



DEPÓSITOS DE CARBONO EN SUELOS BAJO RELICTOS DE BOSQUE Y PRADERAS DE FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CAQUETÁ (COLOMBIA)

Clara P. Peña-Venegas^{1*}, Edmundo R. Mendoza¹,
Carlos H. Rodríguez², Bernardo Betancourt²,
M. Tatiana Garzón², Gladys I. Cardona³

RESUMEN

El bosque amazónico es considerado el depósito natural de carbono más grande del planeta. Pero los procesos de deforestación y degradación del suelo están transformando los bosques amazónicos de fijadores de carbono a emisores. A la fecha existen diversos trabajos que cuantifican la cantidad de carbono acumulado en la biomasa vegetal, pero no así la existente en los suelos. El presente trabajo evalúa y cuantifica los depósitos totales y parciales de carbono, como ácidos húmicos, fúlvicos, y en biomasa microbiana, de suelos bajo relictos de bosque y praderas en fincas del departamento de Caquetá-Amazonia colombiana localizadas en paisajes con diferentes niveles de intervención. Los suelos bajo bosque acumulan una cantidad de carbono equivalente aun 13 y27% del carbono que acumula el bosque en pie. La transformación del bosque en pasturas aumenta las emisiones a la atmósfera en aproximadamente 20 Ton de carbono por hectárea, sin incluir el aporte adicional que hace la biomasa del bosque al ser talado. Los procesos de degradación subsecuentes del suelo, no incrementan de manera considerable esta pérdida de carbono aun cuando afectan la composición microbiológica de

los suelos. Además se observa que las fincas de tipologías agropecuaria o agrícola tienen menores emisiones de carbono en comparación con fincas de tipología ganadera. Los resultados indican que es posible implementar actividades productivas que minimizan o restablecen la capacidad de fijación de carbono de los suelos.

Palabras clave

Depósitos de carbono, Suelos amazónicos, Bosques, Pasturas.

ABSTRACT

The Amazon forest is considered the planet's largest natural carbon reservoir. However, deforestation and land degradation are transforming the Amazon forests from carbon fixers to carbon emitters. To date, there are several studies that quantify the amount of accumulated carbon in plant biomass, but not that existing in the soil. This study evaluates and quantifies the total and partial deposits of carbon, such as humic acid, fulvic and microbial

^{1*} Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, sede Leticia. Avenida Vásquez Cobo Calle 15 y 16, Leticia, Amazonas. Teléfono: 57 8 5925480 Fax: 57 8 5927181. cpena@sinchi.org.co; crodriguez@sinchi.org.co; bbetancourt@sinchi.org.co; mgarzon@sinchi.org.co; gcardona@sinchi.org.co; edmundomendoza@gmail.com

² Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, sede Florencia. Calle 31 No. 2 E-41 B. El Cunday, Florencia, Caquetá: Teléfax: 57 8 4358728

³ Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, laboratorio biotecnología. Calle 20 No. 5-44, Bogotá D. C. PBX: 57 1 4442060

biomass, from soils under relicts of forest and prairies of farms in the state of Caquetá in the Colombian Amazon. These farms are located in landscapes with different levels of intervention. These soils under forest accumulate an amount equivalent to 13% and 27% of the carbon that's accumulated in standing forests.

The forest transformation into pasture increases emissions by approximately 20 tons of carbon per hectare, not including the additional contribution made by forest biomass when cut. Subsequent processes of soil degradation do not significantly increase the loss of carbon, although they affect the microbiological composition of the soil. In addition, it is observed that farms with an agricultural typology have lower carbon emissions compared to farms dedicated to livestock breeding. The results indicate that it is possible to implement productive activities that minimize or restore the ability of soils to sequester carbon.

Keywords

Carbon Deposits, Amazon Soils, Forests, Pastures.

INTRODUCCIÓN

El bosque amazónico presta múltiples servicios ecosistémicos de importancia a nivel global. Uno de ellos es el ser el depósito natural de carbono (C) más grande del planeta. Se estima que en toda la Amazonia (estimada en un área de 5.6 millones de Km²) existe un depósito de C como biomasa vegetal de 120±30 Pg (Malhi *et al.*, 2008). Igualmente se estima que adicional a la biomasa vegetal, existe un depósito de C en el suelo que corresponde entre el 10 y el 32% de lo acumulado en las coberturas vegetales (Malhi *et al.*, 2006; Pan *et al.*, 2011), pero que no necesariamente corresponde a una relación directa con el C de las coberturas (Grimaldi *et al.*, 2014). Estos depósitos naturales de C considerados antes como estables, han comenzado a disminuir en las últimas décadas por causas de la deforestación y la degradación de los suelos, contribuyendo así a las emisiones globales de CO₂ y a la aceleración del cambio climático global.

Entender cómo los usos del suelo, procesos de deforestación y degradación de suelos afectan los depósitos de C existentes en la Amazonia constituye una prioridad de investigación. Son varias las estimaciones hechas del C que los bosques amazónicos almacenan (Malhi *et al.*, 2006; Lai, 2008; Malhi *et al.*, 2008; Pan *et al.*, 2011), pero no es así con los depósitos de C que los suelos amazónicos poseen. Menos información existe sobre las variaciones de los depósitos de C en relación con la deforestación y el establecimiento de pasturas y su posterior degradación. El Caquetá es uno de los departamentos con mayores índices de praderización en la Amazonia colombiana (Murcia *et al.*, 2011) y la mayor parte de los suelos bajo coberturas de pasturas se encuentran en un nivel alto de degradación (SINCHI, 2015). A la fecha, existen algunos estudios que estiman los depósitos de C de los suelos del departamento de Caquetá bajo diversos usos (Grimaldi *et al.*, 2014; Marichal *et al.*, 2014; Orjuela-Chavez *et al.*, 2014). Sin embargo, estas estimaciones no han sido relacionadas con las tipologías que las fincas poseen en relación a las áreas bajo diversos usos del suelo, por cuanto el aporte individual a la fijación o emisión de C de las fincas del departamento de Caquetá no ha sido bien estimado. Se sabe que los depósitos de C del suelo pueden variar en el tiempo dependiendo de las actividades que allí se realicen. Un ejemplo de ello es el reporte de Cerrri y colaboradores (2003) sobre los cambios de C en el suelo en una finca localizada en el estado de Rondonia (Brasil) a lo largo de 88 años. Inicialmente, el suelo bajo bosque acumulaba 34Ton de C por hectárea en los primeros 30cm del suelo. Luego que el bosque fue transformado en praderas para ganadería, los suelos disminuyeron sus depósitos de C. Sin embargo, al cabo de 88 años de haber sido establecida la pastura, los suelos acumularon 53% más C que los suelos bajo bosque.

Diversas causas pueden afectar la acumulación de C en el suelo. Por una parte, los suelos de la Amazonia son variables en su composición fisicoquímica (Quesada *et al.*, 2010). La cantidad de carbono en ellos varía de acuerdo al desarrollo pedogénico del suelo. Los suelos menos evolucionados albergan mayores concentraciones de C que los más evolucionados. Los suelos más frecuentes en la Amazonia colombiana, incluyendo los existentes en la mayor

parte del departamento de Caquetá son generalmente suelos altamente evolucionados con una alta acidez, baja capacidad de intercambio catiónico, niveles altos de óxidos de aluminio y hierro, y bajas concentraciones de fósforo, cationes y bases (IGAC, 1979). Su fertilidad depende de la materia orgánica, pero dada la baja capacidad de intercambio catiónico que poseen, los nutrientes obtenidos de la materia orgánica son rápidamente lavados, por lo que en general son considerados como suelos de baja fertilidad y alta susceptibilidad a la degradación. Por otra parte, la forma en que el C es acumulado en el suelo afecta su susceptibilidad a ser liberado como CO_2 . En los suelos existen dos depósitos diferentes de C: los depósitos de C estables que se encuentran en los materiales parentales y arcillas, y que son liberados principalmente en procesos lentos por la acción del clima y el tiempo; los depósitos de C menos lábiles que corresponden a formas complejas de materia orgánica como lo son los ácidos húmicos y fulvicos, así como otras moléculas orgánicas constituyentes de los hongos como la quitina; y los depósitos más lábiles que corresponden a las formas más sencillas de C en la materia orgánica. Este último depósito de C es altamente sensible a la deforestación y la

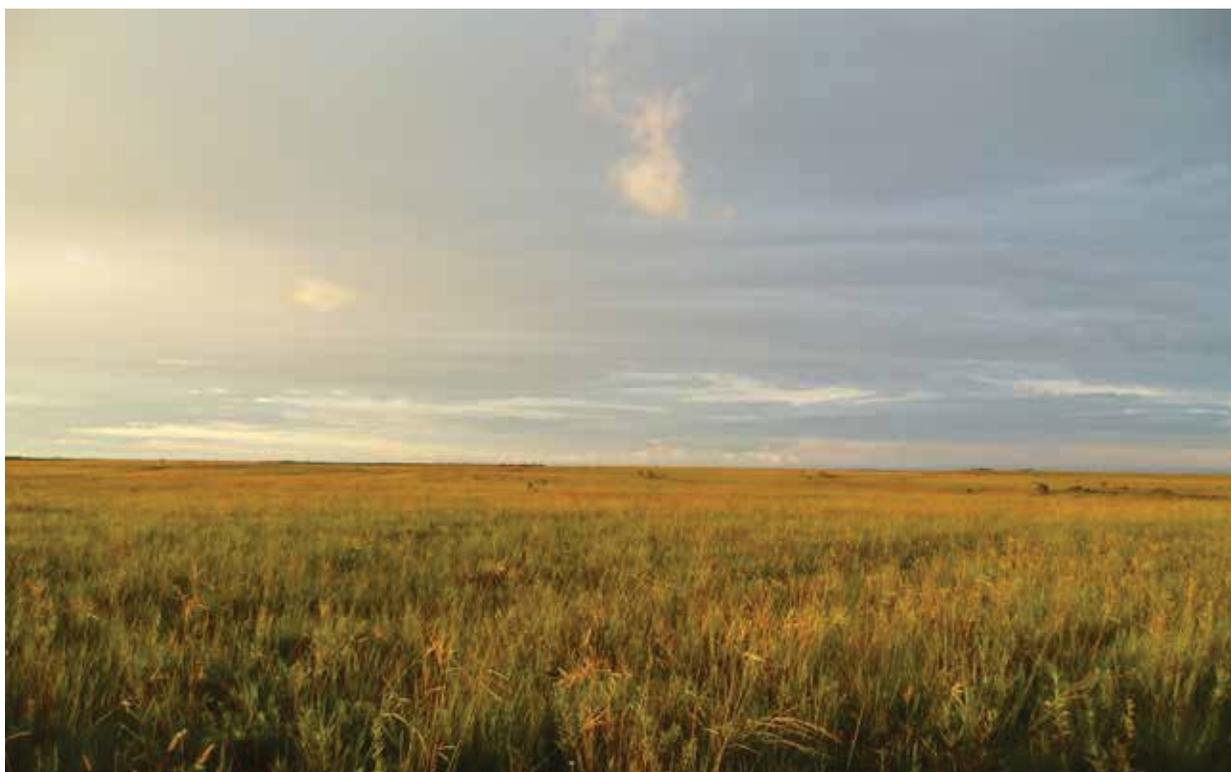
degradación de los suelos, y es el que en forma directa puede contribuir con los niveles de CO_2 globales en un periodo de tiempo corto.

El presente trabajo busca evaluar el depósito de C de suelos bajo bosque y pasturas en fincas situadas en paisajes de lomerío con tres niveles de intervención del departamento de Caquetá, estimando el aporte global de C que las tipologías de fincas predominantes efectúan.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

Este trabajo se realizó en el departamento del Caquetá (Colombia), en los municipios de Florencia y Morelia. El departamento de Caquetá se encuentra entre los 270 y los 407msnm, presenta una precipitación media de 3800mm/año y $25,4^{\circ}\text{C}$ de temperatura media. La zona de estudio correspondió a una ventana con un gradiente de intervención y deforestación seleccionada con base en el mapa de cobertura y uso de la Amazonia (SINCHI, 2015). Allí



se seleccionaron 16 fincas con relictos de bosque, y potreros con diferentes edades ubicadas en el paisaje de lomerío, entre los 01°01'53" y los 02°07'45" S; y los 74°53'25" y los 75°94'11" Oeste. Los predios estaban distribuidos en paisajes con diferente nivel de intervención. Los lomeríos con alto nivel de intervención corresponden a paisajes donde el 70% de los suelos está en potreros y menos de 30% en bosques. Los lomeríos con moderada intervención corresponden a paisajes donde la relación de potreros y bosques está entre el 40 y 60%. Los lomeríos con baja intervención corresponden a paisajes donde el bosque ocupa más del 70% del paisaje y los potreros menos del 30%.

Dado que las fincas seleccionadas diferían en sus actividades productivas, se realizó una tipificación sus actividades productivas y del área bajo diferentes usos del suelo. La tipificación se hizo con base en los componentes del sistema finca propuestos por Hart (1990) y ajustados por el Instituto Sinchi para fincas del departamento de Caquetá (SINCHI, 2015). La tipificación se basó en variables de orientación de la producción, variables de cobertura y uso de la tierra, variables de costo de producción, variables de destino de la producción, variables de valorización, variables de origen de la mano de obra, variables del nivel tecnológico, y variables de asociatividad, participación y apoyo institucional.

Muestreo de suelos

Los muestreos de suelos fueron realizados entre los meses de marzo y mayo de 2012. En cada finca previamente seleccionada se identificó la ubicación del relicto de bosque y los diferentes potreros. En el centro de cada uno de ellos se ubicó un área de 1 ha. En una de las esquinas del área seleccionada se trazó una diagonal y 5 puntos de muestreo separados por una distancia aproximadamente de 250m que cubren casi toda la diagonal. En cada punto de muestreo se realizaron 5 cajuelas de 40x40x40cm, una en el punto de muestreo y cuatro en los 4 puntos cardinales del mismo y a 5m del punto central. En cada cajuela se colectó una muestra de aproximadamente 250g de suelo de los primeros 30 cm del suelo, retirando previamente la hojarasca existente. Estas muestras individuales fueron usadas para la determinación de la biomasa

microbiana de los suelos por técnicas de respiración inducida. Adicionalmente, de cada cajuela se colectó una muestra de 100g de suelo del horizonte A, las cuales fueron unidas por punto de colecta, para obtener una muestra compuesta de 500g para el análisis fisicoquímico de los suelos. En cada punto de muestreo se tomó una muestra de suelo con barrenos para muestras no disturbadas y un anillo metálico de 100cm³ para determinar la densidad aparente del suelo y corregir las diferencias entre suelos al momento de hacer los cálculos de fijación de C para cada uno de ellos. Las muestras para determinación de biomasa microbiana fueron transportadas en neveras con hielo hasta su procesamiento en el laboratorio, mientras las otras muestras fueron transportadas a temperatura ambiente y posterior a su transporte conservadas en refrigeración hasta su análisis.

Análisis de laboratorio

Determinación del carbono químico del suelo

Las muestras de suelo fueron analizadas fisicoquímicamente en los laboratorios de Agrilab en Bogotá. El análisis fisicoquímico consistió en un análisis integral de los suelos que comprendió: textura (por Bouyoucos), carbono orgánico (por Walkley-Black), pH (por saturación), fósforo asimilable (por Bray II), potasio, calcio, magnesio y sodio (por extracto en acetato de amonio), aluminio intercambiable (por extracción con cloruro de potasio), hierro, magnesio, hierro y zinc (por Mehlich I).

Adicionalmente, se estimó el carbono orgánico presente en los suelos como ácidos húmicos y fúlvicos por titulación. Análisis realizados por el Grupo Interdisciplinario de estudios Moleculares (GIEM) en los laboratorios de la Universidad de Antioquia, siguiendo el protocolo según la norma NTC 5167 de ICONTEC.

Densidad relativa de los suelos

La estimación de la densidad relativa de los suelos permite corregir el volumen de muestra entre suelos con diferente compactación, para poder comparar la fijación de carbono de las muestras entre

sí (Fearnside and Barbosa, 1998). Cada muestra de suelo no disturbada, recogida en los anillos de 100cm³ fue pesada. Luego de pesarse fue secada en horno a 60°C y pesada diariamente hasta que el peso fue estable. La densidad aparente (D) fue estimada como:

$$D=m/v$$

Donde m es el peso obtenido y v el volumen utilizado.

Estimación del depósito de C del suelo

El depósito de C del cada suelo se estimó de acuerdo a la metodología sugerida por Maia *et al.* (2010) como:

$$C=(C(g \text{ por gramo}) * D \\ * \text{el grosor del horizonte A en metros})$$

Adicionalmente por técnicas de titulación se estimó el carbono orgánico presente como ácidos húmicos y fúlvicos; y el carbono orgánico presente como biomasa microbiana. Para ello, las muestras de suelo fueron previamente tamizadas en un tamiz de poro de 2 mm de diámetro para retirar las raíces y materia orgánica, y mantenidas en refrigeración hasta su procesamiento. Luego las muestras fueron humedecidas y se llevaron al 50% de su capacidad de retención de agua.

Para la determinación de la biomasa microbiana de los suelos (CMIC) se usó la técnica de respiración por sustrato inducido (SIR), evaluando las muestras a capacidad de campo a 30°C por 7 días, sugerida por Ananyeva *et al.* (2008), usando un cromatógrafo de gases equipado con detector de conductividad térmica. SIR es estimado como la máxima tasa de respiración microbiana luego de adicionar glucosa a las muestras de suelo. Para ello, se tomó 1g de suelo de cada muestra y se colocó en un vial de 15 ml. Se añadieron 100µl de solución de glucosa (10 mg de glucosa por g⁻¹de suelo) para un volumen final de 0.1 mm. Los viales se agitaron suavemente y se incubaron a 30°C por 5 horas. Al cabo de ese tiempo usando una jeringa se tomó una muestra del gas de la parte de arriba del vial y se midió en el cromatógrafo de gases la tasa de CO₂ producida por cada muestra. La SIR se expresó en µg CO₂- C g de suelo por hora.

La estimación del carbono de la biomasa microbiana total (Cmic) fue derivada del SIR obtenido, a partir de la siguiente ecuación:

$$Cmic (\mu g C g \text{ de suelo}) = \\ (\mu g CO_2 g \text{ suelo por hora}) \times 40.04 + 0.37$$

Para determinar la variación en la composición microbiana de los suelos y el aporte que las bacterias y los hongos hacen al C obtenido como biomasa microbiana, se utilizó el mismo procedimiento usado para la determinación de SIR, pero con una modificación sugerida por Susyan *et al.* (2011) en la metodología. La modificación consiste en usar tres viales diferentes de la muestra, cada vial se activa con 100µl de glucosa como en el procedimiento anterior, pero adicionalmente se incluyen dos tipos de inhibidores selectivos. Así, a uno de ellos se agrega 100µl de cloranfemicol (50mg g⁻¹ de suelo) para inhibir a respiración de hongos; a un segundo vial se le agrega 100µl de nicostatina (50mg g⁻¹ de suelo) para inhibir la respiración de bacterias; y a un tercer vial se le agrega conjuntamente la misma cantidad de cloranfemicol y de nicostatina usada en los dos viales anteriores. Adicionalmente se usó un vial incubado solo con glucosa como control. Los viales fueron incubados por 5 horas a 30°C. Luego del periodo de incubación con ayuda de una jeringa se tomó una muestra de los gases producidos y acumulados en la parte superior del vial para leer la producción de CO₂ en el cromatógrafo de gases.

Como una medida de control a la prueba, se estimó adicionalmente la tasa de inhibición de actividad microbiana (IAR) por medio de la ecuación:

$$IAR = [(A-B) + (A-C)] / (A-D)$$

Donde A es el CO₂ producido en el suelo con glucosa; B es el CO₂ producido con glucosa y nicostatina; C es el CO₂ producido con glucosa y cloranfemicol; y D es el CO₂ producido con glucosa, nicostatina y cloranfemicol. Un valor de IAR igual a 1.0 indica que no hubo efecto inhibitorio sobre los microorganismos. Un valor de IAR ≥ 1.0 indica que hubo un efecto inhibitorio. Si el valor de IAR ≤ 1.0 indica que los inhibidores tuvieron un efecto de estimulación sobre los microorganismos.

Valorización del carbono acumulado en los suelos

Los valores de C total estimado para cada uno de los suelos, fue valorizado en dólares de acuerdo al valor de referencia para Diciembre de 2012 (año en que se realizaron los muestreos de suelo) en la bolsa de valores de Chicago para la transacción de la tonelada de C fijado por hectárea (U\$ 19,11) y en pesos según la tasa de cambio para Diciembre de 2012 (tasa de cambio del dólar a pesos de \$1.768). Este cálculo buscó estimar el costo del C acumulado en los suelos de las fincas bajo bosque y bajo diferentes usos del suelo, y cuánto se pierde por causa de la degradación de los suelos, como una manera de evidenciar en valores monetarios estas pérdidas.

Análisis estadísticos

Dado el bajo número de fincas muestreadas, se realizó un análisis de varianza ANOVA no paramétrico de Kruskal Wallis de una vía para evaluar las diferencias en los depósitos de carbono de los suelos bajo bosque y bajo otros usos del suelo en paisajes con diferentes niveles de intervención. Cuando el test de Kruskal-Wallis fue significativo, se aplicó una prueba de Tukey para comparar las diferencias en las medias ponderadas de las variables a partir de los rangos

aplicados por la prueba. Las pruebas estadísticas fueron evaluadas con un nivel de confianza de ($p < 0,05$), usando el software Statistix 9.0 (Statistix, 1998).

Resultados

Tipos de finca y uso del suelo en paisajes de lomerío del departamento de Caquetá

Con base en los mapas de unidades geomorfológicas desarrollado por el Instituto Sinchi (SINCHI, 2015), se identificó que en el área intervenida del departamento de Caquetá es posible diferenciar cuatro unidades fisiográficas: Montaña, piedemonte, vega y lomerío. Basados en esta clasificación, se determinó que esas serían las unidades fisiográficas de muestreo. Sin embargo, teniendo en cuenta que el lomerío representa más del 70% del área intervenida (IGAC, 2014) y los sistemas de producción se han desarrollado con mayor fuerza en esta unidad (SINCHI, 2015), se vio la necesidad de valorar con más detalle los sistemas de producción de ésta unidad. Un criterio para subdividir la unidad de lomerío fue el considerar zonas según los grados de intervención. El grado de intervención se refiere a la magnitud de la alteración o cambio de las condiciones naturales que han ocurrido en el área.



Para el desarrollo de la investigación, se asume que: a) los sistemas de producción no son propios de la región y para su establecimiento se requiere de intervención del ecosistema; b) el grado de intervención refleja el impacto ambiental que causan los sistemas de producción, por lo que existe una relación entre sistema, grado de intervención y los impactos; y c) el grado de intervención refleja las acciones de mejoramiento que se podrían proponer. En tal caso, en las zonas más alteradas deben existir acciones de recuperación de la función de producción del sistema, mientras que en zonas de baja intervención se espera acciones preventivas que eviten los procesos de degradación de recursos.

Para determinar los niveles de intervención en la unidad de lomerío, se empleó el mapa de niveles de intervención desarrollado por el Instituto Sinchi (2015). Este mapa se desarrolló a partir del análisis del mapa de coberturas del 2012 generado a escala 1:100000 bajo la metodología de Corine Land Cover, a partir del cual se re-clasifican las coberturas de acuerdo al porcentaje de área intervenida (pastos, cultivos, rastrojos) y las no intervenidas (bosques) y de acuerdo a los porcentajes por pixel del área en bosque se obtienen áreas con alta, media, baja o nula intervención. La unidad de lomerío tiene estos cuatro niveles de intervención, pero para este estudio la categoría de nula intervención no fue incluida.

Las fincas muestreadas presentaban diferentes actividades productivas en relación con el nivel de intervención de los paisajes en donde se localizaban. Las fincas ubicadas en paisajes con alto nivel

de intervención correspondieron a fincas de ganadería semiempresarial (GaS), a fincas agropecuarias semiempresariales (AgpS), y a fincas de ganadería empresarial (GaE), con una frecuencia del 35.7%, 25% y 17.8% respectivamente. En paisajes con moderado nivel de intervención las tipologías de fincas presentes correspondieron a fincas de ganadería semiempresarial, fincas agropecuarias semiempresariales (AgpS), y fincas agrícolas semiempresariales (AgS), con una frecuencia del 45% para las fincas de ganadería semiempresarial, y de 15% para las fincas agropecuarias y agrícolas semiempresariales. En paisajes con bajo nivel de intervención se ubicaron las fincas de vocación agropecuaria avícola familiar (AgpAvF), fincas ganaderas semiempresariales, y fincas ganaderas familiares (GaF), con una frecuencia del 26.3%, 23.6% y 21.5% respectivamente.

En general, el tamaño de las fincas no tuvo relación con la tipología de la finca o del nivel de intervención del paisaje circundante (Tabla 1). Sin embargo, fincas dedicadas a la ganadería empresarial fueron significativamente más grandes que las fincas de otras tipologías (Tabla 1). En promedio las fincas de ganadería empresarial fueron tres veces más extensas que las fincas con otras tipologías. El área bajo pastos en las diferentes fincas tampoco estuvo relacionada con el nivel de intervención del paisaje en donde estaban ubicadas (Tabla 1), pero donde claramente la actividad productiva determina el tamaño del área en pastura del predio. Las fincas con énfasis en la ganadería tenían más del 60% del predio en pasturas, mientras que en fincas con énfasis en la agricultura tenían menores áreas en pasturas (Tabla 1).

TABLA 1. USO DEL SUELO POR TIPOLOGÍAS DE FINCAS PREDOMINANTES EN DIFERENTES NIVELES DE INTERVENCIÓN ANTRÓPICA EN EL DEPARTAMENTO DE CAQUETÁ.

Paisaje	Tipo de finca	Uso del suelo						Total (ha)
		Bosque		Pastura		Otros		
		ha	%	ha	%	ha	%	
LAI	GaS	8.9	1.3	56.3	68.7	16.7	30.0	81.9
	AgpS	10.9	1.3	34.6	39.1	43.0	59.6	88.5
	GaE	46.6	0.3	354.4	78.5	50.2	21.2	451.2
LMI	GaS	5.2	1.1	67.7	72.0	21.1	26.9	94.0
	AgpS	23.5	1.3	42.7	45.1	28.5	53.6	94.7
	AgS	11.5	0.9	85.7	65.7	33.2	33.4	130.4
LBI	AgpAvF	63.5	1.2	38.9	28.5	34.3	70.3	136.7
	GaS	6.6	1.3	52.8	64.6	22.3	34.1	81.7
	GaF	11.1	1.7	40.7	63.0	12.8	35.3	64.6

Tipo de fincas: ganadero semiempresarial (GaS); agropecuario semiempresarial (AgpS); ganadero empresarial (GaE); agrícola semiempresarial (AgS); agropecuario avícola familiar (AgpAvF); y ganadero familiar (GaF). Tipo de paisaje donde se ubican los predios: Lomerío con alto nivel de intervención (LAI); lomerío con mediano nivel de intervención (LMI); y lomerío con bajo nivel de intervención (LBI).

Las áreas de las fincas bajo una cobertura diferente a las pasturas era en general menor al 35% de sus predios a excepción de las fincas con tipología agropecuario semiempresarial y agropecuario avícola familiar. De todos los posibles usos del suelo existentes en las fincas, las áreas en bosque fueron las más pequeñas, representando entre el 0.3 y el 1.7% del área total de los predios, sin diferencias significativas entre las diferentes tipologías de finca. Sin embargo, por el tamaño de los predios, las fincas ganaderas empresariales conservan los relictos más grandes de bosque, con áreas de 63 hectáreas en promedio.

Depósitos de carbono de los suelos

Como era esperado, existió una diferencia significativa entre los depósitos de C de suelos bajo bosque comparado con los depósitos de C de los suelos

bajo praderas ($p < 0.01$). En general, los suelos de bosque presentaron mayores depósitos de C que los suelos bajo praderas. Sin embargo, hubo una diferencia significativa en el C orgánico acumulado en los suelos de bosque ($p = 0.03$) en relación al nivel de intervención del paisaje donde estaban localizadas las fincas. Los suelos de los relictos de bosque de predios localizados en paisajes con moderada intervención presentaron depósitos de C significativamente más bajos que en los paisajes con alta o baja intervención. La cantidad de C acumulado en los suelos bajo pastura, no tuvo diferencias significativas entre los diferentes predios, independientemente del nivel de intervención del paisaje donde las fincas estuvieron situadas. En general, los suelos de lomeríos con moderada intervención fueron los que presentaron los depósitos más bajos de C tanto en bosque como en pastura (Tabla 2).

TABLA 2. ESTIMACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE CARBONO LÁBIL DE LOS SUELOS BAJO BOSQUE Y PASTURA DE FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CAQUETÁ LOCALIZADAS EN PAISAJES DE LOMERÍOS CON DIFERENTE NIVEL DE INTERVENCIÓN. VALORES EXPRESADOS COMO EL PROMEDIO CON LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN PARÉNTESIS.

Paisaje	CO (Ton C * ha ⁻¹)		C como ácidos húmicos y fúlvicos (Ton C * ha ⁻¹)		C como biomasa microbiana (µg/ g suelo)	
	Bosque	Potrero	Bosque	Potrero	Bosque	Potrero
LAI	13.5 (7.6)	10.5 (8.5)	2.3 (1.3)	2.2 (1.1)	14406.3	16186.1
LMI	6.9 (0.1)	10.1 (2.4)	1.8 (0.5)	1.8 (0.9)	5275.8	8545.2
LBI	29.3 (24.8)	12.8 (0.9)	3.4 (0.2)	2.1 (0.8)	5103.7	6946

Depósitos de carbono lábil determinados: carbono orgánico (CO), ácidos húmicos y fúlvicos, y biomasa microbiana. Paisaje: Lomerío con praderas con alta (LAI), moderada (LMI) y baja intervención (LBI).

La porción de C acumulada como ácidos húmicos y fúlvicos no fue significativamente diferente entre los suelos bajo bosque o pastura. Además fue independiente del nivel de intervención de los paisajes (Tabla 2). Los ácidos húmicos y fúlvicos representaron entre el 16 y el 26% del carbono orgánico presente en los suelos y fueron en general formas estables de C que se mantuvieron en el suelo a pesar de la transformación de la cobertura de bosque a pastura.

En la mayoría de los suelos los depósitos biológicos de C estuvieron dominados por biomasa bacteriana. En general, la biomasa microbiana aumentó en el suelo con la transformación del bosque a pastura (Tabla 2). Sin embargo, el aumento de la biomasa microbiana no correspondió a un mismo grupo de

microorganismos en todos los casos (Figura 1). Lo anterior indica que la composición microbiológica de los suelos y por ende los depósitos de C como biomasa microbiana puede diferir por diversas causas y no necesariamente por un cambio en la cobertura o uso del suelo, siendo un depósito dinámico y poco estable en el suelo.

Estimación del valor de C acumulado en los suelos de fincas del departamento de Caquetá

La mayoría de relictos de bosque de las fincas muestreadas fueron las áreas en donde los suelos fijan más C mientras que la mayoría de las pasturas fijaron menos C. Al hacer el cálculo de las áreas bajo

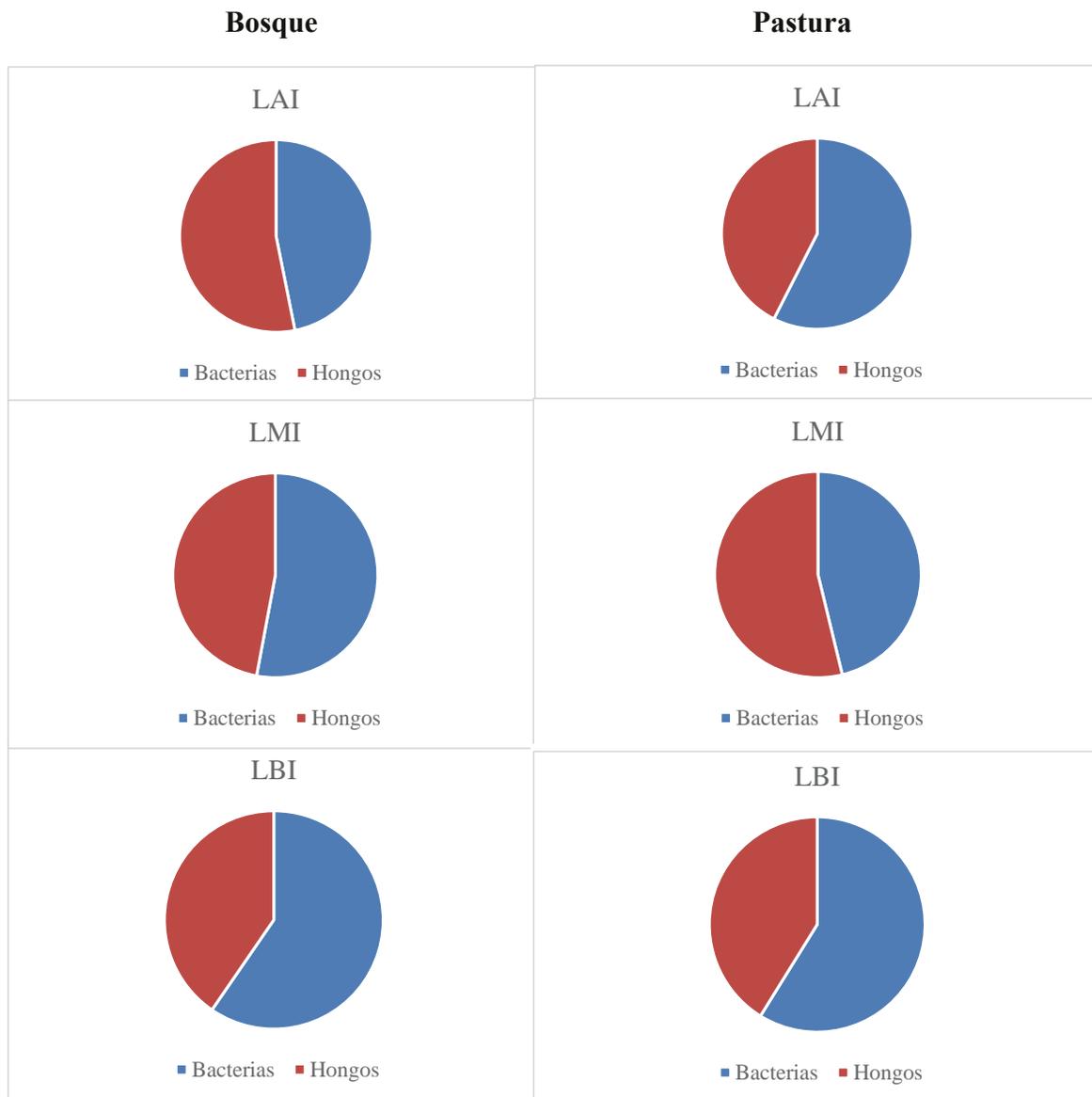


FIGURA 1. COMPOSICIÓN DEL C MICROBIANO DEL SUELO COMO PORCENTAJE DE BIOMASA BACTERIANA Y BIOMASA FÚNGICA ESTIMADA POR LA TÉCNICA SIR EN RELICTOS DE BOSQUE Y PRADERAS EN POTREROS CON ALTA (LAI), MODERADA (LMI) Y BAJA INTERVENCIÓN (LBI) DE FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CAQUETÁ.

bosque como áreas de depósito de C menos el área en pasturas que en su mayoría fijan menor C que los bosques, excepto en lomeríos con moderada intervención donde fijan más, se obtiene un valor de fijación de C de los predios positivo en caso que los predios siguen siendo acumuladores de C o negativo en caso que los predios han perdido C y han emitido C al medio (Figura 2).

Si se hace un balance de los aportes o pérdidas en los depósitos de C de los suelos por tipos de finca

muestreados, se encuentra que en general las fincas del departamento de Caquetá dedicadas a la ganadería han contribuido mucho más a aumentar las emisiones de C provenientes que las fincas con vocación agropecuaria o agrícola (Figura 2). Las fincas ubicadas en zonas con alta y baja intervención presentaron los mayores depósitos de C en suelos bajo bosques. Dependiendo del área en bosque de cada una de las tipologías de finca, las reservas de C en los suelos de estos bosques fueron valorizadas entre los \$3.381.00 y los \$70.169.000.

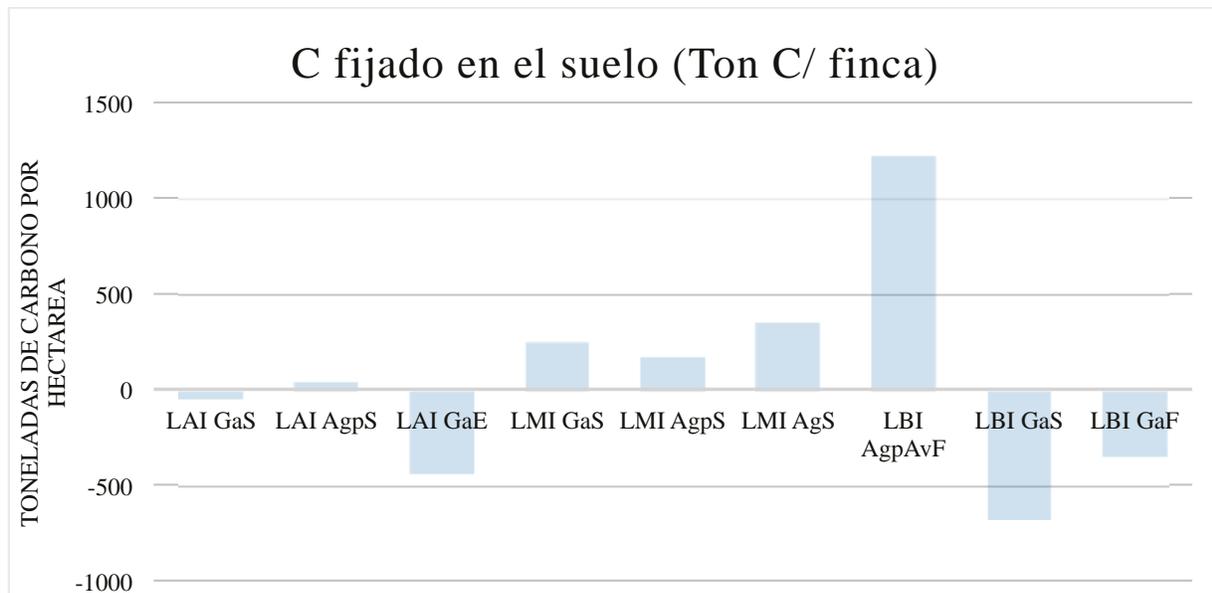


FIGURA 2. BALANCE DE LOS DEPÓSITOS DE C EN FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CAQUETÁ SITUADAS EN PAISAJES DE LOMERÍOS CON DIFERENTE NIVEL DE INTERVENCIÓN

Cuando estos bosques son talados y transformados en pasturas, los suelos pierden entre el 19.6% (para fincas con pasturas con alta intervención) y el 54.4% (para fincas con pasturas con baja intervención) de la capacidad de fijación de C que poseían.

Es importante destacar que aun cuando las fincas muestreadas son predios con vocación productiva y no de conservación, algunas de las tipologías de

fincas poseen valores positivos para los depósitos de C de sus predios, independientemente de que buena parte del predio haya sido transformado en pasturas o zonas de cultivo (cuyos aportes de C no fueron estimados en este trabajo). Los depósitos de C en los suelos de esas fincas tienen un valor aproximado que oscila entre el \$1.500.000 y los \$41.200.000 (Tabla 3).

TABLA 3. APORTES ESTIMADOS EN DÓLARES Y PESOS COLOMBIANOS DE LA FIJACIÓN DE CARBONO DE SUELOS BAJO BOSQUE Y PRADERA DE FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CAQUETÁ.

Paisaje	Tipo de finca	Aportes o pérdidas totales de C	Valor comercial de los depósitos de C de los suelos	
			Dólares americanos	Pesos colombianos
LAI	GaS	-48.5	U\$ -927,6	\$ -1.639.995,7
	AgpS	43.1	U\$823,5	\$ 1.456.028,4
	GaE	-434.1	U\$ -8295,6	\$ -14.666.711
LMI	GaS	252.5	U\$ 4825,1	\$ 8.530.849,7
	AgpS	174.8	U\$3339,8	\$ 5.904.863,1
	AgS	353.7	U\$6760,2	\$ 11.951.967,3
LBI	AgpAvF	1217.8	U\$23272,6	\$41.145.884,9
	GaS	-678.0	U\$ -12956,3	\$ -22.906.726,6
	GaF	-346.0	U\$ -6611,5	\$ -11.689.209,8

Paisajes: Lomerío con pasturas con alta intervención (LAI), moderada intervención (LMI) y baja intervención (LBI).

Tipo de fincas: ganaderas familiares (GaF), ganaderas semiempresariales (GaS), ganaderas empresariales (GaE), agropecuarias semiempresariales (AgpS), agrícolas semiempresariales (AgS), y agropecuarias avícolas familiares (AgpAvF).



DISCUSIÓN

El depósito de C estimado para los bosques tropicales, incluyendo los bosques amazónicos, oscila entre 120 y 250 Ton C por hectárea (Malhi *et al.*, 2006; Lai, 2008; Pan *et al.*, 2011). Igualmente se estima que el depósito de C en el suelo de estos bosques corresponde entre un 10 y 32% del aporte que hace la biomasa vegetal (Malhi *et al.*, 2006; Pan *et al.*, 2011). El depósito de C en suelos bajo bosque de fincas ubicadas en paisajes de lomerío del departamento de Caquetá fue estimado entre 8.7 y 32.7 Ton C por hectárea. Este servicio ecosistémico no es comúnmente valorado en estos predios por ser un servicio intangible que no representa un beneficio directo al productor. Por ello las áreas de bosque en las fincas muestreadas no son consideradas parte del sistema productivo y no superan el 1.7% del área total de los predios. Si los valores de fijación de C estimados en este trabajo fueran ingresos efectivos para los propietarios de estas fincas, ellos propenderían por dejar una mayor área en bosque y a hacer un manejo adecuado del suelo para garantizar la menor pérdida posible de C. A la fecha esos incentivos no están disponibles, pero dada la necesidad de contemplar diferentes alternativas que conjuntamente ayuden a controlar las emisiones de gases

invernadero, los depósitos de C del suelo podrían llegar a ser incluidos en incentivos por secuestro de carbono en un futuro.

Los depósitos de C en el suelo de los relictos de bosque en zonas con alta y baja intervención son similares a los valores encontrados por Cerri y colaboradores (2003) y corresponden a valores entre el 13 y el 27% de lo que se acumula en la biomasa del bosque, valores acordes con estimaciones previamente obtenidas. Sin embargo, los depósitos de C de bosques en zonas con moderada intervención estuvieron por debajo de los valores promedio reportados en previos trabajos, representando solo el 7,2% de lo que se fija un bosque en pie. El presente trabajo no pudo explicar la causa de estos depósitos de C tan bajos en el suelo, pero presumiblemente estaría evidenciando relictos de bosque con una alta intervención. Las fincas donde predominan las praderas de moderada intervención tienen una vocación más agrícola que ganadera. En este tipo de finca, el bosque es una despensa de materiales de construcción, alimentos suplementarios para animales (frutos de palma por ejemplo) y abono para sus sistemas productivos teniendo un uso marcado. En los sistemas de ganadería los bosques son vistos como “una reserva de áreas para nuevos potreros”

(Rodríguez *et al.*, 2013), por lo que las zonas boscosas no hacen parte directa o importante del sistema productivo de la finca, teniendo una menor intervención y permitiendo una mejor conservación de los mismos, que se refleja para este caso particular en los depósitos de C de los suelos.

Los usos del suelo se vieron reflejados igualmente en los depósitos de C allí existentes. En el caso de las praderas con moderada intervención, se observó un aumento en la capacidad de fijación de C respecto al bosque. Es posible que las prácticas agropecuarias de manejo de diversos cultivos, estiércoles, abonos entre otros, así como el bajo número de animales en los potreros, dado que la ganadería no es su principal actividad, hayan permitido una mayor acumulación de C en estas praderas, incrementando así la fijación de C en un 27% respecto al bosque. Estos resultados indican que es posible mantener o mejorar la capacidad de fijación de C de los suelos, disminuyendo así las emisiones de CO₂ a la atmósfera por actividades productivas.

Se pudo evidenciar que las comunidades microbianas de los suelos de bosque están compuestas por poblaciones de bacterias y hongos en proporciones que varían. La transformación de los bosques en praderas aumenta la biomasa microbiana en el suelo. La abundancia de bacterias y de hongos en el suelo varía, siendo en algunos casos favorecidas las poblaciones de bacterias y en algunos casos las de hongos, sin una relación clara con el nivel de intervención o uso de los suelos. El C del suelo como biomasa microbiana es un depósito muy pequeño comparado con el depósito de C como ácidos húmicos o fulvicos. Algunos autores han indicado que la composición microbiológica de los suelos no influye significativamente en los depósitos de carbono de los mismos (Busse *et al.*, 2009; Throckmorton *et al.*, 2012). Otros autores por el contrario indican que los suelos en los que las comunidades fúngicas dominan, tienden a incrementar su fijación de C ya que el micelio de los hongos interviene en la formación de agregados que estabilizan y previenen la materia orgánica de una rápida intervención (Six *et al.*, 2006; King, 2011). Nuestros resultados apoyan las observaciones hechas por King, Six y colaboradores ya que en aquellos suelos de pasturas donde se habían incrementado los depósitos de C en

comparación con los suelos de bosque eran dominados por comunidades de hongos.

En el presente trabajo se corrobora que la transformación del bosque en pasturas aumenta las emisiones de C. Para nuestro caso esta transformación equivale a aproximadamente 20 Ton C por hectárea, sin incluir el aporte que hace adicionalmente el bosque al ser talado. Fearnside y Barbosa (1998) indican que luego de la transformación del bosque en praderas y en la pérdida de C del suelo, el ecosistema se estabiliza con unos depósitos menores de C a los iniciales. El presente trabajo soporta esta observación previa, ya que la capacidad de fijación de C de los suelos de baja y alta intervención no fue muy diferente entre sí a pesar de las diferencias en su nivel de intervención.

Son varios los proyectos que a nivel mundial promocionan la conservación de los bosques en pie (Laurance, 2007), la deforestación evitada (tipo proyectos REDD), y las iniciativas de pago por fijación de carbono en diversas coberturas (Locatelli *et al.*, 2008). Una de las críticas a esas iniciativas es que no vinculan las actividades productivas de las comunidades, sino que los llevan a “dejar de hacer” lo que cotidianamente vienen haciendo (Romero and Andrade, 2004). Este trabajo indica que no solo los bosques son importantes fuentes de secuestro de carbono sino que también lo pueden ser las áreas intervenidas por actividades antrópicas como lo son las fincas y sus diversas tipologías. En ellas se pueden estimular actividades productivas más sostenibles que mantienen o aumentan los depósitos de C en el suelo como alternativas que aportan a la mitigación del cambio climático, que en un futuro pudieran también ser reconocidas y valoradas. Grimaldi *et al.* (2014) encontraron que para el departamento de Caquetá los cultivos perennes establecidos en la región degradaban menos los suelos que las pasturas y por ende tenían mayores depósitos de C. Nuestros resultados van más allá y demuestran que no solo usos particulares del suelo pueden acumular más C sino que fincas con áreas bajo diferentes usos pueden igualmente ser fijadoras efectivas de C. Así se puede afirmar que las actividades agropecuarias y agrícolas en áreas de la región amazónica dominadas por suelos altamente evolucionados son más sostenibles que las actividades ganaderas en términos de fijación de C a nivel de los suelos.

CONCLUSIONES

Los suelos en paisajes de lomerío del departamento de Caquetá tienen una capacidad de fijación de C similar a la reportada previamente para otros suelos tropicales. Su capacidad de fijación de C se ve afectada cuando los bosques son transformados en pasturas, disminuyendo así sus depósitos de C. Los resultados indican que tanto áreas con coberturas boscosas como áreas bajo actividades antrópicas pueden presentar depósitos de C altos, por cuanto no se puede asumir *a priori* que solo los suelos bajo coberturas boscosas hacen aportes significativos en el secuestro de C. Dada la cantidad de C que puede ser almacenada en el suelo y la rapidez con que estos depósitos de C pueden variar, se recomienda incluir dentro de las estimaciones de los depósitos de carbono de los diferentes ecosistemas naturales y antrópicos el aporte de los suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ananyeva, ND, EA Susyan, OV Chernova, S Wirth. 2008. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia. *European Journal of Soil Biology* 44: 147-157.
- Busse MD, FG Sanchez, AW Ratcliff, JR Butnor, EA Carter, RF Powers. 2009. Soil carbon sequestration and changes in fungal and bacterial biomass following incorporation of forest residues. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 220-227.
- Cerri CEP, K Coleman, DS Jekinson, M Bernoux, R Victoria, CC Cerri. 2003. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. *Soil Sciences Society of America* 67: 1879-1887.
- Fearnside PM, RI Barbosa. 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 108: 147-166.
- Grimaldi M, J Oszwald, S Dolédec, MP Hurtado, IS Miranda, XA Sartre, WS Assis, E Castañeda, T Desjardins, F Dubs, E Guevara, V Gond, TTS Lima, R Marichal, F Michelotti, D Mitja, NC Noronha, MND Oliveira, B Ramirez, G Rodriguez, M Sarrazin, MLS Junior, LGS Costa, SL Souza, I Veiga, E Velasquez, P Lavelle. 2014. Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. *Landscape Ecology* 29: 311-328.
- Hart R. 1990. Componentes, subsistemas y propiedades del sistema finca como base para un método de clasificación. Tipificación de sistemas de producción agrícola, Bogotá. 248 p.
- IGAC. 1979. Proyecto radargravimétrico del Amazonas PRORADAM. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá. 590 p.
- IGAC. 2014. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Caquetá, escala 1: 100.000. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. IGAC, Bogotá. 212 p.
- King GM. 2011. Enhancing soil carbon storage for carbon remediation: potential contributions and constraints by microbes. *Trends in Microbiology* 19: 75-84.
- Lai R. 2008. Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. *Journal of Sustainable Forestry* 21: 1-30.
- Laurance WF. 2007. A new initiative to use carbon trading for tropical forest conservation. *Biotropica* 39: 20-24.
- Locatelli B, V Rojas, Z Salinas. 2008. Impacts of payments for environmental services on local development in northern Costa Rica: A fuzzy multicriteria analysis. *Forest Policy and Economics* 10: 275-285.
- Maia SMF, SM Ogle, CC Cerri, CEP Cerri. 2010. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *Soil & Tillage Research* 106: 177-184.
- Malhi YR, JT Roberts, RA Betts, TJ Killeen, W Li, CA Nobre. 2008. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science* 319: 169-172.
- Malhi YR, D Wood, TR Baker, JS Wright, OL Phillips, T Cochrane, P Meir, J Chave, S Almeida, L Arroyo, N Higuchi, TJ Killeen, SG Laurance, WF Laurance, SL Lewis, A Monteagudo, DA Neill, PN Vargas, NCA Pitman, CA Quesada, R Salomão, JNM Silva, AT Lezama, J Terborgh, RV Martínez, B Vicenti. 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forest. *Global Change Biology* 12: 1107-1138.
- Marichal R, M Grimaldi, A Feijoo, J Oszwald, C Praxedes, DHR Cobo, MP Hurtado, T Desjardins, MLS Junior, LGS Costa, IS Miranda, MND Oliveira, GG Brown, S Tsélouiko, MB Martins, T Decaëns, E Velasquez, P Lavelle. 2014. Soil macroinvertebrate communities and ecosystem

- services in deforested landscapes of Amazonia. *Applied Soil Ecology* 83: 177-185.
- Murcia GUG, MC Huertas, JM Rodríguez, HO Castellanos. 2011. Monitoreo de los bosques y otras coberturas de la Amazonia colombiana, a escala 1:100.000. Cambios multitemporales en el período 2002 al 2007. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, Bogotá, Colombia. 226 p.
- Orjuela-Chavez, JA, HJ Andrade, Y Vargas-Valenzuela. 2014. Potential of carbon storage of rubber (*Hevea brasiliensis* MÜL. ARG.) plantations in monoculture and agroforestry systems in the Colombian Amazon. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 17: 231-240.
- Pan Y, RA Birdsey, JG Fang, R Houghton, PE Kauppi, WA Kurz, OL Phillips, A Shvidenko, SL Lewis, JG Canadell, P Ciais, RB Jackson, SW Pacala, AD McGuire, S Piao, A Rautiainen, S. Sitch, D Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.
- Quesada CA, J Lloyd, M Schwarz, S Patiño, TR Baker, C Czimczik, NM Fyllas, L Martinelli, GB Nardoto, J Schmerler, AJB Santos, MG Hodnett, R Herrera, FJ Luizão, A Arneeth, G Lloyd, N Dezzeo, I Hilke, I Kuhlmann, M Raessler, WA Brand, H Geilmann, JOM Filho, FP Carvalho, RNA Filho, JE Chaves, OFC Junior, TP Pimentel, R Paiva. 2010. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences* 7: 1515-1541.
- Rodríguez CH, M Zubieta, J Barrera, B Betancurt, B Giraldo, S Castro, T Garzon. 2013. Caracterización y tipificación de los sistemas de producción en el área intervenida del departamento de Guaviare. In: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, (Ed.). Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, Florencia, Caquetá. 172 p.
- Romero C, GI Andrade. 2004. International conservation organizations and the fate of local tropical forest conservation initiatives. *Conservation Biology* 18: 578-580.
- SINCHI 2015. Línea base para el monitoreo de la sostenibilidad de los sistemas productivos agropecuarios en el departamento de Caquetá. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, Bogotá, Colombia. 242 p.
- Six J, SD Frey, RK Thiet, KM Batten. 2006. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 70: 555-569.
- Statistix. 1998. Statistix for Windows user's manual analytical software. Tallahassee. 94 p.
- Susyan EA, S Wirth, ND Ananyeva, EV Stolnikova. 2011. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia e Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity. *European Journal of Soil Biology* 47: 169-174.
- Throckmorton HM, JA Bird, L Dane, MK Firestone, WR Horwath. 2012. The source of microbial C has little impact on soil organic matter stabilisation in forest ecosystems. *Ecology Letters* 15: 1257-1265.

