fácilmente asimilable.

El primer producto de la mineralización es el amoníaco (NH_3) el cual puede adquirir un hidrógeno y formar amonio (NH_4^+), que puede ser fijado por las arcillas del suelo o por la materia orgánica, volatilizado como amoníaco, asimilado por plantas o microorganismos, lixiviado u oxidado por bacterias autotróficas mediante el proceso de nitrificación, en donde pierde dos átomos de hidrógeno para formar nitrito (NO_2^-) y luego nitrato (NO_3^-) (Philippot y Germon, 2005).

Los factores que afectan la nitrificación son: las bacterias Nitrosomonas y Nitrobacter (organismos autótrofos aeróbicos), pH del suelo, aireación del suelo, humedad y temperatura (Castellanos *et al.*, 2000).

De acuerdo con Núñez (2007), la mayor parte del nitrógeno asimilable en el suelo se encuentra en forma nítrica y amoniacal. El nitrato por su carácter aniónico es fácilmente lixiviable y por ello cobra mayor importancia en el fenómeno de la nitrificación.

Se ha observado relación entre las tasas de mineralización encontradas y los contenidos de materia orgánica (Okano *et al.*, 2004), y se ha propuesto que la evaluación de las diferentes fracciones de materia orgánica, se puede utilizar para predecir el comportamiento de las tasas netas de mineralización de nitrógeno (Kader *et al.*, 2010).

Asimilación

Este proceso ocurre cuando las plantas absorben por medio de sus raíces, nitrato o amoníaco (formados por fijación de nitrógeno o nitrificación) o de manera extracelular, mediante la entrada de nitrato, amonio o nitrito.

Posteriormente a la entrada de estos elementos a la célula, son transportadas con ayuda de proteínas para sufrir un proceso de reducción a nitrito, esto por medio de una reacción catalizada por la enzima nitrato reductasa, finalmente ocurre la reducción de nitrito a amonio, ésta ocurre por una reacción catalizada por la nitrito reductasa, el proceso anterior se lleva a cabo usando energía en forma de ATP y liberando agua, resultando la asimilación de amonio por las plantas (Martínez, 2003).

Inmovilización

La inmovilización del nitrógeno es el reverso de la mineralización; se le define como el proceso con que el nitrógeno mineral en el suelo es transformado en nitrógeno orgánico por acción de los microorganismos del suelo (Castellanos *et al.*, 2000). Es un proceso crítico que controla la disponibilidad de N para las plantas, que junto con la relación C/N en plantas y suelo, son variables claves que afectan la tasas de mineralización (Forana *et al.*, 2011).

Lixiviación

Es un proceso de transporte de nitrógeno, considerando que el ión NO_3^- es un anión y que no puede ser retenido por las arcillas como ocurre con los cationes del suelo (NH_4^+ , Ca_2^+ , K^+ , Na^+), es fácilmente transportado por el agua. Las pérdidas de N por este medio pueden variar de 0 hasta el 40%. Estas pérdidas son favorecidas bajo láminas de riego excesivas, suelo arenoso y aplicaciones altas de nitrógeno en etapas tempranas del cultivo (Castellanos *et al.*, 2000).

Desnitrificación

La desnitrificación es un proceso anaeróbico que lo llevan a cabo bacterias principalmente, algunos hongos y levaduras, consiste en la reducción

microbiana de nitrato o nitrito a óxido nitroso (N_2O) o nitrógeno elemental (Van Spanning *et al.*, 2005).

3.2.2. Nitrógeno en el suelo

La mayoría del nitrógeno total de los suelos (85-95%) se encuentra formando parte de la materia orgánica, en donde una gran proporción no está disponible de inmediato para ser utilizado por las plantas, debiendo de sufrir la mineralización por parte de los microorganismos del suelo para ser transformado a formas disponibles. Algunos de los factores que más inciden en la tasa de mineralización son la humedad y temperatura del suelo, aunque existen otras condiciones que también influyen como pueden ser las propiedades físicas y químicas del suelo, las prácticas de manejo o la presencia de otros nutrientes (Tisdale *et al.*, 1999).

Solo una fracción del N se encuentra en diversas formas inorgánicas (N_2O , NO , NH_3 , NO_2^- , NH_4^+ y NO_3^-), de las cuales el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) son aprovechables por las plantas (White, 2006). La absorción de nitrato y amonio varía conforme la especie, variedad, temperatura, pH e intensidad lumínica (Coraspe *et al.*, 2009).

3.2.3. Nitrógeno en sistemas agroforestales

La mejora del suelo en los SAF está vinculada al crecimiento de árboles que fijen nitrógeno o árboles y arbustos de raíces profundas que aumenten la disponibilidad de nitrógeno por medio de la fijación biológica, el reciclado de nutrientes de la planta desde la profundidad y la formación de materia orgánica para el suelo (Beer *et al.*, 1998).

La presencia de árboles favorece los sistemas de producción en aspectos tales como el mantenimiento del reciclaje de nutrientes y el aumento en la diversidad

de productos. La búsqueda de sostenibilidad ecológica y de conservación de la biodiversidad, ambas basadas en perspectivas a largo plazo, hacen que los árboles sean atractivos. Los efectos benéficos de los árboles sobre la fertilidad de los suelos pueden influir tanto en una mejora en la estructura del suelo como aumentos en la disponibilidad de nutrimentos. Estos efectos de los árboles sobre los suelos son consecuencia de la materia orgánica obtenida por medio de: 1) la hojarasca y las podas, y 2) la descomposición de raíces (Montagnini, 1992).

Los árboles a través de su sistema radicular profundo, pueden absorber nutrientes de zonas más profundas, donde no llega el área radicular de los cultivos. Los nutrientes, almacenados en raíces, troncos, ramas y hojas al descomponerse son liberados al suelo para ser tomados por los cultivos. De esa manera, otros nutrientes como fósforo, potasio, calcio y magnesio pueden aumentar sus concentraciones en la capa arable del suelo (Alegre and Rao, 1996).

La importancia de la caída de las hojas y renovación de raíces en el ciclo de los nutrientes consiste en que el retorno de la materia orgánica constituye el principal proceso de transferencia de nutrientes al suelo y puede llegar a ser de más de 90% del nitrógeno absorbido por las plantas (Chapin *et al.*, 2002). La importancia de la producción de los residuos vegetales en el ciclo del N, depende del tipo de especies involucradas en dichos sistemas y de su manejo, principalmente las podas. De manera que los procesos de transferencia del N dentro del ecosistema se basan en la producción de residuos y su descomposición (fragmentación, mineralización y humificación) y el paso del N con el agua a través del suelo (Baca *et al.*, 2000).

Kaur *et al.* (2000) analizaron el papel de los sistemas agroforestales en la mejora del estado de la materia orgánica del suelo, actividad microbiana y la disponibilidad de nitrógeno. Concluyeron que la integración de árboles con

cultivos mejoró la productividad y la fertilidad de los suelos moderadamente alcalinos. Los sistemas agroforestales mejoran las condiciones del suelo mediante el aumento total de la materia orgánica del suelo, la disponibilidad de N así como la actividad biológica después de 6-7 años de crecimiento de los árboles. La caída de hojas de diferentes especies activa la participación de los artrópodos, la descomposición, reciclaje y retención de nutrientes, contribuyendo a conservar la estructura y funcionamiento de los ecosistemas y agroecosistemas, la flora, la fauna silvestre, la retención de humedad, la producción y productividad primaria neta, así como su estabilidad dinámica (Xu and Hirata, 2005; Vargas-Parra y Varela, 2007).

3.2.4. Impacto ambiental

Los problemas ambientales causados por el nitrógeno están principalmente asociados con el movimiento del nitrato a través de las aguas de drenaje a las aguas subterráneas. Puede llegar a pozos de agua y también de las aguas subterráneas y por flujo, a superficies de agua como riachuelos, lagos y estuarios. El nitrato puede contaminar el agua de bebida y causar eutrofización. Otro problema asociado a efectos tóxicos del nitrato es el síndrome del niño azul. El nitrito interfiere con la capacidad de la sangre de transportar oxígeno a las células del cuerpo. Este fenómeno ocurre cuando hay altas concentraciones de nitrato en el agua de bebida (Plasencia y Corbella, 2014).

El nitrógeno también puede perderse a la atmósfera, cuando el ión nitrato es convertido a formas de nitrógeno gaseosas por una serie de reacciones bioquímicas de reducción (desnitrificación). Esto ocurre principalmente en condiciones de anaerobiosis pudiendo llegar a ser el producto final, en condiciones muy extremas, el gas de nitrógeno diatómico (N_2). Los óxidos de nitrógeno son gases muy reactivos: el N_2O y NO liberados a la atmósfera por desnitrificación pueden contribuir a la formación de ácido nítrico, uno de los principales componentes de la lluvia ácida o como NO contribuir a incrementar

el efecto invernadero o calentamiento de la superficie terrestre (Plasencia y Corbella, 2014).

3.3. Relación Carbono/Nitrógeno

El carbono se incorpora a la biomasa de las plantas a partir del CO₂ atmosférico, por medio de la fotosíntesis, mientras que el N puede ser absorbido del suelo o bien en algunas plantas, ser fijado biológicamente a partir del N₂ atmosférico (Porta *et al.*, 2003). La relación C/N es un indicador útil del grado de descomposición de la materia orgánica de los suelos (Buol *et al.*, 2004). López y López (1990) mencionan que la relación C/N es un índice de la salud del suelo, pues las concentraciones de ellos nos indicarán la riqueza del terreno.

La relación C/N, determina la tasa a la cual el nitrógeno está disponible para las plantas, por lo que se puede utilizar como indicador de calidad de la materia orgánica de medios aerobios, si sólo se atiende a la facilidad de descomposición (Porta *et al.*, 2003).

El cambio de un suelo a dominancia de formas orgánicas o inorgánicas de N depende principalmente por la relación C/N de la materia orgánica que se está descomponiendo. En forma general, una relación C/N baja tiende a favorecer la mineralización, en tanto que relaciones mayores de 25 conducen a una lenta mineralización o bien a la inmovilización del N (Bertsch, 1995). Fuentes (1999), explica que la transformación de los compuestos carbonados suministra energía para que proliferen los propios microorganismos encargados de transformarla, de modo que cuando la proporción de carbono con relación al nitrógeno es grande, una gran parte del nitrógeno transformado es utilizado por los microorganismos para sintetizar su propia proteína con lo cual hay poca producción de nitrógeno amoniacal que pasa al suelo. Para que si libere el nitrógeno amoniacal es preciso que la relación C/N de la materia orgánica sea

inferior a 20. Cuando dicha relación es mayor a 30 no se libera nitrógeno amoniacal o se libera muy poca cantidad.

Cuando la relación C/N es alta, el aporte de materia orgánica no es aprovechable por las plantas, ya que las bacterias y los microorganismos que actúan en el proceso de descomposición de la misma, consumen el poco nitrógeno que dispone el suelo. La actividad de los organismos de descomposición es intensa y eleva la demanda de nitrógeno, ya que necesitarán de mayores cantidades de N en el proceso de descomponer los materiales ricos en carbono, además de alejar al nitrógeno de las plantas que lo necesitan e impedir su disponibilidad. Se genera una competencia entre los diferentes organismos del suelo y también entre éstos y las plantas superiores (Palma *et al.*, 2000). Cuanto menor es la relación, mayor es la velocidad de descomposición (Jafari *et al.*, 2011).

Navarro y Navarro (2003) dan a conocer que los residuos orgánicos con una relación C/N baja por lo general contienen bastante nitrógeno para poder satisfacer necesidades de microorganismos degradantes. A medida que los residuos se descomponen habrá nitrógeno en exceso con relación al que necesitan, el cual se liberará como amoníaco. Las plantas superiores podrán utilizar el nitrógeno a medida que transcurre la descomposición. Los mismos autores mencionan que por el contrario, si se incorporan restos con una relación C/N alto, el nitrógeno desaparecerá prácticamente del suelo al ser utilizado exclusivamente por los microorganismos; y las plantas en suelos en estas condiciones, serán deficientes en nitrógeno. Recomiendan que para evitar estas situaciones, se debe suministrar nitrógeno de alguna otra fuente para satisfacer las necesidades de los microorganismos y acortar el periodo de la depresión. Los hechos expuestos son de gran importancia práctica y deben ser considerados cuando los residuos orgánicos se añaden al suelo.

3.4. Sistemas agroforestales con café

En México, el café ocupa una superficie de 664,794 ha y 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), la superficie de café orgánico es de 66,390 ha (Rosas *et al.*, 2008). México aporta el 66% del total mundial con una producción de 47,461 t de café orgánico en 2002 (Escamilla *et al.*, 2005).

Las áreas cultivadas con café en México se localizan en regiones que originalmente fueron cubiertas por selvas tropicales húmedas y bosques mesófilos (Moguel y Toledo, 2004).

Existe un gradiente de cinco principales modalidades de producción de café (Figura 3), que van desde los dos sistemas tradicionales con sombra diversificada (de montaña o rusticano) y con árboles de la vegetación original (policultivo tradicional), 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; Escamilla y Díaz, 2002).

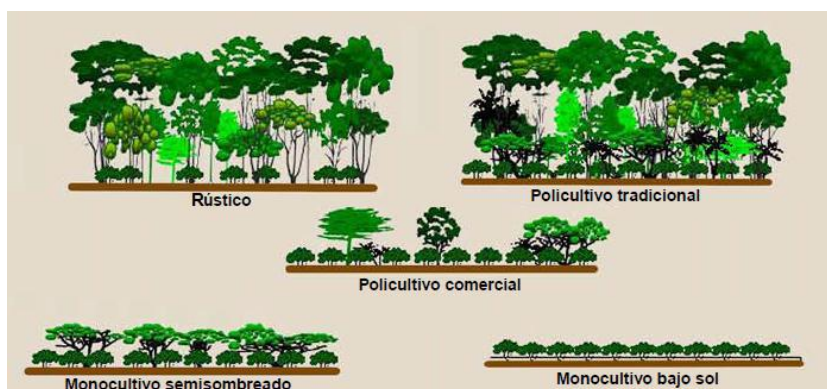


Figura 3. Modalidades de producción de café (Moguel y Toledo, 2004).

3.4.1. Cafetal tradicional o rusticano

El cafetal tradicional o rusticano es aquel que conserva una gran cantidad de árboles nativos, pero se han ido introduciendo árboles del género *Inga* (Moguel y Toledo, 1999). Este sistema es muy importante en Guerrero y Chiapas.

Las plantaciones rusticas de café se caracterizan por el uso de numerosas especies de árboles silvestres y cultivadas, para proveer de sombra a los arbustos de café (Bandeira *et al.*, 2005). Moguel y Toledo (1999), mencionan que otras de las características del sistema rústico de café es el uso bajo o nulo de agroquímicos y labores agrícolas mínimas (sólo algunas podas ocasionales en café y eliminación de arbustos del dosel bajo). El 60% de los cafetales del país se manejan bajo el sistema rusticano y policultivo tradicional.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la comunidad La Fraylesca, localizada en el municipio de Villa Corzo, estado de Chiapas (Figura 4). Se encuentra situada a 50 km de la cabecera municipal. Geográficamente se ubica entre las coordenadas 93° 23' 54.82" de longitud oeste y 15° 59' 59.42" de latitud norte. La altitud a la que se encuentra es de 820 msnm (INEGI, 2014). Pertenece al Área de Protección de Recursos Naturales "La Frailescana".

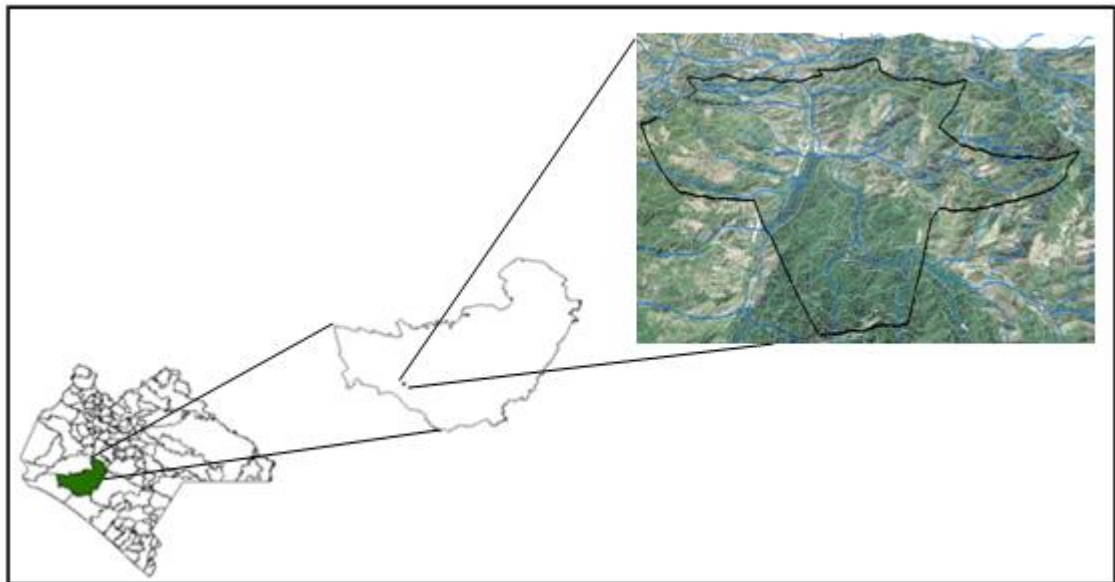


Figura 4. Localización de la comunidad La Fraylesca.

De acuerdo con García (1988), el clima es $Aw_2(w)ig$, cálido subhúmedo con régimen de lluvias en verano, porcentaje de precipitación invernal menor de 5, temperatura media anual de 22 °C y del mes más frío de 18 °C, oscilación anual de las temperaturas medias mensuales isotermal y marcha anual de la

temperatura tipo Ganges (mes más caliente antes del solsticio de verano). Enero es el mes más frío con una temperatura de 21.65 y el mes más caliente es mayo con una temperatura de 25.8. La precipitación anual es de 1425.8 mm, la precipitación del mes más seco es de 0.1 mm y se presenta en el mes de enero; la precipitación del mes más lluvioso es de 342.3 mm en el mes de septiembre.

El tipo de suelo dominante es de tipo Cambisol. En cuanto a la hidrografía, en la comunidad se da la unión de dos corrientes de agua intermitente a una corriente principal de agua perenne denominada arroyo “La Alianza”. Pertenece a la cuenca hidrológica Río Grijalva y a la subcuenca río Santo Domingo; se ubica en la provincia fisiográfica Cordillera Centroamericana y en la subprovincia fisiográfica Sierras del Sur de Chiapas. El área está constituida en su totalidad por rocas ígneas intrusivas (INEGI, 2014).

Cuenta con 259 habitantes, de los cuales 117 son hombres y 142 mujeres (INEGI, 2010). La tenencia de la tierra es de tipo ejidal, siendo un total de 45 ejidatarios. Dentro del área de estudio se presentan las comunidades vegetales de: agricultura de temporal con cultivos anuales, entre los que destacan maíz y frijol (INEGI, 2011) y selva media subcaducifolia (Rzedowski, 2006).

4.2. Descripción de los sistemas

El estudio se realizó en dos sistemas agroforestales (SAF) cafetaleros de diferente edad (maduro y nuevo) y en el sistema natural (Cuadro 1 y Figura 5).

Cuadro 1. Identificación de los sistemas evaluados en la comunidad La Fraylesca.

Nombre del sistema	Clave de identificación	Superficie (ha)	Año de establecimiento
SAF Maduro	SAM	0.5	1965
SAF Nuevo	SAN	0.5	2013
Sistema Natural	SN	2	1950

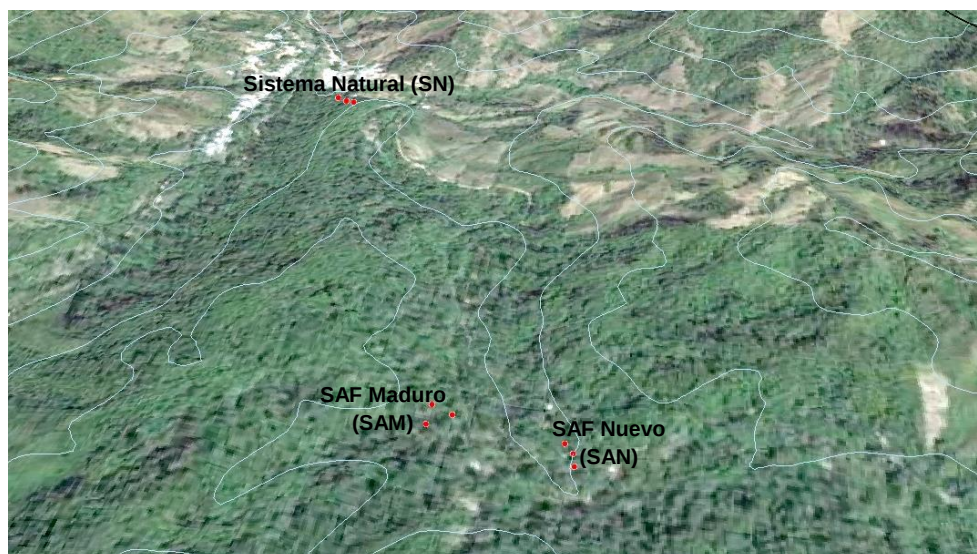


Figura 5. Localización de los tres sistemas evaluados en la comunidad La Fraylesca.

4.2.1. Sistema agroforestal maduro (SAM)

Este sistema agroforestal se estableció hace aproximadamente 50 años; la superficie es de 0.5 ha. Es de tipo rusticano o de montaña con sombra de diferentes especies arbóreas. Los cafetos fueron establecidos eliminando árboles y arbustos para después ser sustituidos por plantas de café. Se realizan podas ocasionales cuando el productor así lo cree conveniente y dos veces al año realizan control de arvenses. La variedad de café existente en este SAF es Bourbón, distribuidas en un arreglo de 1.5 x 3 m. Los rendimientos son bajos, por lo que es usado solo para autoconsumo, la época de cosecha es de enero a febrero.

4.2.2. Sistema agroforestal nuevo (SAN)

Este sistema agroforestal se estableció en el año 2013; la superficie es de 0.5 ha. Es de tipo rusticano o de montaña con sombra de diferentes especies arbóreas. Los cafetos fueron establecidos eliminando árboles y arbustos para después ser sustituidos por plantas de café. Constantemente se realizan control

de arvenses y podas de los árboles y arbustos. La variedad de café existente en este SAF es Catimor distribuidas en un arreglo de 1.5 x 3 m.

4.2.3. Sistema natural (SN)

Se localiza entre las coordenadas 15°59'57.4" N y 93°24'25.84" W, con una superficie de 2 ha. Se pueden distinguir las siguientes especies arbóreas: Chaperla (*Lonchocarpus castilloi*), Copalchí (*Croton schiedeanus*), Cedro rojo (*Cedrela odorata*), 5 negritos (*Comocladia guatemalensis*), Pacaya (*Chamaedorea tepejilote*), Guarumbo (*Cecropia obtusifolia*), Matabuey (*Lonchocarpus rugosus*), Guanacastle (*Enterolobium cyclocarpum*), Caulote (*Guazuma ulmifolia*), Rabolagarto (*Zanthoxylum caribaeum*), Mata palo (*Ficus pertusa*), Caspirola (*Inga* sp.), Granadillo (*Dalbergia granaillo*), Roble (*Quercus* sp), Chumíz (*Chrysophyllum mexicanum*), Zapotillo (*Sideroxylon persimile*), Cascabillo (*Croton schiedeanus*), Guayabillo (*Calyptanthus venulosa*), Caspirola (*Inga fagifolia*), Palo de agua (*Calliandra houstoniana*), Hormiguillo (*Platymiscium dimorphandrum*), Mulato (*Bursera simaruba*), Malacate blanco (*Baccharis trinervis*), Jocote rayo (*Spondias* sp), Quebracho (*Celtis monoica*), Sarnocito (*Bursera* sp), Mujú (*Brosimum alicastrum*), matilisquate (*Tabebuia rosea*), entre otras.

4.3. Muestreo de suelo

Esta actividad se realizó en el mes de marzo del año 2015, que corresponde a la época seca del área de estudio. La metodología usada fue la recomendada por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2003), Etchevers *et al.* (2005), Carvajal *et al.* (2009), Soto-Pinto *et al.* (2010) y Noponen *et al.* (2013).

4.3.1. Delimitación de las unidades de muestreo

Con el uso de una plancheta dendrométrica se determinó la pendiente promedio del terreno en cada sistema. Usando cuerdas compensadas de 11.28 m se delimitaron tres unidades de muestreo (UM) distribuidas de manera aleatoria, comprendiendo una superficie de muestreo circular de 400 m² y con un GPS, marca Garmin modelo “e-trex”, se georreferenció el centro de las UM (Figura 6).



Figura 6. Delimitación y georreferenciación de las UM.

En el Cuadro 2 se presentan las coordenadas exactas así como la altitud de cada unidad de muestreo (UM).

Cuadro 2. Coordenadas de las unidades de muestreo.

UM	Coordenadas UTM ²		Altitud (m)
	X	Y	
SN-1	456397	1769019	823
SN-2	456374	1769037	813
SN-3	456342	1769080	834
SAM-1	456810	1767976	836
SAM-2	456775	1767987	836
SAM-3	456773	1767944	858
SAN-1	456995	1767951	844
SAN-2	457010	1767929	815
SAN-3	457014	1767901	831

²Universal Transversa de Mercator, Datum: WGS84

El muestreo se realizó en cada UM, por lo que se seleccionaron al azar tres puntos de muestreo en los cuales se tomaron muestras a tres profundidades: 0-10, 10-20 y 20-30 cm.

Para obtener las muestras primeramente se limpió la zona a muestrear, con barreta y pala se procedió a la apertura del pozo con dimensiones de 30x30 cm hasta llegar a una profundidad de 35 cm aproximadamente (Figura 7).



Figura 7. Apertura de pozo para muestreo.

En la pared donde se tuvo mínimo pisoteo al momento de la apertura, se midieron las profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm). Para extraer el suelo, se insertó la pala en la marca de 0-10 cm y con la barreta se rebano la sección correspondiente. Se prosiguió de la misma manera con las profundidades siguientes (Figura 8).



Figura 8. Extracción de suelo con pala en las profundidades de muestreo.

El suelo extraído con la pala se colocó en bolsas de plástico, identificadas con el nombre del sistemas, número de unidad de muestreo, repetición y profundidad (Figura 9).



Figura 9. Muestras colocadas en bolsas de plástico.

4.4. Secado de las muestras

Las muestras de suelo se secaron en el Laboratorio de Física del Departamento de Suelos. Cada muestra fue sacada de la bolsa y dispersada en papel estraza, y se dejaron secar al aire por 10 días (Figura 10).



Figura 10. Secado de las muestras.

El suelo seco se pasó por un tamiz de 2 mm, con el objeto de separar material grueso como piedras y restos orgánicos.

4.5. Determinación de las concentraciones de carbono y nitrógeno en el suelo

El porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS) (Anexo 1) se obtuvo mediante el procedimiento para la determinación de materia orgánica del suelo a través del método de Walkley y Black. La determinación del porcentaje de nitrógeno total (N-total) (Anexo 2) se realizó mediante el procedimiento semimicro-kjeldahl. Las concentraciones de nitrato y amonio (Anexo 3) se obtuvieron mediante extracción con KCl 2N y su destilación por arrastre de vapor según lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Para obtener la concentración del N-mineral, se sumaron las concentraciones de amonio y nitratos (Anexo 4); mientras que el N-orgánico se obtuvo por diferencia entre el N-total y el N-mineral (Anexo 5) (Cristóbal *et al.*, 2014).

4.6. Contenidos de carbono y nitrógeno en el suelo

Los contenidos de carbono y nitrógeno total en el suelo se calcularon a partir de los valores de %COS y %N-total, densidad aparente y profundidad del muestreo de la siguiente manera (Anexo 6 y 7):

$$COS(Mg\ ha^{-1}) = (\%CO)(\rho b)(Prof)$$

$$N - total\ (Mg\ ha^{-1}) = (\%N - total)(\rho b)(Prof)$$

Donde:

%CO= Porcentaje de COS

%N-total= Porcentaje de nitrógeno total

ρb = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Prof = Profundidad de la capa de suelo muestreada (cm)

Para la determinación del contenido de N-orgánico se usó la misma fórmula que en N-total (Anexo 8). En el caso de N-mineral, amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-) para poder determinar los contenidos se realizaron los cálculos correspondientes para la conversión de unidades y así las concentraciones también fueran expresadas en porcentaje. Para amonio y nitratos se usó la fórmula siguiente (Anexo 9):

$$NH_4^+(kg\ ha^{-1}) = (\%NH_4^+)(\rho b)(Prof)(1000)$$

$$NO_3^-(kg\ ha^{-1}) = (\%NO_3^-)(\rho b)(Prof)(1000)$$

Donde:

% NH_4^+ = Porcentaje de amonio

% NO_3^- = Porcentaje de nitratos

ρb = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Prof = Profundidad de la capa de suelo muestreada (cm)

Para obtener el contenido de N-mineral se sumaron los contenidos de amonio y nitratos (Anexo 10). El parámetro de densidad aparente se obtuvo mediante el método de la probeta (Anexo 11).

4.7. Relación carbono/nitrógeno

La relación carbono/nitrógeno (C/N), se obtuvo de la siguiente manera (Carvajal *et al.*, 2009; De Alcántara *et al.*, 2014) (Anexo 12):

$$C/N = \frac{\%COS}{\%N_{total}}$$

4.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados conforme a un experimento con diseño completamente al azar. El modelo estadístico correspondiente fue:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = valor de la respuesta de la j-ésima replicación del i-ésimo tratamiento

μ = media general

τ_i = Efecto del tratamiento (sistema y/o profundidad)

ε_{ij} = errores aleatorios

El análisis se realizó utilizando el software estadístico SAS. Se realizaron pruebas de comparaciones múltiples de medias por el método de Tukey para determinar diferencias significativas entre los 3 sistemas y entre las 3 profundidades de suelo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Carbono Orgánico del Suelo (COS)

5.1.1. Concentración en las tres profundidades

Los resultados presentados en las gráficas muestran el comportamiento del porcentaje de COS en cada uno de los sistemas (Figura 11 (a), (b) y (c)). El porcentaje de COS en todos los sistemas fue mayor en la capa de 0-10 cm y disminuyó a medida que la profundidad aumentó. Esta tendencia coincidió con lo reportado por Masuhara (2012), quien encontró una disminución en la concentración de COS conforme aumentó la profundidad de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, en cafetales. De acuerdo con Power (2004), la mayoría de las diferencias marcadas en el COS ocurren en la capa superior del suelo y en las capas más profundas del suelo es más estable.

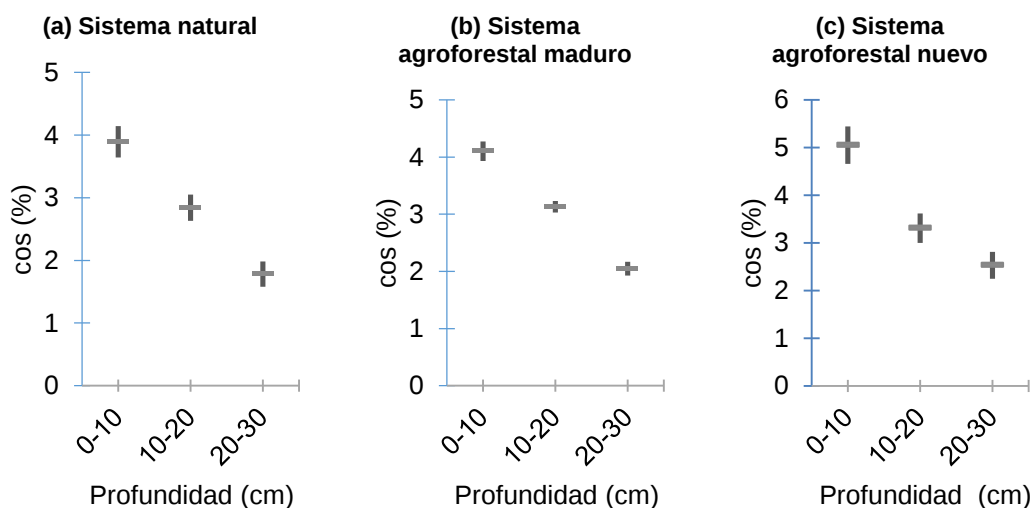


Figura 11 (a), (b) y (c). Comportamiento del carbono orgánico en los sistemas.

En el sistema natural y el SAF maduro las tres profundidades difirieron estadísticamente, mientras que en el SAF nuevo la profundidad de 0-10 cm presentó diferencia estadística significativa en comparación con las otras dos profundidades (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentaje de COS en las tres profundidades.

Sistema	Profundidad (cm)	COS* (%)	Error Estándar
Sistema natural	0-10	3.89a	0.25
	10-20	2.84b	0.21
	20-30	1.78c	0.20
Sistema agroforestal maduro	0-10	4.10a	0.17
	10-20	3.13b	0.10
	20-30	2.05c	0.12
Sistema agroforestal nuevo	0-10	5.05a	0.39
	10-20	3.31b	0.31
	20-30	2.53b	0.28

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Alvarado *et al.* (2013) afirmaron que el incremento del COS en la superficie se debe principalmente a la distribución y actividad de las raíces finas, además de la caída de hojarasca. Siendo las raíces finas las más eficientes en absorción de agua y nutrientes, cuya disponibilidad es mayor en los estratos más superficiales (Claus and George, 2005). De igual forma, Kimmins (2004) menciona que las raíces de la mayoría de especies herbáceas y leñosas se encuentran en horizontes superficiales del suelo.

5.1.2. Concentración en los tres sistemas

El sistema que presentó el mayor porcentaje de COS en las tres profundidades fue SAN, pero solo mostró diferencia estadística significativa con SN en las profundidades 0-10 y 20-30 cm (Cuadro 4), reafirmando que el manejo en los SAF's, así como la distribución y actividad de las raíces finas en la capa superficial (0-10 cm) tuvieron un efecto positivo sobre la concentración de COS.

Cuadro 4. Porcentaje de COS en los tres sistemas.

Profundidad (cm)	Sistema ^z	COS* (%)	Error estándar
0-10	SN	3.89a	0.25
	SAM	4.10ab	0.17
	SAN	5.05b	0.39
10-20	SN	2.84a	0.21
	SAM	3.13a	0.10
	SAN	3.31a	0.31
20-30	SN	1.78a	0.20
	SAM	2.05ab	0.12
	SAN	2.53b	0.28

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

La concentración en la profundidad de 0-30 cm, en el sistema natural (SN) fue de $2.84 \pm 0.16\%$, de $3.09 \pm 0.11\%$ en el SAF maduro (SAM) y de $3.63 \pm 0.24\%$ en el SAF nuevo (SAN); estadísticamente solo hubo diferencias entre SN y SAN (Figura 12). Estos resultados son inferiores a lo reportado por Romero *et al.* (2002) quienes encontraron una concentración de 6% en la profundidad de 0-30 cm en un sistema agroforestal cafetalero rusticano en Chiapas. González *et al.* (2008) y Masuhara (2012) reportaron concentraciones similares a las de esta investigación.

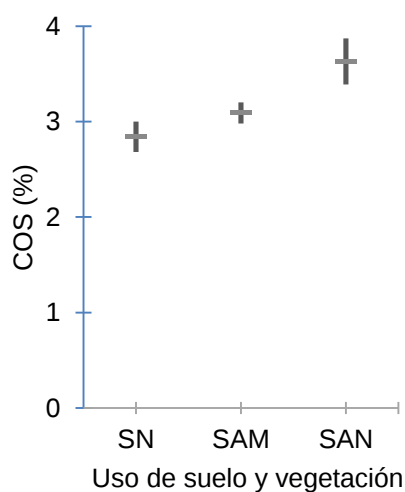


Figura 12. Concentración de COS en los tres sistemas.

5.1.3. Contenido en las tres profundidades

La profundidad del suelo influyó sobre el contenido de COS, pues la mayor cantidad se encontró dentro de los primeros 10 cm y disminuyó conforme aumentó la profundidad, observándose este patrón en los tres sistemas (Figura 13); coincidiendo con lo reportado por Masuhara (2012) y De la Cruz (2015) quienes encontraron que en la profundidad de 0-10 cm se encuentra la mayor cantidad de COS y disminuye conforme se incrementa la profundidad (10-20 y 20-30 cm).

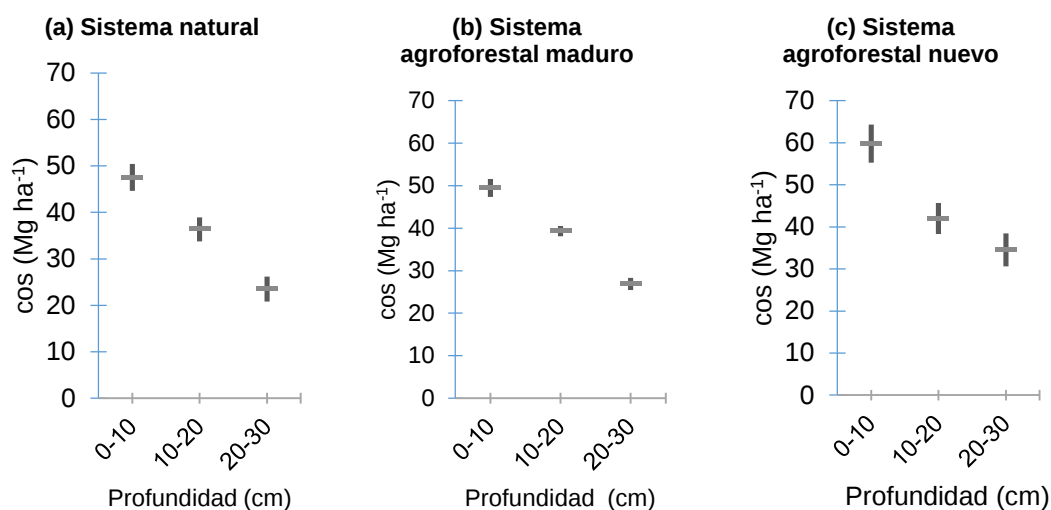


Figura 13 (a), (b) y (c). Comportamiento del contenido de COS en las tres profundidades.

En el sistema natural y el SAF maduro, los contenidos en las tres profundidades fueron estadísticamente diferentes, en el SAF nuevo la profundidad 0-10 cm presentó diferencias estadísticas significativas con respecto a las otras dos profundidades (Cuadro 5).

Cuadro 5. Contenido de COS en las tres profundidades.

Sistema	Profundidad (cm)	COS* (Mg ha ⁻¹)	Error Estándar
Sistema natural	0-10	47.52a	2.9
	10-20	36.34b	2.6
	20-30	23.47c	2.69
Sistema agroforestal maduro	0-10	49.44a	2.1
	10-20	39.30b	1.23
	20-30	26.90c	1.42
Sistema agroforestal nuevo	0-10	59.81a	4.52
	10-20	42b	3.68
	20-30	34.52b	3.94

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

5.1.4. Contenido en los tres sistemas

Al comparar los sistemas en la misma profundidad, en las tres profundidades SAN presentó el mayor contenido de COS y SN registró los datos menores, aunque estadísticamente estos sistemas solo difirieron en las profundidades 0-10 y 20-30 cm (Cuadro 6). El análisis de los sistemas en tres profundidades, corroboraron que en los SAF's la incorporación de residuos provenientes de las podas, además del ingreso natural al suelo de follaje, ramas y troncos generaron un mayor aporte de materia orgánica al suelo, además de la distribución y actividad de las raíces finas en la capa superficial (0-10 cm) dando como resultado un efecto positivo sobre el contenido de COS.

Cuadro 6. Contenido de COS en los tres sistemas.

Profundidad (cm)	Sistema ^z	COS* (Mg ha ⁻¹)	Error Estándar
0-10	SN	47.52a	2.9
	SAM	49.44ab	2.1
	SAN	59.81b	4.52
10-20	SN	36.34a	2.6
	SAM	39.30a	1.23
	SAN	42a	3.68
20-30	SN	23.47a	2.69
	SAM	26.90ab	1.42
	SAN	34.52b	3.94

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Al sumar los contenidos de carbono orgánico de las tres profundidades se encontró que el SAF nuevo (SAN) es el que tuvo el mayor reservorio de carbono con $136.33 \pm 9.01 \text{ Mg ha}^{-1}$, le siguió el SAF maduro (SAM) reportando $115.65 \pm 3.99 \text{ Mg ha}^{-1}$, pero estadísticamente no difirieron. El sistema natural (SN) obtuvo el menor contenido ($107.33 \pm 6.1 \text{ Mg ha}^{-1}$) difiriendo estadísticamente con el SAF nuevo. El comportamiento de los sistemas en relación a su contenido se puede observar en la Figura 14.

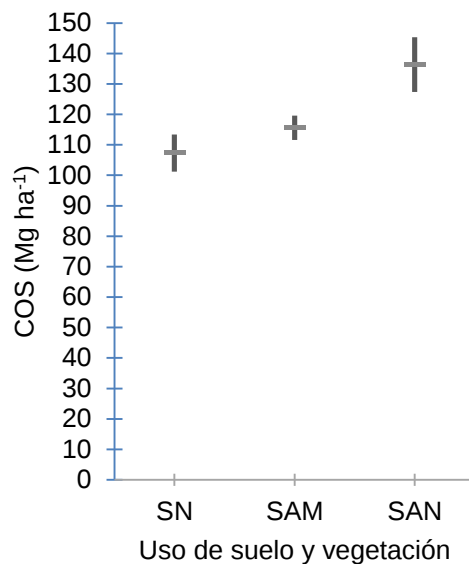


Figura 14. Contenido de COS en los tres sistemas.

Los contenidos de COS obtenidos en los sistemas SAM y SAN son parecidos a los encontrados por Soto-Pinto *et al.* (2010) en un estudio realizado en Chiapas, quienes reportaron contenidos de 112 Mg ha^{-1} y 135 Mg ha^{-1} de COS para dos SAF cafetaleros en la profundidad de 0-30 cm. Los mismos autores observaron una disminución del contenido de COS conforme aumentó la profundidad de 0-10, 10-20 y 20-30 cm. El contenido de COS obtenido en el sistema natural es parecido con lo reportado por Segura *et al.* (2005) en selvas (110.5 Mg ha^{-1}).

Factores como las condiciones físicas y biológicas del suelo y la historia de las entradas de material orgánico a los suelos pueden determinar las tasas de

cambio de carbono orgánico cuando la vegetación y las prácticas de manejo han cambiado (Post y Kwon, 2000). El alto contenido de COS total en los SAF puede ser atribuido a la incorporación de residuos provenientes de las podas, además de manera natural hay ingreso al suelo de follaje, ramas, troncos y raíces, de los árboles, arbustos y herbáceas, lo que genera un mayor aporte de materia orgánica al suelo. Además es importante mencionar que en SAN los árboles y arbustos eliminados antes del establecimiento del SAF fueron incorporados al suelo, lo cual explica que en este sistema se encuentre la mayor concentración y contenido de COS.

5.2. Nitrógeno

5.2.1. Nitrógeno total (N-total) y orgánico (N-orgánico)

Concentración en las tres profundidades

La concentración de N-total disminuyó conforme aumentó la profundidad, esta tendencia se observó en los tres sistemas estudiados (Figura 15 (a), (b) y (c)), coincidiendo con lo reportado por Dong *et al.* (2009), Du *et al.* (2010), Batsile *et al.* (2014) y Zhang *et al.* (2014). De acuerdo con Benintende *et al.* (2008), el N-total puede disminuir hasta un 80% a medida que se incrementa la profundidad, independientemente del tipo de manejo, debido a que la capa superficial es la más influenciada por las adiciones de N derivadas de los residuos orgánicos que se incorporan o de las fertilizaciones.

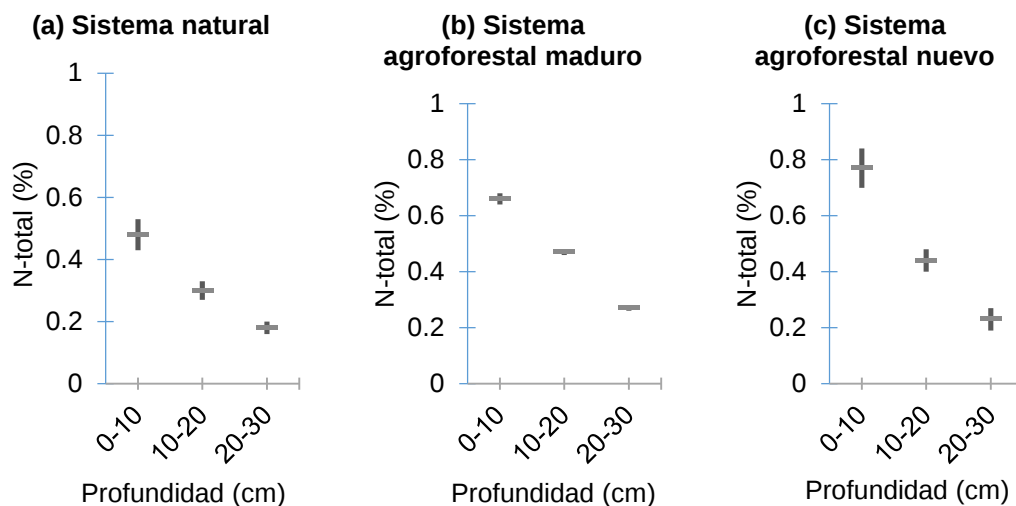


Figura 15 (a), (b) y (c). Comportamiento de la concentración de N-total en las tres profundidades.

La misma tendencia, de disminuir conforme aumentó la profundidad se presentó en el N-orgánico. El cual representó más del 95% del N-total (Figura 16 (a), (b) y (c)).

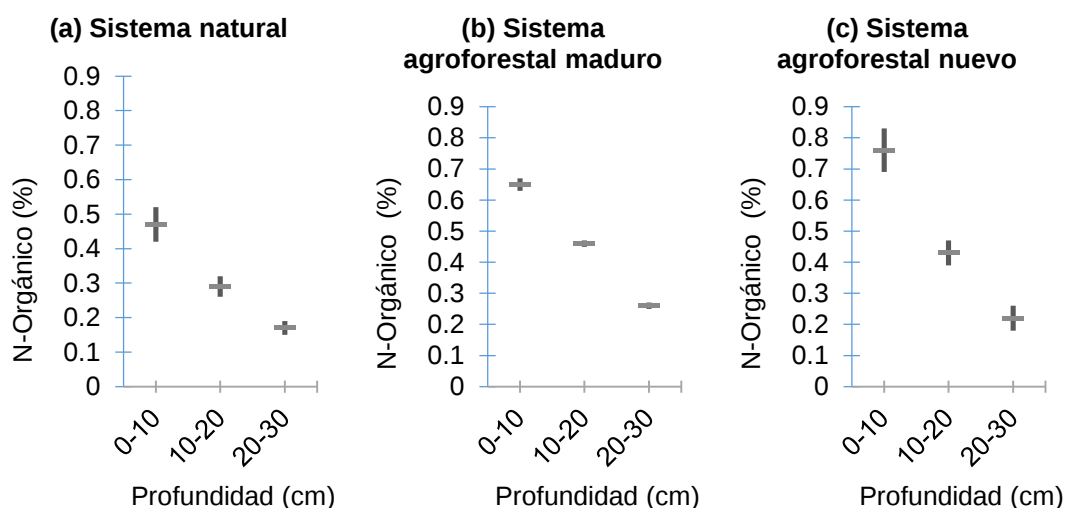


Figura 16 (a), (b) y (c). Comportamiento de la concentración de N-orgánico en las tres profundidades

En el sistema natural, tanto en el porcentaje de N-total y orgánico, la capa superficial difirió estadísticamente en relación a las otras dos profundidades, mientras que en los sistemas agroforestales maduro y nuevo, las tres profundidades difirieron estadísticamente (Cuadro 7).

Cuadro 7. Concentración del N-total y N-orgánico en las tres profundidades.

Sistema	Profundidad (cm)	N-total* (%)	Error Estándar	N-orgánico* (%)	Error Estándar
Sistema natural	0-10	0.48a	0.05	0.47a	0.05
	10-20	0.30b	0.03	0.29b	0.03
	20-30	0.18b	0.02	0.17b	0.02
Sistema agroforestal maduro	0-10	0.66a	0.02	0.65a	0.02
	10-20	0.47b	0.01	0.46b	0.01
	20-30	0.27c	0.01	0.26c	0.01
Sistema agroforestal nuevo	0-10	0.77a	0.07	0.76a	0.07
	10-20	0.44b	0.04	0.43b	0.04
	20-30	0.23c	0.04	0.22c	0.04

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Resultados similares fueron reportados por Vergara y Etchevers (2006) en el sistema muro vivo de café intercalado con maíz o con frijol (MFVCAFÉ) en profundidades de 0-20 y 20-40 cm.

Concentración en los tres sistemas

Al comparar los sistemas en la misma profundidad, el SAN obtuvo la mayor concentración de N-total y orgánico en la capa superficial, seguido por el SAM, pero no difirieron estadísticamente, no obstante ambos presentaron diferencias con SN. En la siguiente profundidad (10-20 cm) el SAM presentó la mayor concentración le siguió SAN pero no hubo diferencia significativa, el SN presentó la menor concentración difiriendo estadísticamente con los otros dos sistemas. En la capa 20-30 cm SAM obtuvo la mayor concentración y SN la menor, difiriendo estadísticamente (Cuadro 8). El análisis de la interacción de los sistemas en la misma profundidad, demostraron que la mayor concentración de N-total y N-orgánico está en los SAF's en la profundidad de 0-10 cm, debido a que esta capa fue la más influenciada por las adiciones de material vegetal.

Cuadro 8. Concentración de N-total y N-orgánico en los tres sistemas.

Profundidad (cm)	Sistema ^z	N-total* (%)	Error Estándar	N- orgánico* (%)	Error Estándar
0-10	SN	0.48a	0.05	0.47a	0.05
	SAM	0.66b	0.02	0.65b	0.02
	SAN	0.77b	0.07	0.76b	0.07
10-20	SN	0.30a	0.03	0.29a	0.03
	SAM	0.47b	0.01	0.46b	0.01
	SAN	0.44b	0.04	0.43b	0.04
20-30	SN	0.18a	0.02	0.17a	0.02
	SAM	0.27b	0.01	0.26b	0.01
	SAN	0.23ab	0.04	0.22ab	0.04

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

En el sistema natural (SN) la concentración promedio en la profundidad de 0-30 cm fue de $0.32 \pm 0.03\%$ de N-total y $0.31 \pm 0.03\%$ de N-orgánico, en el SAF maduro (SAM) fue de $0.47 \pm 0.01\%$ y $0.46 \pm 0.01\%$, mientras que en el SAF nuevo (SAN) fue de $0.48 \pm 0.05\%$ y $0.47 \pm 0.05\%$ de N-total y N-orgánico respectivamente. El sistema natural difirió estadísticamente con respecto a los otros sistemas tanto en las concentraciones de N-total como en las de N-orgánico (Figura 17 (a) y (b)).

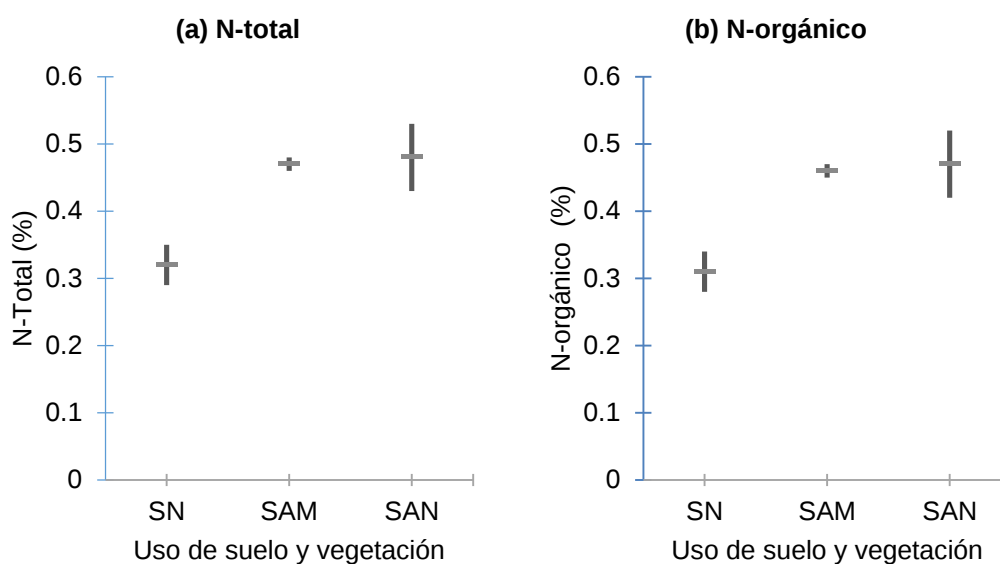
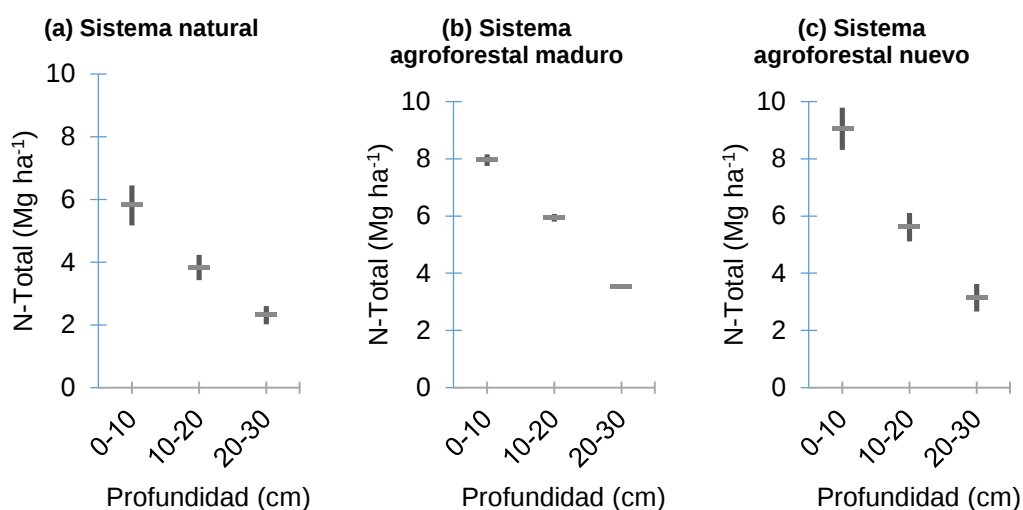


Figura 17 (a) y (b). Concentración de N-total y N-orgánico en los tres sistemas.

Resultados similares fueron reportados por Sadeghian (2011), quien encontró un porcentaje de N-total de 0.51 en cafetal tradicional. De forma semejante, Cardona y Sadeghian (2005), encontraron en 8 diferentes agroecosistemas de café una variación de 0.20 a 0.70% de N en cafetales bajo sombra. Gutiérrez *et al.* (2004) compararon la disponibilidad de nitrógeno en el suelo en sistemas cafetaleros bajo sombra de especies maderables, encontrando concentraciones de 0.50% hasta 0.57% de N-total.

Contenido en las tres profundidades

La profundidad del suelo influyó sobre el contenido de N-total y orgánico, ya que la mayor cantidad se encontró dentro de los primeros 10 cm y disminuyó conforme aumentó la profundidad, presentándose este patrón en los tres sistemas (Figura 18 (a), (b) y (c)). Esta disminución, según Schargel y Marvaez (2009), se debe a que el nitrógeno al igual que el carbono orgánico está vinculado a la materia orgánica, por ello su abundancia disminuye con la profundidad, ya que la disminución de la materia orgánica del suelo a mayores profundidades es notoria dado que la acumulación de restos orgánicos y la actividad de los microorganismos se da en los primeros centímetros del suelo.



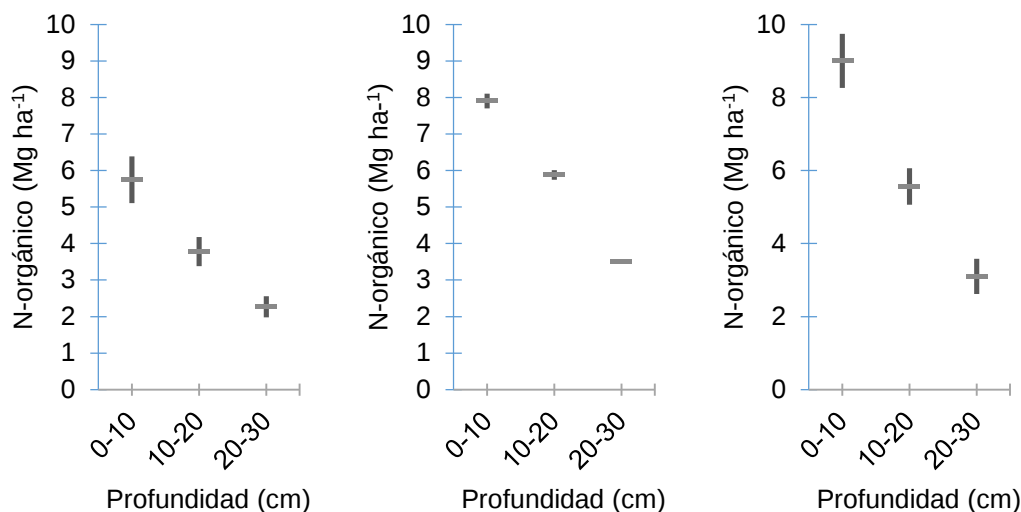


Figura 18 (a), (b) y (c). Comportamiento del contenido de N-total y N-orgánico en las tres profundidades.

En el sistema natural la capa superficial presentó diferencias estadísticamente significativas con respecto a las otras dos capas, las profundidades 10-20 y 20-30 cm no presentaron diferencias significativas entre ellas. En los dos sistemas agroforestales las tres profundidades difirieron estadísticamente (Cuadro 9).

Cuadro 9. Contenido de N-total y N- orgánico en las tres profundidades.

Sistema	Profundidad (cm)	N-total* (Mg ha ⁻¹)	Error Estándar	N-orgánico* (Mg ha ⁻¹)	Error Estándar
Sistema natural	0-10	5.81a	0.64	5.75a	0.64
	10-20	3.83b	0.4	3.78b	0.4
	20-30	2.31b	0.29	2.27b	0.29
Sistema agroforestal maduro	0-10	7.95a	0.2	7.9a	0.2
	10-20	5.94b	0.13	5.89b	0.13
	20-30	3.52c	0.07	3.48c	0.08
Sistema agroforestal nuevo	0-10	9.05a	0.74	8.99a	0.75
	10-20	5.61b	0.5	5.56b	0.5
	20-30	3.14c	0.48	3.1c	0.48

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Carvajal *et al.* (2009) compararon almacenamientos de C y N en diferentes usos del suelo incluyendo sistemas agroforestales cafetaleros y un sistema natural (selva), en los cuales observaron una disminución en el contenido de carbono y N-total conforme aumentó la profundidad (0-10, 10-20 y 20-30 cm), coincidiendo con lo reportado en este estudio.

Contenido en los tres sistemas

El SAN obtuvo el mayor contenido en la capa superficial (0-10 cm), seguido por el SAM pero no difirieron estadísticamente, ambos difirieron estadísticamente con el SN. En la siguiente profundidad (10-20 cm) SAM fue ligeramente mayor que SAN y no hubo diferencia significativa; por el contrario SN presentó la menor concentración difiriendo estadísticamente con los otros dos sistemas. En la capa 20-30 cm nuevamente SAM obtuvo la mayor concentración y SN la menor; existiendo diferencias estadísticas únicamente entre estos dos sistemas (Cuadro 10). Estos resultados corroboraron que en los SAF's la adición de material vegetal tiene un efecto positivo en la capa superficial, ya que la mayor acumulación de materia orgánica y la actividad de microorganismos se dan en los primeros centímetros del suelo.

Cuadro 10. Contenido de N-total y N-orgánico en los tres sistemas.

Profundidad (cm)	Sistema ^z	N-total* (Mg ha ⁻¹)	Error Estándar	N- orgánico* (Mg ha ⁻¹)	Error Estándar
0-10	SN	5.81a	0.64	5.75a	0.64
	SAM	7.95b	0.2	7.9b	0.2
	SAN	9.05b	0.74	8.99b	0.75
10-20	SN	3.83a	0.4	3.78a	0.4
	SAM	5.94b	0.13	5.89b	0.13
	SAN	5.61b	0.5	5.56b	0.5
20-30	SN	2.31a	0.29	2.27a	0.29
	SAM	3.52b	0.07	3.48b	0.08
	SAN	3.14ab	0.48	3.1ab	0.48

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Al sumar los contenidos en una profundidad de 0-30 cm, los sistemas agroforestales nuevo y maduro (SAN y SAM) reportaron datos muy parecidos y estadísticamente no difirieron. El sistema natural (SN) registró el contenido más bajo difiriendo estadísticamente con ambos sistemas agroforestales (Cuadro 11 y Figura 19).

Cuadro 11. Contenido de N-total y N-orgánico en los tres sistemas en la profundidad de 0-30 cm.

Sistema	N-total (Mg ha ⁻¹)*	Error Estándar	N-orgánico (Mg ha ⁻¹)*	Error Estándar
Sistema natural	11.97a	1.07	11.8a	1.07
Sistema agroforestal maduro	17.42b	0.3	17.27b	0.3
Sistema agroforestal nuevo	17.81b	1.59	17.65b	1.6

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

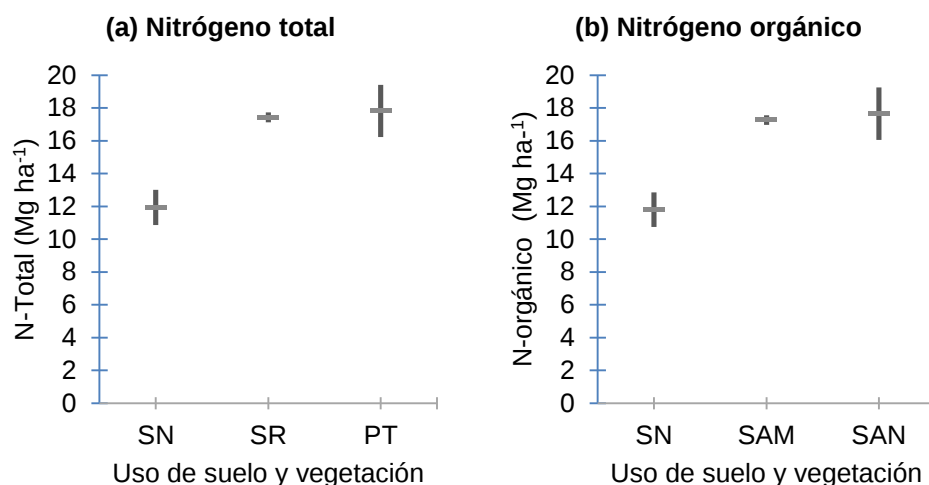


Figura 19 (a) y (b). Contenido de N-total y orgánico en los tres sistemas.

Amorim *et al.* (2013) reportaron un contenido de N-total de 10.15 Mg ha⁻¹ en un sistema natural, siendo este dato parecido a lo encontrado en el SN del presente estudio, en la agricultura tradicional reporta un contenido de 13.16 Mg ha⁻¹; así también observó que este disminuye conforme aumenta la profundidad. Carvajal *et al.* (2009) encontraron 10.41 Mg ha⁻¹ de N-total en selva y 6.65 Mg ha⁻¹ en cafetal, difiriendo con lo encontrado en este estudio, ya que el mayor contenido se obtuvo en los SAF cafetaleros.

5.2.2. Amonio (NH₄⁺), nitratos (NO₃⁻) y nitrógeno mineral (N-min)

Concentración en las tres profundidades

El amonio y nitratos al igual que el N-total tendieron a disminuir conforme aumentó la profundidad (Figura 20), coincidiendo con lo reportado por Avilés *et*

al. (2011). La disminución de amonio y nitratos conforme aumenta la profundidad se debe a que existen mecanismos de retención en estos suelos que impiden que haya pérdidas mediante el proceso de lixiviación. Los árboles pueden afectar el nivel de nutrientes del suelo al explotar las reservas minerales más profundas, recuperando los lixiviados y depositándolos sobre la superficie, con lo cual se disminuye la pérdida de nutrientes (Altieri, 1999).

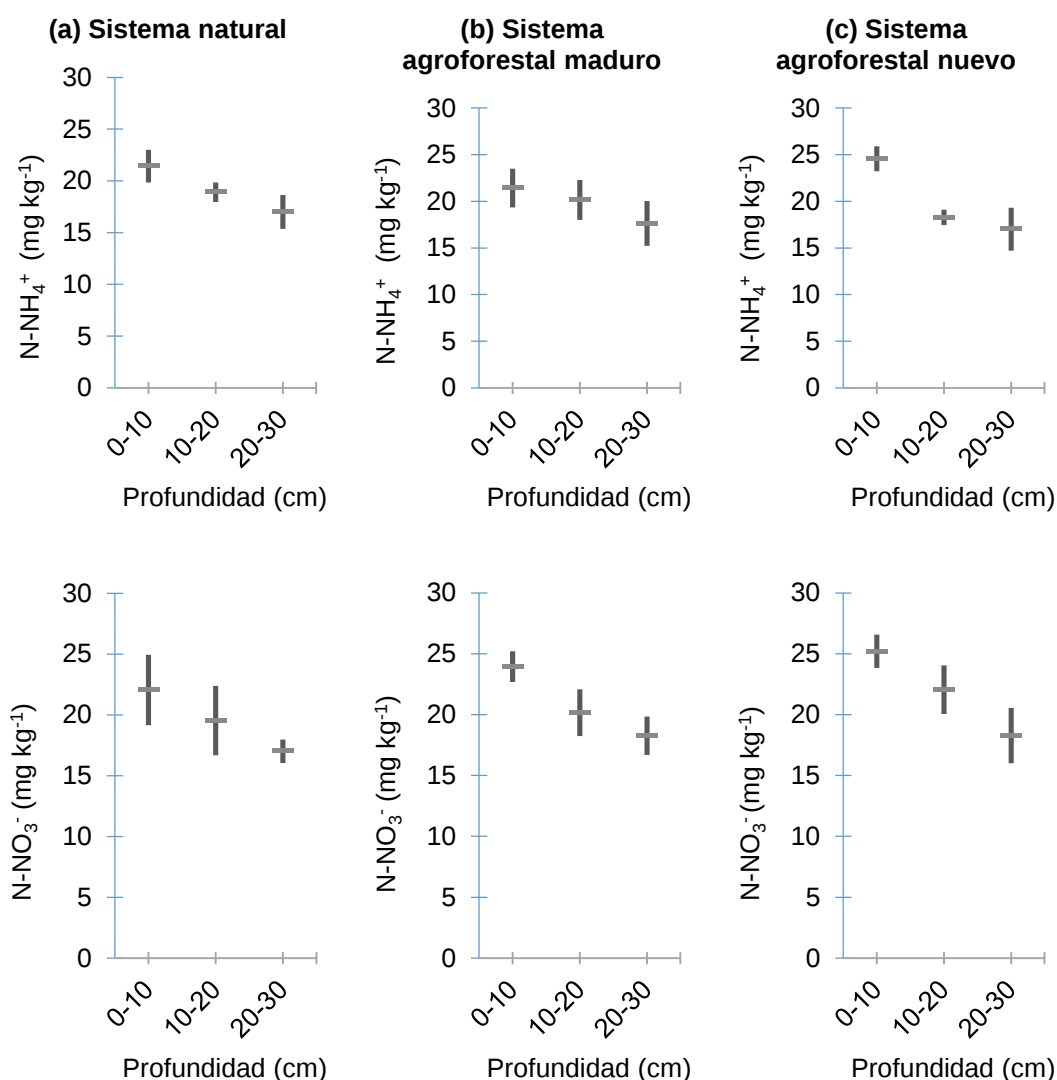


Figura 20. (a), (b) y (c). Comportamiento de la concentración de amonio y nitratos en las tres profundidades.

Del mismo modo, el N-mineral al ser la suma de nitratos y amonio, siguió la misma tendencia de disminución conforme aumentó la profundidad (Figura 21),

lo que coincidió con lo reportado por Arana (2003) en cafetales con incorporación de residuos.

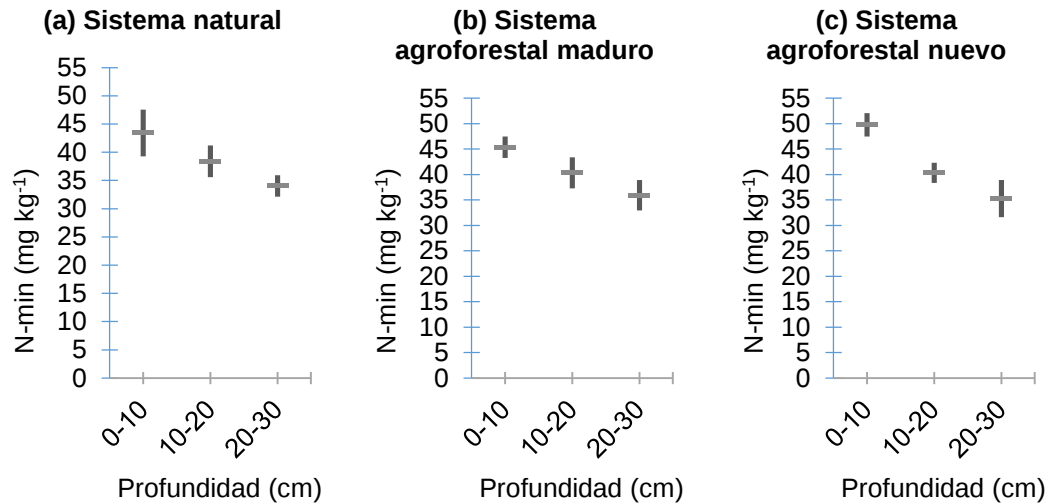


Figura 21 (a), (b) y (c). Comportamiento del N-min en las tres profundidades.

En el sistema natural y en el SAF maduro, las concentraciones de amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y N-min no presentaron diferencias estadísticas entre las diferentes profundidades de muestreo. Mientras que en el SAF nuevo, la concentración de amonio reportada en la capa superficial (0-10 cm) difirió estadísticamente con las otras dos profundidades; para el mismo sistema en las concentraciones de nitratos y N-min, se presentó diferencia estadística significativa únicamente entre las profundidades 0-10 y 20-30 cm (Cuadro 12).

Cuadro 12. Concentración de amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y N-mineral en las tres profundidades.

Sistema	Profundidad (cm)	$\text{NH}_4^+ *$ (mg kg ⁻¹)	Error Estándar	$\text{NO}_3^- *$ (mg kg ⁻¹)	Error Estándar	N-min * (mg kg ⁻¹)	Error Estándar
Sistema natural	0-10	21.42a	1.58	22.05a	2.9	43.47a	4.12
	10-20	18.9a	0.95	19.53a	2.85	38.43a	2.8
	20-30	17.01a	1.64	17.01a	0.95	34.02a	1.89
Sistema agroforestal maduro	0-10	21.42a	2.07	23.94a	1.26	45.36a	2.11
	10-20	20.16a	2.14	20.16a	1.92	40.32a	3.05
	20-30	17.64a	2.4	18.27a	1.58	35.91a	2.99
Sistema agroforestal nuevo	0-10	24.57a	1.34	25.2a	1.37	49.77a	2.27
	10-20	18.27b	0.83	22.05ab	1.99	40.32ab	1.99
	20-30	17.01b	2.31	18.27b	2.27	35.28b	3.63

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Concentración en los tres sistemas

Comparando las concentraciones de los sistemas en la profundidad 0-10 cm, el SAN obtuvo la mayor concentración de amonio, nitratos y N-mineral. En la siguiente profundidad, el SAM reportó la mayor concentración de amonio, en cuanto a la concentración de nitratos el SAN registró el dato mayor, el N-mineral fue mayor en los SAF's, reportando datos iguales. En la última capa muestreada el SAM reportó la mayor concentración de amonio y N-mineral, en nitratos el SAM y el SAN obtuvieron los datos más altos. Estadísticamente no hubo diferencia significativa entre los sistemas en ninguna de las profundidades (Cuadro 13).

Cuadro 13. Concentración de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas.

Profundidad (cm)	Sistema ^z	NH ₄ ⁺ * (mg kg ⁻¹)	Error Estándar	NO ₃ ⁻ * (mg kg ⁻¹)	Error Estándar	N-min * (mg kg ⁻¹)	Error Estándar
0-10	SN	21.42a	1.58	22.05a	2.9	43.47a	4.12
	SAM	21.42a	2.07	23.94a	1.26	45.36a	2.11
	SAN	24.57a	1.34	25.2a	1.37	49.77a	2.27
10-20	SN	18.9a	0.95	19.53a	2.85	38.43a	2.8
	SAM	20.16a	2.14	20.16a	1.92	40.32a	3.05
	SAN	18.27a	0.83	22.05a	1.99	40.32a	1.99
20-30	SN	17.01a	1.64	17.01a	0.95	34.02a	1.89
	SAM	17.64a	2.4	18.27a	1.58	35.91a	2.99
	SAN	17.01a	2.31	18.27a	2.27	35.28a	3.63

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$)

En promedio en la profundidad de 0-30 cm, el SN obtuvo los datos más bajos en amonio, nitratos y N-mineral y el SAN fue el que reportó los promedios más altos; pero estadísticamente no hubo diferencias significativas entre los sistemas (Cuadro 14 y Figura 22).

Cuadro 14. Concentración de amonio, nitratos y N-mineral en los tres sistemas en la profundidad de 0-30 cm.

Sistema ^z	Promedio* NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	Error Estándar	Promedio* NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	Error Estándar	Promedio* N-min (mg kg ⁻¹)	Error Estándar
SN	19.11a	1.28	19.53a	1.78	38.64a	2.27
SAM	19.74a	1.58	20.79a	1.26	40.53a	2.14
SAN	19.95a	1.05	21.84a	1	41.79a	1.68

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

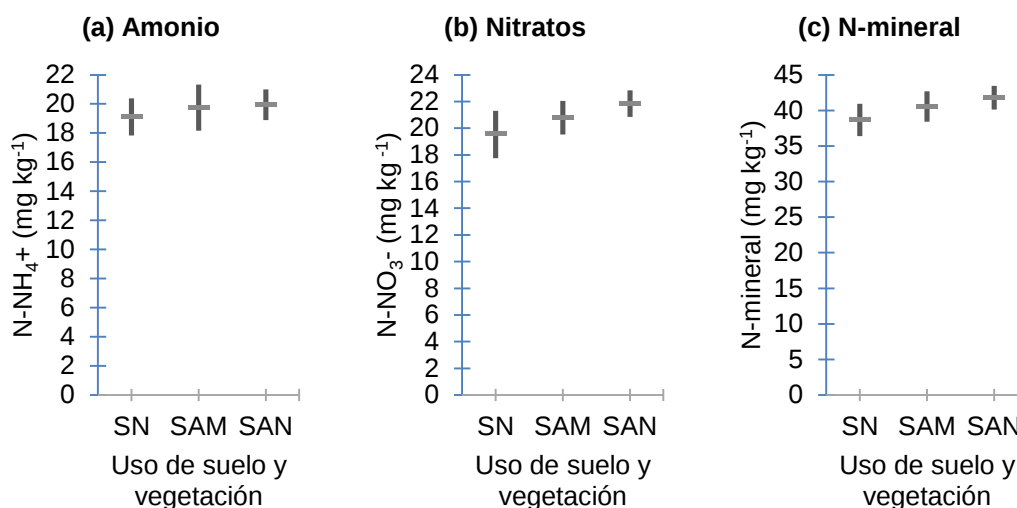


Figura 22 (a), (b) y (c). Concentración de amonio, nitratos y N-mineral en los tres sistemas.

Gutiérrez *et al.* (2004) compararon la disponibilidad de nitrógeno en el suelo en sistemas cafetaleros bajo sombra de las leguminosas *Erythrina poeppigiana* e *Inga spp.* y dos especies maderables, encontrando concentraciones menores a lo reportado en este estudio. Por otra parte, Zhang *et al.*, 2014, registró concentraciones de nitratos en rangos que van desde los 4.7 mg kg⁻¹ hasta 23 mg kg⁻¹ en sistemas naturales y rangos de 5 mg kg⁻¹ hasta 30 mg kg⁻¹ en cultivos, para amonio reportó rangos de concentraciones que van desde 2.9 mg kg⁻¹ a 13.7 mg kg⁻¹ en sistemas naturales y 8.2 mg kg⁻¹ a 17.2 mg kg⁻¹ en cultivos, siendo estos datos los más parecidos a lo reportado en este estudio. De forma similar, Zarate (2011), reportó una concentración de 39.20 mg kg⁻¹ de N-mineral, coincidiendo con lo encontrado en este estudio.

Contenido en las tres profundidades

Los contenidos de amonio y nitratos, al igual que la concentración también tendieron a disminuir con la profundidad (Figura 23), la misma tendencia se observó en N-mineral (Figura 24).

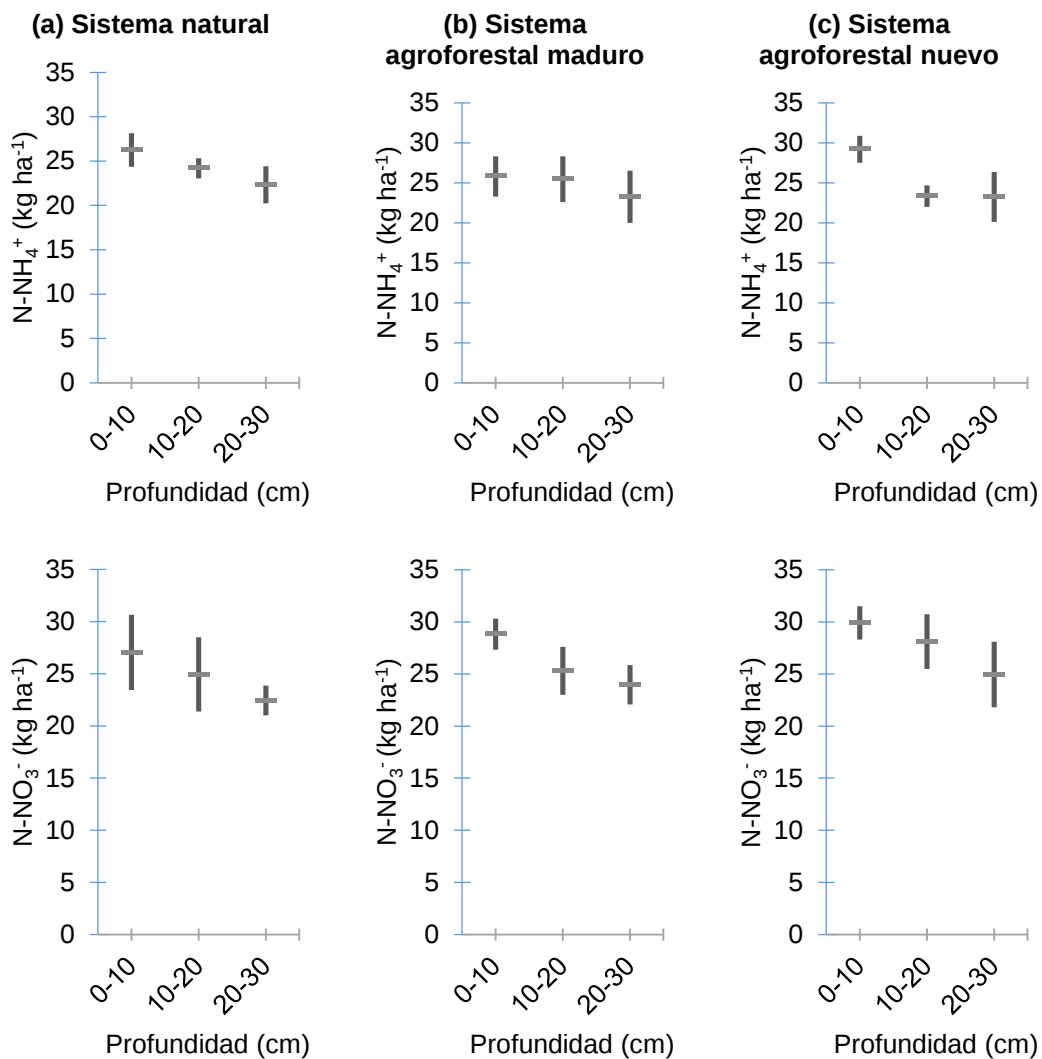


Figura 23 (a), (b) y (c). Comportamiento del amonio y nitratos en las tres profundidades.

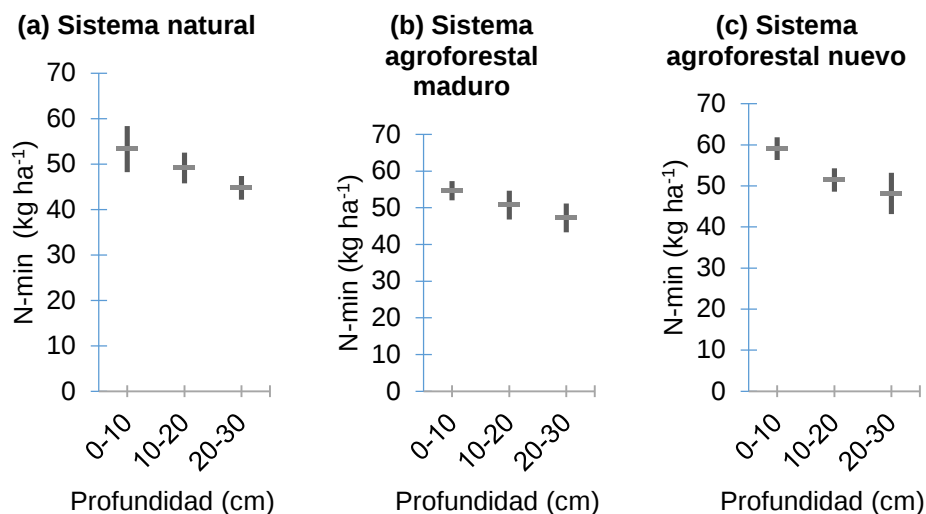


Figura 24 (a), (b) y (c). Comportamiento del N-mineral en las tres profundidades.

En los tres sistemas, los contenidos de amonio, nitratos y N-mineral fueron mayores en la profundidad de 0-10 cm y menores en la última capa (20-30 cm); pero estadísticamente en ninguno de los casos existió diferencia significativa entre las diferentes profundidades (Cuadro 15).

Cuadro 15. Contenido de amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y N-mineral en las tres profundidades.

Sistema	Profundidad (cm)	$\text{NH}_4^+ *$ (kg ha ⁻¹)	Error Estándar	$\text{NO}_3^- *$ (kg ha ⁻¹)	Error Estándar	N-min * (kg ha ⁻¹)	Error Estándar
Sistema natural	0-10	26.23a	1.90	27.04a	3.6	53.27a	5.07
	10-20	24.17a	1.14	24.93a	3.55	49.11a	3.38
	20-30	22.32a	2.1	22.43a	1.43	44.75a	2.6
Sistema agroforestal maduro	0-10	25.82a	2.52	28.81a	1.48	54.63a	2.61
	10-20	25.46a	2.85	25.29a	2.31	50.75a	3.93
	20-30	23.28a	3.26	23.96a	1.9	47.24a	3.91
Sistema agroforestal nuevo	0-10	29.21a	1.7	29.89a	1.59	59.1a	2.78
	10-20	23.36a	1.34	28.1a	2.61	51.46a	2.84
	20-30	23.24a	3.11	24.94a	3.14	48.18a	5.01

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Contenido en los tres sistemas

Al comparar los contenidos de amonio, nitratos y N-mineral de los sistemas en una misma profundidad, el SAN obtuvo los mayores contenidos en la profundidad de 0-10 cm, en la siguiente profundidad (20-30 cm) el SAM registró

el mayor contenido de amonio, mientras que el SAN fue mayor en nitratos y N-mineral, en la última profundidad (20-30 cm) el SAN fue mayor en nitratos y N-mineral y SN registró el mayor contenido de amonio. Estadísticamente no hubo diferencia significativa entre sistemas (Cuadro 16).

Cuadro 16. Contenido de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas.

Profundidad (cm)	Sistema ^z	NH ₄ ⁺ * (kg ha ⁻¹)	Error Estándar	NO ₃ ⁻ * (kg ha ⁻¹)	Error Estándar	N-min * (kg ha ⁻¹)	Error Estándar
0-10	SN	26.23a	1.90	27.04a	3.6	53.27a	5.07
	SAM	25.82a	2.52	28.81a	1.48	54.63a	2.61
	SAN	29.21a	1.7	29.89a	1.59	59.1a	2.78
10-20	SN	24.17a	1.14	24.93a	3.55	49.1a	3.38
	SAM	25.46a	2.85	25.29a	2.31	50.75a	3.93
	SAN	23.36a	1.34	28.1a	2.61	51.46a	2.84
20-30	SN	22.32a	2.1	22.43a	1.43	44.75a	2.6
	SAM	23.28a	3.26	23.96a	1.9	47.24a	3.91
	SAN	23.24a	3.11	24.94a	3.14	48.18a	5.01

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Al sumar los contenidos de amonio, nitratos y N-mineral en la profundidad de 0-30 cm, los tres sistemas reportaron datos muy parecidos y estadísticamente no difirieron, en los tres casos el SAF nuevo (SAN) fue ligeramente mayor (Cuadro 17 y Figura 25).

Cuadro 17. Contenido de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas en la profundidad de 0-30 cm.

Sistema ^z	NH ₄ ⁺ * (kg ha ⁻¹)	Error Estándar	NO ₃ ⁻ * (kg ha ⁻¹)	Error Estándar	N-min * (kg ha ⁻¹)	Error Estándar
SN	72.72a	4.69	74.4a	6.84	147.13a	8.55
SAM	74.56a	6.27	78.06a	4.35	152.62a	8.03
SAN	75.81a	4.23	82.93a	4.2	158.73a	7

^zSN: sistema natural, SAM: sistema agroforestal maduro, SAN: sistema agroforestal nuevo.

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$)

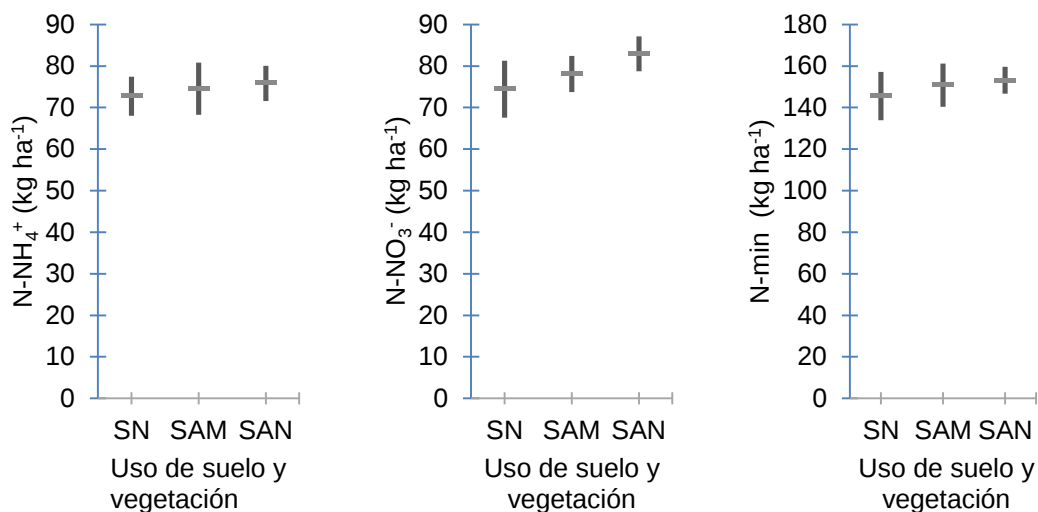


Figura 25. Contenido de amonio, nitratos y N-min en los tres sistemas.

Zarate (2011) reportó en huertos familiares, un contenido de N-mineral de 90.15 kg ha⁻¹, 45.07 kg ha⁻¹ de NH₄⁺ y 45.07 kg ha⁻¹ de NO₃⁻, siendo estos datos menores a los encontrados en este estudio.

5.3. Relación carbono/nitrógeno en las tres profundidades

En los tres sistemas, la relación C/N presentó un comportamiento inverso a las concentraciones y contenidos de C y N, ya que el menor dato se registró en la parte superficial (0-10 cm) y la mayor relación se obtuvo en la profundidad 20-30 cm, coincidiendo con lo observado por Gelaw *et al.* (2014) en sistemas agroforestales (Figura 26).

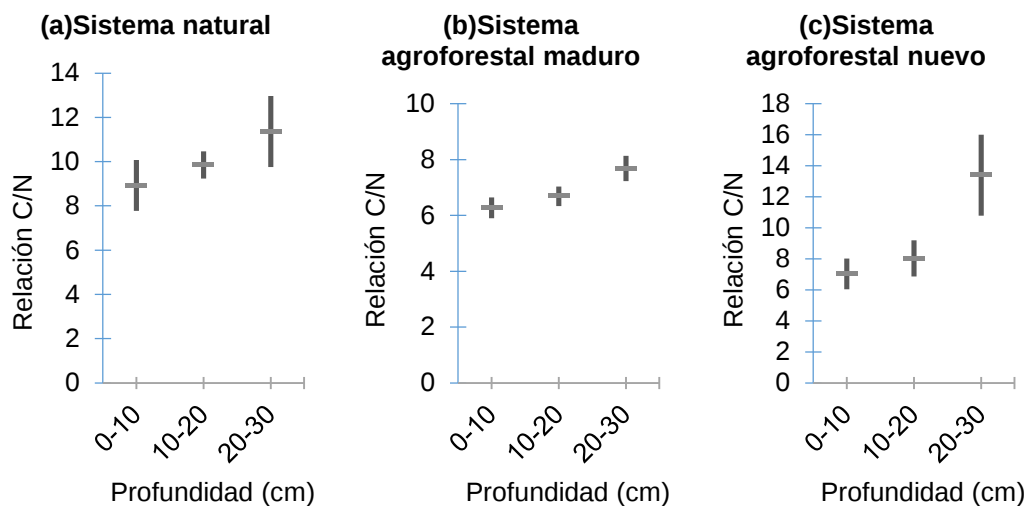


Figura 26 (a), (b) y (c). Relación C/N en las tres profundidades.

En el sistema natural y el SAF maduro, las relaciones C/N en las tres profundidades no difirieron estadísticamente, mientras que en el SAF nuevo la capa superficial (0-10 cm) difirió con la última profundidad (20-30 cm) (Cuadro 18).

Cuadro 18. Relación C/N en las tres profundidades.

Sistema	Profundidad (cm)	Relación* C/N	Error Estándar
Sistema natural	0-10	8.93a	1.15
	10-20	9.85a	0.61
	20-30	11.36a	1.61
Sistema agroforestal maduro	0-10	6.27a	0.37
	10-20	6.68a	0.35
	20-30	7.68a	0.45
Sistema agroforestal nuevo	0-10	7.03a	0.99
	10-20	8.03ab	1.16
	20-30	13.40b	2.61

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

Carvajal *et al.* (2009) en su estudio realizado en relictos de selva y cafetales, reportaron una relación C/N en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) de 11.17, 11.57 y 11.97 en sistemas de selva y 10.49, 10.79, 11.15 en cafetales, en otro estudio realizado por De Alcántara *et al.* (2014) en cafetales reportaron una relación C/N de 16.1. Zuluaga (2004), encontró relaciones C/N de 11.23, 11.34 y 11.83 en profundidades de 0-5, 5-10 y 10-20 cm en un sistema

agroforestal con café con manejo orgánico. Los datos obtenidos de relación C/N en esta investigación, con excepción del SAF nuevo en la última profundidad, resultaron inferiores a los reportados por dichos autores.

5.3.1 Relación carbono/nitrógeno en los tres sistemas

En las profundidades de 0-10 cm y de 10-20 cm el sistema natural presentó la mayor relación C/N seguido por el SAF nuevo, y finalmente el SAF maduro registró el dato menor, sin embargo, en la primer profundidad no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los diferentes sistemas estudiados, caso contrario en la segunda profundidad, donde si hubo diferencias significativas. En la última profundidad (20-30 cm) el SAF nuevo obtuvo el dato más grande, pero estadísticamente no hubo diferencias (Cuadro 19).

Cuadro 19. Relación C/N en los tres sistemas.

Profundidad (cm)	Sistemas	Promedio C/N	Error estándar
0-10	Sistema natural	8.18a	1.15
	Sistema agroforestal maduro	6.19a	0.37
	Sistema agroforestal nuevo	6.59a	0.99
10-20	Sistema natural	9.52a	0.61
	Sistema agroforestal maduro	6.63b	0.35
	Sistema agroforestal nuevo	7.47ab	1.16
20-30	Sistema natural	10.06a	1.57
	Sistema agroforestal maduro	7.66a	0.45
	Sistema agroforestal nuevo	10.79a	2.61

*Valores designados por la misma letra no son diferentes significativamente ($P = 0.05$).

En promedio en la profundidad de 0-30 cm, el sistema natural registró una relación C/N de 10.05 y le siguió el SAF nuevo con 9.49. El SAF maduro reportó el menor dato (6.68) difiriendo estadísticamente con el sistema natural. El comportamiento de la relación C/N en los tres sistemas se puede apreciar en la figura 27.

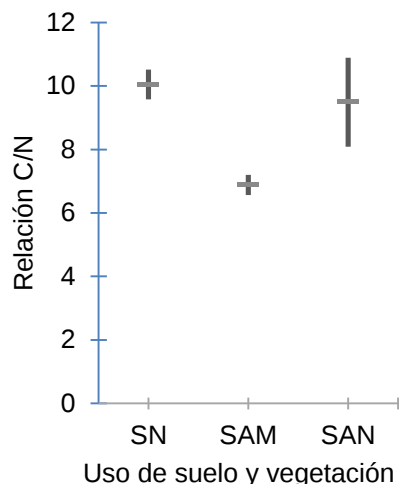


Figura 27. Relación C/N en los tres sistemas.

La relación C/N indica la potencialidad del suelo para transformar la materia orgánica en nitrógeno mineral. Si la relación C/N es baja hay una liberación excesiva de nitrógeno (García-Serrano *et al.*, 2009). Cuanto menor es la relación, mayor es la velocidad de descomposición (Jafari *et al.*, 2011). Por el contrario si la relación es alta, la velocidad de mineralización de la materia orgánica disminuye, hay una liberación muy escasa de nitrógeno asimilable; por lo que se genera una competencia entre los diferentes organismos del suelo y también entre éstos y las plantas superiores (Palma *et al.*, 2000).

El humus estable tiene una relación C/N de entre 9 y 11, por eso se dice que el mejor sistema es el que tiene un valor cercano a 10 (Nieto *et al.*, 2005; García-Serrano *et al.*, 2009). Pues valores más bajos producen pérdidas por lixiviación (mucha disponibilidad) y valores muy altos producen deficiencias (poca disponibilidad).

6. CONCLUSIONES

El sistema agroforestal nuevo presentó en promedio una concentración y contenido de carbono superior a los otros dos sistemas; sin embargo, estadísticamente solo se diferenció del sistema natural, por lo que el sistema agroforestal nuevo tuvo una mayor capacidad como reservorio de carbono comparado con el sistema natural, pero no fue mejor que el sistema agroforestal maduro.

En los dos sistemas agroforestales no hubo diferencia estadística significativa en la concentración y contenido de nitrógeno total y orgánico y ambos fueron superiores estadísticamente a lo encontrado en el sistema natural. Esto es debido a la mayor entrada de material orgánico derivado de la poda y la incorporación de residuos.

Las concentraciones y contenidos de nitratos, amonio y nitrógeno mineral más bajos correspondieron al sistema natural, pero estadísticamente no hubo diferencias entre los sistemas, indicando que no se tuvo efecto de estos en la disponibilidad de estas formas del nitrógeno.

En promedio, la mejor relación C/N se registró en el sistema natural y el SAF nuevo, ya que se encontró una relación alrededor de 10, desde el punto de vista de un balance entre mineralización y humificación. Lo que indica que sus suelos tienen la mejor potencialidad para transformar la materia orgánica en nitrógeno mineral y por lo tanto tienen la mejor condición en la producción de nitrógeno asimilable en el suelo.

En los tres sistemas estudiados, la mayor concentración y contenido de carbono orgánico y de nitrógeno se encontró en la capa superficial. Los valores obtenidos disminuyeron gradualmente en todos los casos a medida que aumentó la profundidad de muestreo.

La relación C/N tendió a aumentar con la profundidad en los tres sistemas, indicando que la descomposición de la materia orgánica fue lenta y hubo menor disponibilidad de nitrógeno asimilable conforme aumentó la profundidad.

En general, fueron los sistemas agroforestales los que presentaron los promedios más altos en concentración y contenido de C y N, así como la mejor relación C/N, lo que indica el gran potencial de la adopción de esta práctica para la conservación y protección de los reservorios de carbono y la disponibilidad nitrógeno en el suelo.

7. RECOMENDACIONES

A los tomadores de decisión sobre políticas ambientales nacionales, conociendo la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en los sistemas agroforestales cafetaleros, que resultó ser superior a la del sistema natural de selva media subcaducifolia, se les recomienda intervenir en la integración de estos a los ecosistemas aplicables dentro del programa de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD+), y así evitar la pérdida de los reservorios por cambio de uso de suelo o por la implementación de cafetales a pleno sol.

Al Gobierno Federal a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), se le recomienda aplicar sus políticas de restricción del uso de los recursos naturales proporcionando opciones que beneficien económicamente a los dueños y poseedores de los bosques y selvas, en este caso, dando impulso a la venta de bonos de carbono en el esquema del proyecto de REDD+, aplicables tanto a la vegetación de selva media subcaducifolia como a los sistemas agroforestales de café bajo sombra.

A los cafeticultores se les recomienda incrementar el contenido de carbono del suelo mediante la rehabilitación de suelos degradados y la adopción de prácticas de conservación del suelo, para que sus cafetales sean más atractivos para su integración en el programa de REDD+ y así obtener ingresos extras por la protección y conservación de sus sistemas agroforestales.

A los productores con SAF's cafetaleros maduros, se les recomienda aumentar realizar aportes de material orgánico, para que puedan optimizar la relación carbono/nitrógeno y por lo tanto la disponibilidad de N para los cafetos,

consiguiendo un mejoramiento en el desarrollo vegetal y un buen tamaño del grano, que se traduciría en un incremento del rendimiento.

A todo investigador interesado en el estudio de los reservorios de carbono en los usos de suelo y vegetación como mecanismo para disminuir el CO₂ en la atmosfera, se le recomienda inmiscuirse en todos los estratos presentes, es decir, no solamente analizar el suelo, sino también integrar a los arboles vivos y muertos, arbustos, herbáceas, leñosas muertas sobre el suelo, hojarasca, mantillo y raíces, puesto que aunque la cantidad más alta y más estable de carbono está almacenada en el suelo, los árboles ocupan el segundo lugar con un importante reservorio. Además de que el carbono aéreo es el más inestable y por lo tanto es con el que hay que tener mayores medidas de conservación.

De igual forma, se recomienda investigar cuales actividades favorecen en mayor medida la acumulación de carbono y nitrógeno en el suelo, es decir analizar las podas, la adición de fertilizantes, la incorporación de residuos, entre otras, determinar quien aporta más al sistema y recomendarlas a los técnicos asesores de cafeticultores y/o a los cafeticultores directamente.

8. LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M., J.D Etchevers B, K. Quednow y C. Monreal. 2001. Un método para la medición de captura de carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. *In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. 11 p.
- Alegre J and M. Rao. 1996. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Perú. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 57: 17-25.
- Altieri, M. A. 1999. Agroecología: Bases científica para una agricultura sustentable. Nordan-Comunidad (Ed), Montevideo. 338 p.
- Alvarado J., H. J. Alvarado y M. Segura. 2013. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia forestal* 16:21-31.
- Amorim, S. J; A. C. Moraes A, M. E. Ortiz E, F. A. Da Silva, A. C. Rodrigues C and T. Senna D. 2013. Soil carbon and stocks in traditional agricultural and agroforestry system in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37:784-795
- Arana, M. V. 2003. Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo organico de café (*Coffea arabica* L.) asociado con poró [*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook]. Tesis Magíster Scientiae Agroforestería Tropical. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Arthur, H. J. 2000. El ciclo del nitrógeno de microbios y de hombres. Organización de medio ambiente de Madrid. Sector de agricultura.
- 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 de las Américas* 8: 32 - 35.
- Ávila H., J. Harmand y Dambrine E. 2004. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffeaarabica* con *Eucalyptusdeglupta* en la Zona Sur de Costa Rica. *Agroforestería de las Américas* 41/42:83-91.

- Avilés V. D., Romanya J, G. Fiallos F, S. Ávila F, L. Delfini G y G. Montiel L. 2011. Disponibilidad de nitrógeno en cultivos herbáceos extensivos ecológicos y convencionales: relación con la cantidad de carbono. *Ciencia y Tecnología* 4:1-7.
- Baca, B. E., L. Soto y E. Pardo E. 2000. Fijación biológica de nitrógeno. *Elementos* 7:43-49.
- Bandeira, F. P., C. Martorell J, A. Meave and J. Caballero. 2005. The role of rustic coffee plantations in the conservation of wild tree diversity in the Chinantec region of Mexico. *Biodiversity and Conservation* 14: 1225-1240.
- Batsile, D. S; Zhong-Du C, R. Lal, Hai-Lin Z and F. Chen. 2014. Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat–maize cropping system in the North China Plain. *Soil & Tillage Research* 144: 110–118.
- Beer J., Muschler R, Kass D and Somarriba E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38:139-164.
- Beer J., C. Harvey, M. Ibrahim, J. M. Harmand, E. Somarriba y F. Jiménez. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería de las Américas* 10: 80-87.
- Benintende, M. C., J. J. De Battista, S. M. Benintende, M. F. Saluzzio, C. Muller y M. A. Sterren. 2008. Estimación del aporte de nitrógeno del suelo para la fertilización racional de cultivos. *Ciencia, Docencia y Tecnología* 19: 141-174.
- Bertsch, F. 1995. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 157 p.
- Buol, S.W., D. Hole F y J. McCracken R. 2004. Génesis y Clasificación de Suelos. Trillas (Ed), México, D. F. 90 p.
- Cardona C. D. A y S. Sadeghian. K. 2005. Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelo establecidos en café bajo sombra y plena exposición solar. *CENIAFÉ* 56:348-364.
- Carvajal, A. F., A. Feijo, H. Quintero y M.A. Rondón. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 9: 222-235.
- Casanova, L. F., J. Petit A. y J. Solorio S. 2011. Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 105-118.

- Castellanos J., J. Uvalle B y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelo y aguas agrícola, plantas y ECP. Intragri. 2^a edición. pp 62-81.
- Celaya, M. H y A. Castellanos V. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana* 29: 343-356.
- Chapin, F. S., P. A. Matson, and H. A. Mooney. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. *Plant Physiol* 113: 313-319.
- Claus A and E George. 2005. Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three European forest chronosequences. *Canadian Journal Forest Research* 35: 1617-1625.
- Coraspe L H.M., Muraoka T, Franzini V.I, E. Contreras F.S, O. Trivelin P.C. 2009. Absorción de formas de nitrógeno amoniacal y nítrico por plantas de papa en la producción de tubérculo-semilla. *Agronomía Tropical* 59:45-58.
- Coyne, M. 2000. Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio. Paraninfo (Ed), Madrid España. 416p.
- Cristóbal-Acevedo, D., M. E. Álvarez-Sánchez, E. Hernández-Acosta, R. Améndola-Massiotti. 2011. Concentración de nitrógeno en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana* 29: 325-332.
- De Alcántara, N. K., E. Valente de M, G. Pereira D, A. Oliveira S and P. De Moura. 2014. Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with. *Scientia Agricola* 71: 87-95.
- De la Cruz O, J.C. 2015. Almacenes de carbono asociados a diferentes unidades del paisaje en el Centro Regional Universitario Oriente. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. México. 156 p.
- Dong W., Hu C, Chen S, Zhang Y. 2009. Tillage and residue management effects on soil carbon and CO₂ in a wheat–corn double-cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosyst* 83: 27–37.
- Du Z., Ren T and Hu C. 2010. Tillage and residue removal effects on soil carbon and nitrogen storage in the North China Plain. *Soil Science Society of America Journal* 74: 196–202.
- Energex, The carbon cycle. 2010. http://www.energex.com.au/switched_on/being_green/being_green_carbon.html. [Consultado: 20/04/15].

- 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.
- Espinoza, D. W., L. Krishnamurthy, A. Vázquez A y A. Torres R. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 18: 57-70.
- Etchevers, J. D., M. Acosta M, C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. *In*: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 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. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. FAO, Italia. 61 p.
- Favela, C.E., P. Preciado R y A. Benavides M. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Departamento de Horticultura. Universidad Agraria Antonio Narro. Unidad Laguna. Torreón, Coahuila. 146 p.
- Fisher, M. J. 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Roma, Italia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, FAO.
- Fuentes, Y. J. 1999. El suelo y los fertilizantes. 5^a Edición. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa (Ed), Madrid, España. 327 p.
- García, E.1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Talleres de Offset Larios, S. A. México, D. F.
- García-Serrano, J. P., J. J Lucena M., S. Ruano C y M. Nogales G. 2009. Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, España. 119 p.
- Gelaw M. A., B. R. Singh and R. Lal. 2014. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in

- Tigray, Northern Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 188: 256–263.
- Gliessman S. R. 2002. *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 359 p.
- González-Molina L., Jorge D. Etchevers-Barra y Claudia Hidalgo-Moreno. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia* 42: 741-751.
- Gutiérrez C. M., J. M. Harmand y E. Dambrine. 2004. Disponibilidad de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de *Coffea arabica*. *Agroforesteria en las Américas, avances de investigación* 41-42.
- Hayatsu M., Tago K and Saito M. 2008. Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil Science and Plant Nutrition* 54: 33-45.
- Hergoualc'h, K., E. Blanchart, U. Skiba, C. Hénault and J. M. Harmand. 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea Arabica*) monoculture versus an agroforestry systems with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148: 102-110.
- Hernández, C. E. 2013. Carbono acumulado en dos sistemas agroforestales y en un sistema de bosque de niebla. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. México. 98 p.
- INEGI. 2010. Censo de población y vivienda 2010.
- INEGI. 2011. Mapa de uso de suelo y vegetación de México.
- INEGI. 2014. Mapa digital de México.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Penman J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (eds). Published: IGES, Japan. 590 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 30 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.
- Jimenez F., Muschler R y Kopsell E. 2001. Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. CATIE, Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Turrialba, Costa Rica. 187p.
- Johnson, D. W., J. D. Knoepp, W. T. Swank, J. Shan, L. A. Morris, D. H. Van Lear, and P. R. Kapeluck. 2002. Effects of forest management on soil carbon: results of some longterm resampling studies. *Environmental Pollution* 116: 201-208.
- Jones C and Jacobsen J. 2005. Nitrogen Cycling, Testing and Fertilizer Recommendations. *In*: Nutrient Management Module N°. 3. Montana State University, Montana, USA, 15 p.
- Kader M., Sleutel S, Begum S, D'Haene K, Jegajeevagan K and De Neve S. 2010. Soil organic matter fractionation as a tool for predicting nitrogen mineralization in silty arable soils. *Soil use and management* 26: 494-507.
- Kaur, B. S., Gupta and G. Singh. 2000. Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India. *Applied Soil Ecology* 15:283-294.
- Khan, S. A., L. Mulvaney R, T. Ells-Worth and W. Boast C. 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality* 36: 1821-1832.
- Kimmins, J. P. 2004. Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry. Prentice Hall. New Jersey. 611 p.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 23: 1-22.
- Lal R. 2005. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research* 81: 137-142.
- Lal R. 2007. World soils and global issues. *Soils Tillage Research* 97: 1-4.
- López, R. J. y M. López J. 1990. El diagnóstico de suelos y plantas, métodos de campo y laboratorio. 4a Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España, 45 p.
- Macías F y M. Camps (Eds.). 2002. Secuestro de Carbono en Suelos y Biomasa. Reunión Internacional. Castelo de Santa Cruz. A Coruña. 66 p.

- Martínez E. R. M. 2003. Fisiología de la asimilación de nitrógeno en "Haloferax mediterranei". Purificación y caracterización de Nitrato y Nitrito reductasas asimilativas. Tesis doctorado. Universidad de Alicante. Alicante, España, 10-20p.
- Masera O. 1995. Carbon mitigation scenarios for mexican forest: methodological considerations and results. *Interciencia* 20: 388-395.
- Masuhara, A. 2012. Evaluación del contenido de carbono en sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. México. 146 p.
- Mena, M. V. 2008. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica. Tesis Magíster Scientiae Agroforestería Tropical. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 90 pp.
- Mogollón J. P., J. García-Mirayaga, L. F. Sanchez, N. Chacon y J. Araujo. 1996. Nitrógeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. *Agronomía Tropical* 47:87-102
- 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. Sistemas agroforestales: Principios y aplicaciones en los trópicos. 2^a ed. Organización para Estudios Tropicales. San José, Costa Rica. 622 p.
- Montagnini F and K. Nair P. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.
- Muschler R., C. Yépez, A. Rodríguez C, W. Peters G y A. JürgenP J. 2006. Manejo y valoración de la biodiversidad de flora y fauna en cafetales. *In*: El cafetal del futuro: realidades y visiones. Jürgen P. A, L. Soto P y J.F. Barrera (Eds). ECOSUR, El Colegio de la Frontera Sur, Chiapas, México. 333-360 p.
- Mutuo, P. K., G. Cadisch, A. Albrecht, C.A. Palm and 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.

- Nair, P. K., V. Nair D, B. Kumar M and S. Haile G. 2009. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science & Policy* 12: 1099-1111.
- Navarro, B. S. y G. Navarro G. 2003. Química Agrícola. Segunda edición. Mundi-Prensa México S.A. de C. V. México, D.F. 432 p.
- Nieto C. C., R. Ramos V y J. Galarza R. 2005. Sistemas agroforestales aplicables en la sierra Ecuatoriana. Resultados de una década de experiencia en campo. INIAP-PROMSA (Ed), Quito, Ecuador. 195 p.
- Nojonen M., J. Healey, G. Soto and J. Hagggar. 2013. Sink or source—The potential of coffee agroforestry systems to sequester atmospheric CO₂ into soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 175: 60– 68.
- Núñez, E. R. 2007. El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos. *In: Nutrición de cultivos*. Alcanzar, G. B. y L. I. Trejo-Téllez (eds). Primera edición. Mundi Prensa. Mexico. Pp 93-122.
- Okano Y., Hristova K. R and Leutenegger C. M. 2004. Application of real-time PCR to study effects of ammonium on population size of ammonia-oxidizing bacteria in soil. *Applied and Environmental Microbiology* 70: 1008-1016.
- Ortiz, C., G. 2004. El agroecosistema café: crisis de mercado y sustentabilidad. Tesis de Doctorado en Ciencias, programa en agroecosistemas tropicales. Colegio de Posgraduados, Campus Veracruz. México. 125 p.
- Palma R. M., L. Defrieri R, F. Tortarolo M, Prause J and F. Gallardo J. 2000. Seasonal changes of bioelements in the litter and their potential return to green leaves in four species of the Argentine Subtropical Forest. *Annals of Botany* 85: 181-186.
- Pandey D., N. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy* 2: 367-377.
- Philippot, L and J. C. Germon. 2005. Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils. *In: Microorganisms in soils: roles in genesis and functions*. Soil Biology. Springer-Verlag. F. Buscot and A. Varma (eds.). Heidelberg, Germany. pp. 159-176.
- Pineda, L. M., G. Ortiz C y L. Sánchez V. 2005. Los cafetales y su captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11: 3-14.

- Plascencia A., R Corbella. 2014. Nitrógeno del suelo. Universidad Nacional de Tucuman.
- Porta J., López A y Roquero C. 2003. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. Mundi-Prensa, Madrid. 960 p.
- Porter E., K Tonnessen y R Grant. 2000. El nitrógeno en la lluvia nacional. Kingston E., V Bowersox., R Claybrooke., y G Zorrilla (eds). National atmospheric deposition program. 13 p.
- Post, W. M and C. Kwon K. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6:317-327.
- Power, J. S. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems* 7:134–146
- Robert, M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos. FAO. Roma, Italia. 61 pp.
- Rodríguez, J. M., Camargo J. C, Niño J, Pineda A. M, Arias L. M, Echeverry M. A y Miranda C. L. (eds). (2009). Valoración de la Biodiversidad en la Ecorregión del Eje Cafetero. Pereira. CIEBREG. 238 p.
- Romero-Alvarado Y., L. Soto-Pinto, L. García-Barrios and J.F. 2002. Barrera-Gaytán. Coffee yields and soil nutrients under the shades of *Inga* sp. vs. multiple species in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 54: 215–224.
- 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 Latinoamericana* 26: 375-384.
- Rügnitz, T. M., M. Chacón L y R. Porro. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroflorestal. Lima, Perú. 79 pp.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sadeghian, K. S. 2011. Respuesta de cafetales al sol y bajo semisombra a nitrógeno y su relación con la materia orgánica del suelo. *Facultad Nacional de Agronomía* 64: 5781-5791.
- Salazar-Sosa, E., A. Beltran-Morales, M. Fortis-Hernández, J. A. Rodríguez-Leos, J. A. Cueto-Wong, C. Vázquez-Vázquez y J. J. Peña-Cabriales. 2003. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana* 21: 569-575.

- Sánchez P. A y C. A. Palm. 2012. Reciclaje de nutrientes y agrosilvicultura en África. FAO –ICRAF. Nairobi, Kenya. 46-78p.
- Sartorio B., A. 2002. Los cafetales de sombra como proveedores de servicios ambientales. *Ciencia y Mar* 17-22.
- Schargel R y Marvaez P. 2009. Estudio de los suelos y la vegetación (Estructura, composición florística y diversidad) en bosques macrotérmicos no-inundables, Estado Amazonas, Venezuela. *Biollania* 9: 99-109.
- 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 C., M. A, P. Sánchez G, C. A. Ortiz S y M. C. Gutiérrez C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 23: 21-28.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. México. 85 p.
- SSSA. 2014. Energy Title Recommendations for 2007 Farm Bill. Soil Carbon: Our Natural Capital. American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America.
- Soto-Pinto L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jiménez F and B. De Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry System* 78:39–51
- Tisdale S.L., J.D. Beaton, J.L. Havlin and W.L. Nelson. 1999. Nitrogen transformations in soils. *In*: Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 6ª edición. Prentice-Hall, New Jersey, USA. Pp 108-135.
- Toledo, 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.
- Van Spanning, R. J., M. J. Delgado and D. J. Richardson. 2005. The nitrogen cycle: Denitrification and its relationship to N₂ fixation. *In*: Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology, and the environment. D. Werner and W. E. Newton (eds.). pp 277-342.

- Vargas-Parra, L y Varela A. 2007. "Producción de hojarasca en un bosque de niebla en la reserva natural La Planada (Nariño, Colombia). *Universitas Scientiarum* 12: 35-49.
- Vergara, S y J.D. Etchevers B. 2006. Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 40: 557-567.
- Vitousek P., J. Aber, R. Howarth, G. Likens, P. Matson, D. Schindler, W. Schlesinger, y G. Tilman. 1997. Alteración antrópogenica del ciclo global del nitrógeno: causas y consecuencias. *Sociedad norteamericana de ecología*. 20 pp.
- White R.E. 2006. Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource. 4^a edición. Blackwell Publishing (Ed), Australia. 363 p.
- Xu, X and Hirata E. 2005. Deposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest: C and P dynamics. *Plant and soil* 273: 279-289.
- Zarate H. J. 2011. Dinámica del nitrógeno en la producción orgánica y convencional de maíz y frijol en huertos familiares. . Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. México. 129 p.
- Zhang J., X. Wang, J. Wang and W. Wang. 2014. Carbon and nitrogen contents in typical plants and soil profiles in Yanqi Basin of Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture* 13: 648-656.
- Zuluaga P, J. J. 2004. Dinámica de la materia orgánica del suelo en sistemas agroforestales de café con *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook en Costa Rica. Tesis Magíster Scientiae Agroforestería Tropical. CATIE. Turrialba, Costa Rica.

9. ANEXOS

Anexo 1. Porcentaje de carbono orgánico del suelo.

UM	Profundidad (cm)	CO (%)	UM	Profundidad (cm)	CO (%)
SN-1	0-10	3.94	SAM-2	20-30	2.38
	10-20	2.47		0-10	4.03
	20-30	1.56		10-20	3.02
	0-10	3.85		20-30	2.11
	10-20	2.84	SAM-3	0-10	4.77
	20-30	1.56		10-20	3.48
	0-10	3.94		20-30	2.11
	10-20	2.75		0-10	4.40
SN-2	20-30	1.74		10-20	2.93
	0-10	3.02		20-30	1.92
	10-20	2.38		0-10	4.12
	20-30	2.11		10-20	3.67
	0-10	4.12		20-30	2.66
	10-20	3.85	SAN-1	0-10	4.22
	20-30	2.75		10-20	3.93
	0-10	4.12		20-30	3.19
SN-3	10-20	3.12		0-10	5.90
	20-30	2.66		10-20	3.93
	0-10	4.95		20-30	3.36
	10-20	3.76		0-10	3.36
	20-30	1.19		10-20	2.70
	0-10	4.58		20-30	3.52
	10-20	2.11	SAN-2	0-10	4.50
	20-30	1.19		10-20	2.87
SAM-1	0-10	2.47		20-30	1.97
	10-20	2.29		0-10	3.60
	20-30	1.28		10-20	1.56
	0-10	3.39		20-30	1.56
	10-20	3.02		0-10	6.63
	20-30	1.47		10-20	2.87
	0-10	4.03		20-30	1.80
	10-20	3.21	SAN-3	0-10	5.98
SAM-2	20-30	2.02		10-20	4.67
	0-10	3.39		20-30	3.36
	10-20	2.75		0-10	5.16
	20-30	1.65		10-20	3.85
	0-10	4.03		20-30	1.47
	10-20	2.84		0-10	6.06
	20-30	2.11		10-20	3.44
	0-10	4.77		20-30	2.54
	10-20	3.21			

Anexo 2. Porcentaje de N-total.

UM	Profundidad (cm)	N-total (%)	UM	Profundidad (cm)	N-total (%)
SN-1	0-10	0.42	SAM-3	0-10	0.61
	10-20	0.23		10-20	0.43
	20-30	0.09		20-30	0.27
	0-10	0.49		0-10	0.58
	10-20	0.23		10-20	0.46
	20-30	0.15		20-30	0.26
	0-10	0.59		0-10	0.63
	10-20	0.32		10-20	0.43
	20-30	0.20		20-30	0.27
SN-2	0-10	0.39	SAN-1	0-10	0.63
	10-20	0.27		10-20	0.27
	20-30	0.26		20-30	0.15
	0-10	0.79		0-10	0.40
	10-20	0.43		10-20	0.30
	20-30	0.17		20-30	0.13
	0-10	0.59		0-10	0.56
	10-20	0.45		10-20	0.38
	20-30	0.16		20-30	0.16
SN-3	0-10	0.44	SAN-2	0-10	0.93
	10-20	0.30		10-20	0.40
	20-30	0.27		20-30	0.18
	0-10	0.27		0-10	0.71
	10-20	0.20		10-20	0.39
	20-30	0.19		20-30	0.12
	0-10	0.30		0-10	0.97
	10-20	0.25		10-20	0.44
	20-30	0.09		20-30	0.25
SAM-1	0-10	0.66	SAN-3	0-10	0.92
	10-20	0.50		10-20	0.60
	20-30	0.30		20-30	0.32
	0-10	0.63		0-10	0.83
	10-20	0.46		10-20	0.59
	20-30	0.27		20-30	0.35
	0-10	0.65		0-10	0.95
	10-20	0.48		10-20	0.62
	20-30	0.23		20-30	0.45
SAM-2	0-10	0.69			
	10-20	0.48			
	20-30	0.29			
	0-10	0.67			
	10-20	0.47			
	20-30	0.27			
	0-10	0.84			
	10-20	0.54			
	20-30	0.25			

Anexo 3. Concentración de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-).

UM	Profundidad (cm)	NH_4^+ (mg kg ⁻¹)	NO_3^- (mg kg ⁻¹)
SN-1	0-10	22.68	17.01
	10-20	22.68	17.01
	20-30	22.68	17.01
	0-10	17.01	22.68
	10-20	17.01	34.02
	20-30	11.34	17.01
	0-10	28.35	34.02
	10-20	22.68	28.35
	20-30	22.68	17.01
SN-2	0-10	22.68	28.35
	10-20	17.01	22.68
	20-30	17.01	22.68
	0-10	28.35	22.68
	10-20	22.68	5.67
	20-30	22.68	17.01
	0-10	22.68	34.02
	10-20	17.01	22.68
	20-30	11.34	17.01
SN-3	0-10	17.01	11.34
	10-20	17.01	17.01
	20-30	17.01	17.01
	0-10	17.01	11.34
	10-20	17.01	17.01
	20-30	17.01	11.34
	0-10	17.01	17.01
	10-20	17.01	11.34
	20-30	11.34	17.01
SAM-1	0-10	28.35	22.68
	10-20	22.68	22.68
	20-30	22.68	17.01
	0-10	28.35	22.68
	10-20	11.34	17.01
	20-30	17.01	17.01
	0-10	17.01	17.01
	10-20	11.34	11.34
	20-30	11.34	11.34

Anexo 3. Concentración de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-). (Continuación)

UM	Profundidad (cm)	NH_4^+ (mg kg ⁻¹)	NO_3^- (mg kg ⁻¹)
SAM-2	0-10	11.34	28.35
	10-20	17.01	22.68
	20-30	11.34	17.01
	0-10	17.01	28.35
	10-20	22.68	17.01
	20-30	17.01	17.01
	0-10	22.68	22.68
	10-20	17.01	28.35
	20-30	17.01	28.35
SAM-3	0-10	22.68	28.35
	10-20	22.68	28.35
	20-30	11.34	17.01
	0-10	17.01	22.68
	10-20	28.35	17.01
	20-30	34.02	17.01
	0-10	28.35	22.68
	10-20	28.35	17.01
	20-30	17.01	22.68
SAN-1	0-10	28.35	22.68
	10-20	17.01	22.68
	20-30	17.01	11.34
	0-10	28.35	28.35
	10-20	17.01	28.35
	20-30	17.01	22.68
	0-10	22.68	17.01
	10-20	17.01	22.68
	20-30	11.34	28.35
SAN-2	0-10	22.68	22.68
	10-20	22.68	11.34
	20-30	22.68	22.68
	0-10	28.35	28.35
	10-20	22.68	28.35
	20-30	17.01	17.01
	0-10	22.68	28.35
	10-20	17.01	17.01
	20-30	28.35	22.68
SAN-3	0-10	22.68	28.35
	10-20	17.01	28.35
	20-30	22.68	17.01
	0-10	28.35	28.35
	10-20	17.01	22.68
	20-30	11.34	5.67
	0-10	17.01	22.68
	10-20	17.01	17.01
	20-30	5.67	17.01

Anexo 4. Concentración de N-mineral.

UM	Profundidad (cm)	N-min (mg kg ⁻¹)	UM	Profundidad (cm)	N-min (mg kg ⁻¹)
SN-1	0-10	39.69	SAM-3	0-10	51.03
	10-20	39.69		10-20	51.03
	20-30	39.69		20-30	28.35
	0-10	39.69		0-10	39.69
	10-20	51.03		10-20	45.36
	20-30	28.35		20-30	51.03
	0-10	62.37		0-10	51.03
	10-20	51.03		10-20	45.36
	20-30	39.69		20-30	39.69
SN-2	0-10	51.03	SAN-1	0-10	51.03
	10-20	39.69		10-20	39.69
	20-30	39.69		20-30	28.35
	0-10	51.03		0-10	56.70
	10-20	28.35		10-20	45.36
	20-30	39.69		20-30	39.69
	0-10	56.70		0-10	39.69
	10-20	39.69		10-20	39.69
	20-30	28.35		20-30	39.69
SN-3	0-10	28.35	SAN-2	0-10	45.36
	10-20	34.02		10-20	34.02
	20-30	34.02		20-30	45.36
	0-10	28.35		0-10	56.70
	10-20	34.02		10-20	51.03
	20-30	28.35		20-30	34.02
	0-10	34.02		0-10	51.03
	10-20	28.35		10-20	34.02
	20-30	28.35		20-30	51.03
SAM-1	0-10	51.03	SAN-3	0-10	51.03
	10-20	45.36		10-20	45.36
	20-30	39.69		20-30	39.69
	0-10	51.03		0-10	56.70
	10-20	28.35		10-20	39.69
	20-30	34.02		20-30	17.01
	0-10	34.02		0-10	39.69
	10-20	22.68		10-20	34.02
	20-30	22.68		20-30	22.68
SAM-2	0-10	39.69			
	10-20	39.69			
	20-30	28.35			
	0-10	45.36			
	10-20	39.69			
	20-30	34.02			
	0-10	45.36			
	10-20	45.36			
	20-30	45.36			

Anexo 5. Concentración de N-orgánico.

UM	Profundidad (cm)	N-orgánico (%)	UM	Profundidad (cm)	N-orgánico (%)
SN-1	0-10	0.42	SAM-3	0-10	0.61
	10-20	0.23		10-20	0.43
	20-30	0.09		20-30	0.27
	0-10	0.49		0-10	0.58
	10-20	0.22		10-20	0.46
	20-30	0.15		20-30	0.26
	0-10	0.58		0-10	0.63
	10-20	0.31		10-20	0.43
	20-30	0.20		20-30	0.27
SN-2	0-10	0.38	SAN-1	0-10	0.62
	10-20	0.27		10-20	0.27
	20-30	0.26		20-30	0.15
	0-10	0.78		0-10	0.39
	10-20	0.43		10-20	0.30
	20-30	0.17		20-30	0.13
	0-10	0.58		0-10	0.56
	10-20	0.45		10-20	0.38
	20-30	0.16		20-30	0.16
SN-3	0-10	0.44	SAN-2	0-10	0.93
	10-20	0.30		10-20	0.40
	20-30	0.27		20-30	0.18
	0-10	0.27		0-10	0.70
	10-20	0.20		10-20	0.38
	20-30	0.19		20-30	0.12
	0-10	0.30		0-10	0.96
	10-20	0.25		10-20	0.44
	20-30	0.09		20-30	0.24
SAM-1	0-10	0.66	SAN-3	0-10	0.91
	10-20	0.50		10-20	0.60
	20-30	0.30		20-30	0.32
	0-10	0.63		0-10	0.82
	10-20	0.45		10-20	0.59
	20-30	0.27		20-30	0.35
	0-10	0.64		0-10	0.95
	10-20	0.47		10-20	0.62
	20-30	0.23		20-30	0.45
SAM-2	0-10	0.68			
	10-20	0.48			
	20-30	0.29			
	0-10	0.66			
	10-20	0.47			
	20-30	0.27			
	0-10	0.83			
	10-20	0.54			
	20-30	0.25			

Anexo 6. Contenido de carbono orgánico del suelo.

UM	Profundidad (cm)	COS (Mg ha ⁻¹)	UM	Profundidad (cm)	COS (Mg ha ⁻¹)
SN-1	0-10	48.08	SAM-3	0-10	59.57
	10-20	30.93		10-20	43.53
	20-30	20.57		20-30	27.82
	0-10	44.65		0-10	56.31
	10-20	34.66		10-20	39.59
	20-30	19.94		20-30	25.98
	0-10	43.74		0-10	47.84
	10-20	34.37		10-20	45.83
	20-30	21.77		20-30	34.02
SN-2	0-10	42.04	SAN-1	0-10	50.17
	10-20	33.12		10-20	50.32
	20-30	29.30		20-30	44.40
	0-10	50.32		0-10	73.71
	10-20	49.27		10-20	51.89
	20-30	36.29		20-30	48.02
	0-10	51.55		0-10	40.97
	10-20	41.13		10-20	35.68
	20-30	35.08		20-30	47.54
SN-3	0-10	61.86	SAN-2	0-10	52.25
	10-20	46.97		10-20	38.70
	20-30	15.73		20-30	28.11
	0-10	54.53		0-10	42.88
	10-20	26.35		10-20	20.54
	20-30	15.25		20-30	22.25
	0-10	30.93		0-10	73.64
	10-20	30.24		10-20	34.11
	20-30	17.32		20-30	23.06
SAM-1	0-10	41.37	SAN-3	0-10	69.35
	10-20	37.81		10-20	55.55
	20-30	19.36		20-30	45.33
	0-10	50.41		0-10	61.40
	10-20	40.10		10-20	49.27
	20-30	26.62		20-30	19.46
	0-10	42.39		0-10	73.94
	10-20	34.37		10-20	41.97
	20-30	22.93		20-30	32.50
SAM-2	0-10	47.99			
	10-20	35.51			
	20-30	26.98			
	0-10	54.33			
	10-20	40.10			
	20-30	31.45			
	0-10	44.76			
	10-20	36.90			
	20-30	26.98			

Anexo 7. Contenido de nitrógeno total.

UM	Profundidad (cm)	N-total (Mg ha ⁻¹)	UM	Profundidad (cm)	N-total (Mg ha ⁻¹)
SN-1	0-10	5.16	SAM-3	0-10	7.63
	10-20	2.84		10-20	5.38
	20-30	1.19		20-30	3.56
	0-10	5.67		0-10	7.42
	10-20	2.82		10-20	6.21
	20-30	1.90		20-30	3.51
	0-10	6.52		0-10	7.31
	10-20	4.01		10-20	5.38
	20-30	2.49		20-30	3.46
SN-2	0-10	5.44	SAN-1	0-10	7.50
	10-20	3.70		10-20	3.46
	20-30	3.64		20-30	2.09
	0-10	9.64		0-10	5.00
	10-20	5.51		10-20	3.96
	20-30	2.27		20-30	1.86
	0-10	7.43		0-10	6.83
	10-20	5.94		10-20	5.02
	20-30	2.17		20-30	2.16
SN-3	0-10	5.48	SAN-2	0-10	10.79
	10-20	3.77		10-20	5.40
	20-30	3.56		20-30	2.57
	0-10	3.21		0-10	8.45
	10-20	2.54		10-20	5.15
	20-30	2.45		20-30	1.72
	0-10	3.72		0-10	10.77
	10-20	3.36		10-20	5.24
	20-30	1.27		20-30	3.20
SAM-1	0-10	8.05	SAN-3	0-10	10.67
	10-20	6.25		10-20	7.14
	20-30	3.96		20-30	4.32
	0-10	7.88		0-10	9.88
	10-20	5.75		10-20	7.55
	20-30	3.56		20-30	4.62
	0-10	8.13		0-10	11.59
	10-20	6.00		10-20	7.56
	20-30	3.20		20-30	5.76
SAM-2	0-10	8.21			
	10-20	6.00			
	20-30	3.71			
	0-10	7.64			
	10-20	5.88			
	20-30	3.56			
	0-10	9.32			
	10-20	6.59			
	20-30	3.20			

Anexo 8. Contenido de N-orgánico.

UM	Profundidad (cm)	N-orgánico (Mg ha ⁻¹)	UM	Profundidad (cm)	N-orgánico (Mg ha ⁻¹)
SN-1	0-10	5.08	SAM-3	0-10	7.59
	10-20	2.83		10-20	5.33
	20-30	1.14		20-30	3.52
	0-10	5.64		0-10	7.39
	10-20	2.74		10-20	6.16
	20-30	1.88		20-30	3.47
	0-10	6.48		0-10	7.27
	10-20	3.94		10-20	5.34
	20-30	2.45		20-30	3.42
SN-2	0-10	5.35	SAN-1	0-10	7.44
	10-20	3.70		10-20	3.41
	20-30	3.56		20-30	2.05
	0-10	9.58		0-10	4.93
	10-20	5.47		10-20	3.90
	20-30	2.19		20-30	1.80
	0-10	7.30		0-10	6.78
	10-20	5.89		10-20	4.96
	20-30	2.07		20-30	2.11
SN-3	0-10	5.46	SAN-2	0-10	10.74
	10-20	3.71		10-20	5.35
	20-30	3.52		20-30	2.51
	0-10	3.18		0-10	8.38
	10-20	2.46		10-20	5.08
	20-30	2.40		20-30	1.67
	0-10	3.71		0-10	10.71
	10-20	3.26		10-20	5.20
	20-30	1.18		20-30	3.13
SAM-1	0-10	8.00	SAN-3	0-10	10.61
	10-20	6.20		10-20	7.09
	20-30	3.91		20-30	4.27
	0-10	7.83		0-10	9.81
	10-20	5.69		10-20	7.50
	20-30	3.53		20-30	4.60
	0-10	8.05		0-10	11.54
	10-20	5.94		10-20	7.52
	20-30	3.14		20-30	5.73
SAM-2	0-10	8.15			
	10-20	5.95			
	20-30	3.66			
	0-10	7.58			
	10-20	5.84			
	20-30	3.51			
	0-10	9.26			
	10-20	6.54			
	20-30	3.16			

Anexo 9. Contenido de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-).

UM	Profundidad (cm)	NH_4^+ (kg ha ⁻¹)	NO_3^- (kg ha ⁻¹)
SN-1	0-10	27.67	20.75
	10-20	28.35	21.26
	20-30	29.94	22.45
	0-10	19.73	26.31
	10-20	20.75	41.5
	20-30	14.52	21.77
	0-10	31.47	37.76
	10-20	28.35	35.44
	20-30	28.35	21.26
SN-2	0-10	31.53	39.41
	10-20	23.64	31.53
	20-30	23.64	31.53
	0-10	34.59	27.67
	10-20	29.03	7.26
	20-30	29.94	22.45
	0-10	28.35	42.53
	10-20	22.45	29.94
	20-30	14.97	22.45
SN-3	0-10	21.26	14.18
	10-20	21.26	21.26
	20-30	22.45	22.45
	0-10	20.24	13.49
	10-20	21.26	21.26
	20-30	21.77	14.52
	0-10	21.26	21.26
	10-20	22.45	14.97
	20-30	15.31	22.96
SAM-1	0-10	34.59	27.67
	10-20	28.35	28.35
	20-30	29.94	22.45
	0-10	35.44	28.35
	10-20	14.18	21.26
	20-30	22.45	22.45
	0-10	21.26	21.26
	10-20	14.18	14.18
	20-30	15.76	15.76

Anexo 9. Contenido de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-). (Continuación)

UM	Profundidad (cm)	NH4+ (kg ha ⁻¹)	NO3- (kg ha ⁻¹)
SAM-2	0-10	13.49	33.74
	10-20	21.26	28.35
	20-30	14.52	21.77
	0-10	19.39	32.32
	10-20	28.35	21.26
	20-30	22.45	22.45
	0-10	25.17	25.17
	10-20	20.75	34.59
	20-30	21.77	36.29
SAM-3	0-10	28.35	35.44
	10-20	28.35	35.44
	20-30	14.97	22.45
	0-10	21.77	29.03
	10-20	38.27	22.96
	20-30	45.93	22.96
	0-10	32.89	26.31
	10-20	35.44	21.26
	20-30	21.77	29.03
SAN-1	0-10	33.74	26.99
	10-20	21.77	29.03
	20-30	23.64	15.76
	0-10	35.44	35.44
	10-20	22.45	37.42
	20-30	24.32	32.43
	0-10	27.67	20.75
	10-20	22.45	29.94
	20-30	15.31	38.27
SAN-2	0-10	26.31	26.31
	10-20	30.62	15.31
	20-30	32.43	32.43
	0-10	33.74	33.74
	10-20	29.94	37.42
	20-30	24.32	24.32
	0-10	25.17	31.47
	10-20	20.24	20.24
	20-30	36.29	29.03
SAN-3	0-10	26.31	32.89
	10-20	20.24	33.74
	20-30	30.62	22.96
	0-10	33.74	33.74
	10-20	21.77	29.03
	20-30	14.97	7.48
	0-10	20.75	27.67
	10-20	20.75	20.75
	20-30	7.26	21.77

Anexo 10. Contenido de N-mineral.

UM	Profundidad (cm)	N-min (kg ha ⁻¹)	UM	Profundidad (cm)	N-min (kg ha ⁻¹)
SN-1	0-10	48.42	SAM-3	0-10	63.79
	10-20	49.61		10-20	63.79
	20-30	52.39		20-30	37.42
	0-10	46.04		0-10	50.80
	10-20	62.25		10-20	61.23
	20-30	36.29		20-30	68.89
	0-10	69.23		0-10	59.20
	10-20	63.79		10-20	56.70
	20-30	49.61		20-30	50.80
SN-2	0-10	70.94	SAN-1	0-10	60.73
	10-20	55.17		10-20	50.80
	20-30	55.17		20-30	39.40
	0-10	62.26		0-10	70.88
	10-20	36.29		10-20	59.87
	20-30	52.39		20-30	56.75
	0-10	70.88		0-10	48.42
	10-20	52.39		10-20	52.39
	20-30	37.42		20-30	53.58
SN-3	0-10	35.44	SAN-2	0-10	52.62
	10-20	42.52		10-20	45.93
	20-30	44.90		20-30	64.86
	0-10	33.73		0-10	67.48
	10-20	42.52		10-20	67.36
	20-30	36.29		20-30	48.64
	0-10	42.52		0-10	56.64
	10-20	37.42		10-20	40.48
	20-30	38.27		20-30	65.32
SAM-1	0-10	62.26	SAN-3	0-10	59.20
	10-20	56.70		10-20	53.98
	20-30	52.39		20-30	53.58
	0-10	63.79		0-10	67.48
	10-20	35.44		10-20	50.80
	20-30	44.90		20-30	22.45
	0-10	42.52		0-10	48.42
	10-20	28.36		10-20	41.50
	20-30	31.52		20-30	29.03
SAM-2	0-10	47.23			
	10-20	49.61			
	20-30	36.29			
	0-10	51.71			
	10-20	49.61			
	20-30	44.90			
	0-10	50.34			
	10-20	55.34			
	20-30	58.06			

Anexo 11. Densidad aparente.

UM	Profundidad (cm)	Densidad aparente (g/cm ³)	UM	Profundidad (cm)	Densidad aparente (g/cm ³)
SN-1	0-10	1.22	SAM-3	0-10	1.25
	10-20	1.25		10-20	1.25
	20-30	1.32		20-30	1.32
	0-10	1.16		0-10	1.28
	10-20	1.22		10-20	1.35
	20-30	1.28		20-30	1.35
	0-10	1.11		0-10	1.16
	10-20	1.25		10-20	1.25
	20-30	1.25		20-30	1.28
SN-2	0-10	1.39	SAN-1	0-10	1.19
	10-20	1.39		10-20	1.28
	20-30	1.39		20-30	1.39
	0-10	1.22		0-10	1.25
	10-20	1.28		10-20	1.32
	20-30	1.32		20-30	1.43
	0-10	1.25		0-10	1.22
	10-20	1.32		10-20	1.32
	20-30	1.32		20-30	1.35
SN-3	0-10	1.25	SAN-2	0-10	1.16
	10-20	1.25		10-20	1.35
	20-30	1.32		20-30	1.43
	0-10	1.19		0-10	1.19
	10-20	1.25		10-20	1.32
	20-30	1.28		20-30	1.43
	0-10	1.25		0-10	1.11
	10-20	1.32		10-20	1.19
	20-30	1.35		20-30	1.28
SAM-1	0-10	1.22	SAN-3	0-10	1.16
	10-20	1.25		10-20	1.19
	20-30	1.32		20-30	1.35
	0-10	1.25		0-10	1.19
	10-20	1.25		10-20	1.28
	20-30	1.32		20-30	1.32
	0-10	1.25		0-10	1.22
	10-20	1.25		10-20	1.22
	20-30	1.39		20-30	1.28
SAM-2	0-10	1.19			
	10-20	1.25			
	20-30	1.28			
	0-10	1.14			
	10-20	1.25			
	20-30	1.32			
	0-10	1.11			
	10-20	1.22			
	20-30	1.28			

Anexo 12. Relación Carbono/Nitrógeno.

UM	Profundidad (cm)	C/N	UM	Profundidad (cm)	C/N
SN-1	0-10	9.38	SAM-3	0-10	7.81
	10-20	10.76		10-20	8.1
	20-30	17.31		20-30	7.81
	0-10	7.86		0-10	7.58
	10-20	12.35		10-20	6.38
	20-30	10.39		20-30	7.4
	0-10	6.68		0-10	6.55
	10-20	8.59		10-20	8.53
	20-30	8.71		20-30	9.84
SN-2	0-10	7.76	SAN-1	0-10	6.69
	10-20	8.83		10-20	14.56
	20-30	8.11		20-30	21.29
	0-10	5.22		0-10	14.74
	10-20	8.95		10-20	13.1
	20-30	16.17		20-30	25.83
	0-10	6.99		0-10	6
	10-20	6.92		10-20	7.11
	20-30	16.61		20-30	22.01
SN-3	0-10	11.25	SAN-2	0-10	4.84
	10-20	12.53		10-20	7.17
	20-30	4.41		20-30	10.92
	0-10	16.97		0-10	5.08
	10-20	10.54		10-20	3.99
	20-30	6.27		20-30	12.97
	0-10	8.25		0-10	6.84
	10-20	9.17		10-20	6.51
	20-30	14.26		20-30	7.21
SAM-1	0-10	5.14	SAN-3	0-10	6.5
	10-20	6.05		10-20	7.78
	20-30	4.89		20-30	10.49
	0-10	6.4		0-10	6.22
	10-20	6.97		10-20	6.52
	20-30	7.47		20-30	4.21
	0-10	5.22		0-10	6.38
	10-20	5.73		10-20	5.55
	20-30	7.17		20-30	5.64
SAM-2	0-10	5.84			
	10-20	5.92			
	20-30	7.27			
	0-10	7.11			
	10-20	6.83			
	20-30	8.83			
	0-10	4.8			
	10-20	5.6			
	20-30	8.43			