

**ESTIMACIÓN DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE
CACAO (*Theobroma cacao L*) y LAUREL (*Cordia alliodora*) EN DIFERENTES
CONDICIONES DE PAISAJE EN LA RESERVA INDIGENA DE TALAMANCA,
COSTA RICA¹**

**CARBON ESTIMATES IN AGROFORESTRY SYSTEMS WHIT COCOA
(*Theobroma cacao L*) AND LAUREL (*Cordia alliodora*) IN DIFFERENTS
LANDSCAPE CONDITIONS IN THE *RESERVA INDIGENA DE TALAMANCA*,
COSTA RICA**

Tania Mavel Espin Chiong²

Rolando Cerda Bustillos³

RESUMEN

Se estimó la capacidad de almacenamiento de carbono en 36 parcelas de sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao L*) y laurel (*Cordia alliodora*) (SAF CL) distribuidas en las comunidades de Namuwokir, Soki, Watsi, y Amubri; en el territorio indígena de Talamanca, Costa Rica. La investigación se realizó entre Octubre del 2009 y Mayo del 2010, periodo en el que se evaluó y estimó el carbono almacenado arriba del suelo (hojarasca, necromasa, biomasa aérea) y bajo suelo (raíces fina, raíces gruesas y suelo) con la metodología propuesta por el IPCC (2003) y Segura (2005). Adicionalmente se evaluó la influencia de diferentes condiciones de paisaje: valle y loma teniendo en cuenta variables como: altura sobre el nivel del mar, porcentaje de pendiente, textura y estructura

¹ Artículo presentado como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Agroforestal. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. 2010.

² Estudiante Ingeniera Agroforestal. Universidad de Nariño. e-mail: tani.chi.ong@hotmail.com

³ I. AG. M. Sc. Supervisor Proyecto Cacao En CentroAmerica.CATIE. rolancer@hotmail.com

del suelo, densidad aparente (da), abundancia de especies maderables, frutales, cacao, musáceas y palmáceas, riqueza de especies, y biomasa por componente del SAF CL sobre la capacidad de almacenamiento de Carbono en los componentes del SAF CL.

El almacenamiento de carbono en este estudio reportó un potencial de almacenamiento de carbono (C) promedio de 114,32 tonC/ha, se identificó como mayor reservorio de C a los componentes del SAF CL bajo suelo almacenando en promedio 59,57 tonC/ha participando con el 53,56% del carbono total almacenado por el sistema; los volúmenes de carbono almacenado bajo suelo se distribuyeron así: el componente raíces gruesas almacenó 9,26 tonC/ha (7,87%), raíces finas almacenó 1,23 tonC/ha (1,12%); y el componente suelo almacenó en promedio 49,08 tonC/ha constituyéndose como el mayor reservorio de carbono del SAF CL almacenando un promedio de 49,08 tonC/ha representando el 44,57% del carbono total almacenado.

El carbono almacenado arriba del suelo por su parte almacenó en promedio 54,52 tonC/ha representando el 46,44% del C total almacenado por el SAF CL; la biomasa arbórea (fuste, ramas y hojas) almacenó en promedio 45,90 tonC/ha (38,68%); la necromasa con diámetro mayor a 10cm almacenó 6,18 tonC/ha (5,56%); la necromasa con diámetro entre 2,5cm y 10cm de diámetro almacenó 1,21 tonC/ha (1,09%); la hojarasca almacenó 1,23 tonC/ha (1,11%).

Con respecto a la influencia de las condiciones de paisaje sobre el almacenamiento de C en el SAF CL, se determinó que las parcelas distribuidas en loma tienen un mayor potencial de almacenamiento. Se obtuvo una alta correlación o influencia con variables como: altura sobre el nivel del mar, porcentaje de pendiente, porcentaje de arcillas, porcentaje de agregados entre 2-8mm, abundancia de frutales, cacao, y palmáceas, riqueza de especies y biomasa por cada componente (biomasa arbórea, hojarasca, necromasa y raíces finas y gruesas).

PALABRAS CLAVES: SAF, carbono almacenado, biomasa arbórea, necromasa, hojarasca, riqueza de especies, abundancia de especies.

ABSTRACT

The capacity of carbon sequestration was estimated in 36 plots of cacao (*Theobroma cacao*) and laurel (*Cordia alliodora*) (CL) under agroforestry systems of the communities Namuwokir, Soki, Watsi and Amburi communities, in Talamanca (Costa Rica). This research was developed during October 2009 and May 2010. The captured carbon above the ground (litter, necromass and aerial biomass) and underground (thin roots, thick roots and soil), was estimated and assessed using the methodology proposed by IPCC (2003) and Segura (2005). Additionally, the influence of different landscape conditions in knoll and valley, elevation, slope, richness and abundance of species and biomass per CL agroforestry system) were evaluated too.

The results reported an average potential level of carbon sequestration capacity of 114,32 tonC/ha, and was identified the underground components as the major carbon reservoirs, which captured in average 59,57 tonC/ha, contributing with the 53,56% of the total captured carbon, whilst the above ground components captured in average 54,52 tonC/ha (46,4%). The levels of carbon captured by each component were 45,90 tonC/ha for aerial biomass (36,68%), 6,18 tonC/ha for 10 cm diameter necromass (5,56%), 1,21 tonC/ha for 2,5-10 cm diameter necromass (1,09%), for litter of 1,23 tonC/ha; for thick roots of 6,18tonC/ha, and for thin roots of 1,23tonC/ha. The soil component was identified as the major carbon reservoir of the system because it captures 49,08 tonC/ha. Regarding the influence of the landscape conditions on the carbon sequestration capacity in the different components of the agroforestry system, was obtained a major carbon sequestration capacity in agroforestry systems in knoll and was identified a high correlation between variables such as elevation, slope, soil texture, richness and abundance of species and biomass of each system component.

KEY WORDS: Agroforestry Systems (SAF), carbon sequestration capacity, necromass, litter, aerial biomass, richness and abundance of species.

INTRODUCCION

El clima global está siendo alterado significativamente debido a un progresivo aumento en las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) tales como el Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Oxido Nitroso (N_2O) y Clorofluorocarbonos (CFC) y vapor de agua, que contribuyen a un incremento global de la temperatura debido a la absorción de gran parte de la radiación solar infrarroja que la tierra emite al espacio (Zaros, 2007, IPCC 2007).

Estos GEI son generados comúnmente por el ser humano o también por fuerzas naturales (FAO, 2007), actividades como constantes cambios en el uso de la tierra, la deforestación, el uso masivo de combustibles fósiles con fines industriales y de transporte son considerados como factores potenciales que inducen al cambio climático amenazando al medio ambiente global (Dixon, 1995, Brown 1992) afectando la salud humana, la seguridad alimentaria, la economía mundial (Euguren, 2004), los ecosistemas naturales, y los recursos naturales (IPCC, 2007 CEPAL, 2009).

Estudios reportados por el IPCC (2007) dan a conocer que las emisiones de gases efectos invernadero (GEI) anuales crecieron entre 1970 y 2004 alrededor de 80%, se apreció que el crecimiento ha sido continuo y ha pasado de 21 hasta 38 Gigatoneladas (Gt), representando el 77% del total de GEI en 2004. Las emisiones de carbono crecieron considerablemente durante el período de 1995 a 2004 (0.92 Gt de CO_2 /año) respecto al periodo de 1970 a 1994 con emisiones por el orden de 0.43 Gt de CO_2 /año.

Por esta razón la mitigación del cambio climático y sus posibles efectos sobre presentes y próximas generaciones se ha convertido en un reto primordial para la economía y la ciencia dedicada a la conservación del medio ambiente. Una forma de mitigar el cambio climático radica en reducir las concentraciones de CO_2 mediante la implementación de SAF's los

cuales capturan el CO₂ de la atmosfera y lo almacenan en la biomasa aérea, subterránea y suelo, manteniéndolos por largos periodos de tiempo (Gayoso *et al*, 2005).

Los SAF CL han sido de gran importancia para proyectos ambientales en Talamánca, Costa Rica. En los últimos años gracias a la intervención del Centro Agronómico Tropical en investigación y Enseñanza (CATIE) y organizaciones indígenas como ADITIBRI, ADITICA, ACOMUITA, el Banco mundial, y el Ministerio de medio ambiente de Costa Rica, se han realizado diversas investigaciones con miras a promover la conservación del medio ambiente, mitigación del cambio climático y un pago por servicios ambientales nacional. Sin embargo las investigaciones realizadas con respecto a captura de carbono en agroforestería siguen siendo pocas en comparación con otros usos de la tierra como bosques y plantaciones forestales (Andrade e Ibrahim, 2003).

La escasa información con respecto a la cuantificación del volumen de carbono almacenado en estos SAF's bajo la influencia de diferentes condiciones de paisajísticas han impedido lograr en cierto modo un pago por servicios ambientales en la zona, siendo necesario desarrollar y promover más investigaciones encaminadas a cuantificar la cantidad de biomasa y carbono en estos SAF's para lograr consolidar a corto plazo la venta de créditos de Carbono en mercados voluntarios, y servir de apoyo para la formulación de políticas nacionales referentes a pago por servicios ambientales de fijación de carbono atmosférico y mitigación de cambio climático (IPCC, 2005).

Los objetivos de la investigación comprenden: estimar el carbono almacenado arriba y bajo suelo en SAF CL y determinar la influencia de las condiciones paisajísticas valle y loma sobre el almacenamiento de carbono.

METODOLOGIA

La investigación se llevó a cabo durante 7 meses, comprendidos entre octubre del 2009 y mayo del 2010, el estudio se aplicó en 36 parcelas establecidas con SAF con Cacao

(*Theobroma cacao L*) y Laurel (*Cordia alliodora*) distribuidas en las comunidades de Namuwokir, Soki, Watsi, y Amubri; Territorios pertenecientes a la reserva indígena de Talamánca, en la provincia de Limon al suroeste de la zona Atlántica, ubicada entre los 9°00' - 9°50' latitud Norte y 82°35' - 83°05' longitud Oeste, con una precipitación anual promedio de 2500 mm y una temperatura media anual que oscila entre 24-27°C (Mena 2001).

Las 36 parcelas en estudio hacen parte de la red de parcelas permanentes de investigación seleccionadas anteriormente para la formulación de la línea base del proyecto captura de carbono (Segura, 2005), ejecutado por el Proyecto Cacao en Centroamérica; La selección de las parcelas se hizo en fincas establecidas con SAF con Cacao (*Theobroma cacao*) y Laurel (*Cordia alliodora*) que se desarrollaran en la mayor diversidad de situaciones paisajísticas como elementos topográficos (cerros, llanuras, montañas, lomas, ríos y quebradas, etc.), y elementos vegetales (grandes usos de la tierra : bosques, SAF, cultivos anuales, Musáceas, suelo desnudo/rocas) (PCC, 2005) .

Para la selección de las condiciones paisajísticas y variables a evaluar para determinar la influencia sobre el almacenamiento de carbono en los SAF CL se tuvo en cuenta datos reportados en investigaciones del Proyecto Cacao en Centroamérica, ejecutadas en la misma red de parcelas. Esta investigación utilizó como condiciones de paisaje valle y loma y se tuvieron en cuenta variables a evaluar como: condiciones de suelo (textura y estructura), condiciones topográficas (altura sobre el nivel del mar y porcentaje pendiente), abundancia y riqueza de especies (musáceas, palmáceas, frutales, maderables y cacao), biomasa por componente (hojarasca, necromasa, biomasa arbórea, raíces finas y gruesas, y carbono almacenado por cada componente del sistema (hojarasca, necromasa con diámetro entre 2,5 – 10cm, necromasa mayor a 10cm de diámetro, biomasa arbórea, raíces finas, raíces gruesas y suelo).

La estimación de carbono en los diferentes componentes del SAF se realizó con muestreos hechos sobre una parcela de 50 x 20m (1000 m²) (Andrade e Ibrahim, 2003), esta

parcela estuvo dividida en 10 subparcelas de 10 x 10 m, identificadas y codificadas para una colección correcta de datos y muestras (Fig 1). La estimación de carbono realizado se baso en la metodología propuesta por el IPCC (2003), Segura (2005) y MacDiken (1997).

Para hojarasca y necromasa, se utilizó la metodología propuesta por IPCC (2003) colectándose todo el material presente dentro de un marco metálico de 50 x 50cm ubicado en el centro de la subparcela (Fig. 1), se colectó 10 submuestras y se registró sus pesos para obtener el peso promedio representativo de la parcela, se homogenizó todo el material y se formó una muestra final de 250 y 450g respectivamente. Se determinó el peso seco y fracción de carbono en el laboratorio de CATIE por el método de combustión seca y equipo auto-analizador. Los valores se extrapolaron a tonC/ha con el peso promedio obtenido en cada parcela.

Para estimar el carbono de la necromasa mayor a 10 cm de diámetro, se trazó 2 transectos de 50m y 20m sobre la parcela de muestreo que partieron en ángulo recto desde el centro de la parcela en sentido sur – Norte y Este – Oeste respectivamente (Fig. 1), se midió el diámetro de cada pieza encontrada y se clasificó su densidad: solido, intermedio, descompuesto (0,60; 0,42; 0,23 g/cm³ respectivamente) (IPCC, 2003). Se obtuvo peso seco y fracción de Carbono en laboratorio por el método de combustión seca y equipo autoanalizador.

Para la estimación de carbono en suelo se tomó 10 submuestras aleatorias (Fig. 1) (Macdiken, 1997) a una profundidad de 20 cm con ayuda de un barreno (Andrade e Hibrahim, 2003), se obtuvo una muestra compuesta de 500gr y se determinó el porcentaje de Carbono por medio del método de combustión húmeda de Walkley y Black (1938) y equipo auto-analizador. El carbono orgánico almacenado en suelo se estimó a partir del porcentaje de carbono en el suelo (%COS), la densidad aparente (Da), y la profundidad de muestro (P). $COS = \%COS * Da * P$. (Andrade e Ibrahim, 2003).

La densidad aparente se estimó mediante el método del cilindro de volumen conocido (MacDiken, 1997) tomando 5 muestras sobre la línea central de la parcela a una profundidad de 20cm (Fig. 1).

La biomasa de raíces gruesas con diámetro de mayor a 5mm, fue estimada con base en la biomasa aérea total y empleando la ecuación (Tabla 1) recomendada por IPCC (2003) para bosque húmedo tropical. La estimación de carbono se hace en inferencia a la fracción de carbono 0,5 (IPCC, 2003). Para raíces finas con diámetro <5mm, se muestreó suelo con cilindros (radio=3cm) a profundidad de 0-20cm en 5 puntos de la línea central de la parcela (Fig. 1).

Cada submuestra de suelo se tamizó para separar las raíces y secarlas en el horno a una temperatura de 65°C por 72 horas (MacDiken, 1997) obteniendo su peso seco. Registrados los pesos se formó una muestra compuesta por parcela a la cual se aplicó el método de combustión seca y auto-analizador que determinó la fracción de carbono.

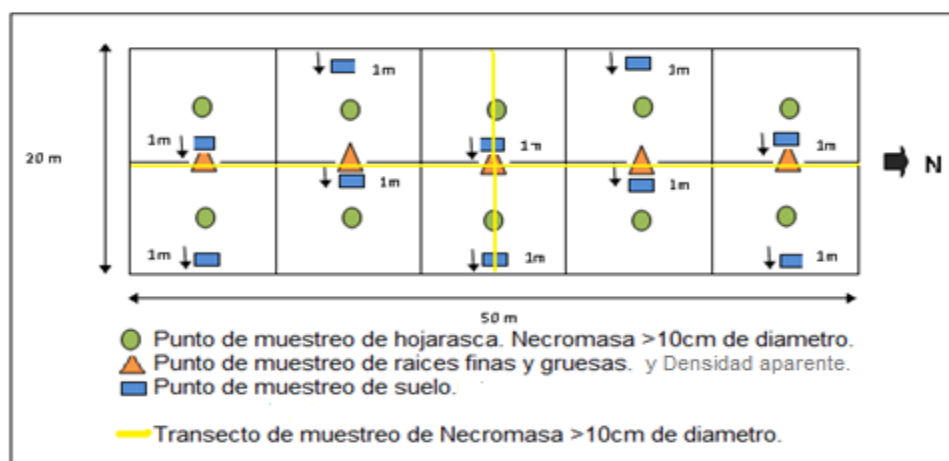


Figura 1: Puntos de muestreo para estimar carbono en el SAF CL. (Segura, 2005, IPCC, 2003)

La biomasa arbórea (fuste, ramas y hojas) se estimó con base a la metodología propuesta por Andrade y Segura (2008) y Segura y Kaninen (2005), se midió la altura (*ht*) con el uso

de clinómetro para especies leñosas, e igualmente se registró el diámetro a la altura del pecho (*dap*) para todas las especies encontradas en la parcela con altura superior a 2,5m (frutales, maderables, palmáceas). Para cacao (*Theobroma cacao*) y musáceas se midió su diámetro a 30 cm del suelo; las alturas se estimaron por medio de observación. La estimación de la biomasa aérea y almacenamiento de carbono se obtuvo mediante la aplicación de ecuaciones alométricas desarrolladas localmente por Andrade *et al* (2005) (Tabla 1). La estimación de carbono se realizó multiplicando la biomasa aérea por la fracción de carbono 0,5 (IPCC, 2003).

Especie	Modelo	Fuente
Frutales	$\text{Log Bt} = (-1,11 + 2,64 * \text{dap} * \text{Log}(\text{dap}))$	Andrade <i>et al</i> , (en preparación 2005)
Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	$\text{Log Bt} = (-0,94 + 1,32 * \text{Log}(\text{dap}) + 1,14 * \text{Log}(\text{alt}))$	Segura <i>et al</i> , 2005
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	$\text{Log Bt} = (-1,684 + 2,158 * \text{Log}(\text{dap}_{30}) + 0,892 * \text{Log}(\text{alt}))$	Segura <i>et al</i> , 2005
Musaceas	Biomasa aerea 1,5Kg/m de altura	Tanaka y Yamaguchi, 1972
Palmas < 10cm diametro	$\text{Log Bt} = (7,7 * (\text{altura}) + 4,5^{0,003})$	Cummings <i>et al</i> , 2002
Palmas > 10cm diametro	$\text{Log Bt} = (7,7 * (\text{altura}) + 4,5^{0,003})$	Frangi y Lugo, 1985
Pegibaye (<i>Bactres gassipaes</i>)	$= 0,74 * \text{alt}^2$	Cummings <i>et al</i> , 2002
Ecuaciones para estimar biomasa y carbono		
Necromasa > 10cm de diametro	$V = \pi^2 * \frac{(D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2)}{8 * L}$	IPCC, 2003
		IPCC, 2003
Raices gruesas	$Y = \exp[-1,0587 + 0,8836 * \ln(BA)]$	
Carbono Almacenado	$CA = B * Fc$	IPCC, 2003

Bt: biomasa total (Kg/árbol) - Log: Logaritmo base 10; - dap: diámetro a la altura del pecho;- dap₃₀: diámetro del tronco a 30cm - alt: altura total (m); - V: volumen; - D_n: diámetro de pieza; - exp:exponencial; L: longitud de transecto(m) - Ln: logaritmo natural;- BA: biomasa aérea (ton/ha); CA:carbono almacenado (ton/ha);- B:biomasa (ton/ha); Fc: fracción carbono (ton/ha).

Tabla 1: Modelos alométricos y ecuaciones matemáticas para la estimación de carbono en SAF CL.

Para estimar el carbono almacenado bajo suelo (raíces finas y gruesas y suelo) y arriba de suelo (hojarasca, necromasa y biomasa arbórea) en SAF CL se aplicó un análisis con estadística descriptiva, a partir de lo cual se obtuvo los valores promedios de carbono almacenado para cada componente del sistema.

Para identificar qué variables o condiciones de paisaje influyeron sobre la capacidad de almacenamiento en estos SAFs, inicialmente se determinó el coeficiente de variación para cada variable manejada, a partir de lo cual, las variables con un coeficiente de variación menor a 25% no se tuvieron en cuenta siendo el caso de las variables: Carbono en el suelo (17,08%), da (23%), % de arena (18,68%) y carbono total (20,32%).

Posteriormente en el programa estadístico SAS versión 8, se aplicó un análisis de componentes principales que permitió reducir la dimensionalidad del problema eligiéndose las variables cuantitativas con mayor variabilidad en el estudio; Para la identificación de las variables que influyeron sobre el almacenamiento de carbono en el sistema se aplicó un análisis de clasificación que permitió agrupar las 36 parcelas en grupos caracterizados por presentar afinidad intragrupal y diferencias intergrupales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de carbono. El estudio reportó que en promedio estos sistemas almacenan un total de 114,32 tonC/ha. El carbono bajo suelo se constituye como el mayor reservorio del SAF CL almacenando 59,57 tonC/ha participando con 53,56% sobre el carbono total almacenado por el sistema. El suelo almacenó en promedio 49,08 tonC/ha (44,57%) mostrándose como el mayor reservorio bajo suelo. Las raíces gruesas por su parte almacenaron un promedio de 9,26 tonC/ha (7,87%), y las raíces finas almacenaron en promedio 1,23 tonC/ha (1,12%).

El carbono almacenado arriba de suelo reportó un promedio de 54,52 tonC/ha participando con un 46,44% sobre el carbono total almacenado por el sistema. La biomasa aérea almacenó en promedio 45,90 tonC/ha (38,68%); la necromasa con diámetro mayor a 10cm almacenó 6,18 tonC/ha (5,56%); la necromasa con diámetro entre 2,5cm - 10cm de almacenó 1,21 tonC/ha (1,09%) y la hojarasca almacenó un promedio de 1,23 tonC/ha representando el 1,11% del carbono total almacenado por el SAF CL (Tabla 2).

Componente	Almacenamiento de Carbono (ton/ha)					
	Promedio (ton)	Media na	Desv. Estándar	Val máximo	Val mínimo	% Por Componente
Suelo	49,08	49,16	8,54	75,03	30,82	44,57
Raíces finas	1,23	1,20	0,35	2,01	0,63	1,12
Raíces Gruesas	9,26	9,09	3,61	23,04	2,94	7,87
C Total bajo del suelo	59,57					
Necromasa <10cm	1,21	1,15	0,48	2,90	0,62	1,09
Necromasa >10cm	6,18	5,11	5,15	21,24	0,31	5,56
Hojarasca	1,23	1,20	0,35	2,01	0,63	1,11
Biomasa aérea	45,90	44,53	20,48	127,51	12,41	38,68
C Total arriba del suelo	54,52					
Carbono total	114,32	111,28	23,62	196,83	61,33	

Tabla 2: Almacenamiento de carbono en Ton/ha por componente del Sistema agroforestal con Cacao (*Theobroma cacao*) y Laurel (*Cordia alliodora*)

Estudios reportados por Segura (2005) en SAF CL establecidos en Talamánca, Costa rica, dan a conocer un promedio de carbono total almacenado de 123 tonC/ha, mostrando similitud con el carbono total almacenado en este estudio.

Ortiz *et al.*, (2006) en la misma zona de estudio y para el mismo SAF, reportó un promedio de carbono total almacenado de 126.4 tnC/ha. Este estudio permitió identificar similitud con respecto a los componentes del sistema que se constituyen como los mayores reservorios arriba y bajo suelo. El suelo almacenó en promedio 71,54 tonC/ha y participó con un 56,6% sobre el carbono total almacenado. La biomasa aérea por su parte almacenó en promedio 44,17 tonC/ha y representó el 34,95% sobre el carbono total almacenado.

Inicialmente se identificó correlaciones entre las variables estudiadas que pueden influir sobre la capacidad de almacenamiento de carbono en los SAFs CL. La variable C en raíces finas presentó una alta correlación con las variables abundancia de cacao (0,46); Biomasa en hojarasca (0,99) y carbono en hojarasca (0,99). La variable C en raíces gruesas mostró correlación con la variable carbono en biomasa aérea (0,99). Por su parte la variable C en hojarasca se correlacionó con la variable abundancia de cacao (0,46), biomasa en hojarasca (0,99); y carbono en raíces finas (0,99). La Variable C en necromasa con diámetro entre 2,5 -10cm se correlacionó con la variable biomasa de necromasa (d 2,5 -10cm) (0,99), e igualmente la variable C en necromasa (d>10cm) se correlacionó con la variable biomasa de necromasa (d>10cm) (0,79). Y la biomasa arbórea mostró correlación con la variable biomasa en raíces gruesas (0,99); Biomasa aérea (1.00), y C en raíces gruesas (0,99).

Análisis de componentes principales: el ACP aplicado permitió establecer, con base en el porcentaje acumulado de los valores propios (Tabla 3), un total de cuatro (4) factores o componentes, los cuales permiten explicar el 62,17% de la variabilidad total presente en las 36 parcelas en estudio.

Tabla 3: Histograma de valores propios que explican la variabilidad (%) de las parcelas evaluadas para determinar la influencia de las condiciones paisajísticas sobre el almacenamiento de carbono en SAF CL.

<u>Valores propios de la matriz de correlación</u>				
<u>Valor propio</u>	<u>Diferencia</u>	<u>Proporción</u>	<u>Valor Acumulado</u>	
1	5.42940570	0.90303225	0.2088	0.2088
2	4.52637346	1.09986077	0.1741	0.3829
3	3.42651268	0.43713498	0.1318	0.5147
4	2.98937770	0.93717503	0.1150	0.6297

Fuente: Análisis estadístico en SAS, versión 8.

El primer componente o grupo 1 permite explicar el 20,88% de la variabilidad total y está conformado principalmente por las variables porcentaje de pendiente (18,92%) y porcentaje de arcillas (30,18%) con una correlación Variable- Factor de 0,33 y 0,34, respectivamente, Siendo estas variables las que más aportan a la conformación de este componente.

El segundo componente o grupo 2 permitió explicar un 17,41% de la variabilidad total y las variables que más peso tuvieron para conformar el grupo fueron: biomasa arbórea (86,85 ton/ha), biomasa de raíces gruesas (17,78 ton/ha), Carbono en raíces gruesas (8,35tonC/ha), y carbono en biomasa aérea (40,82tonC/ha). Estas variables mostraron correlaciones variable-factor del orden de 0,41; 0,40; 0,40 y 0,40 respectivamente.

El tercer componente o grupo 3, el cual permite explicar el 13,18% de la variabilidad total y se conformó por el peso de las variables: biomasa en hojarasca (3,29 ton/ha), carbono en raíces finas (153 tonC/ha), y carbono en hojarasca (1,53 ton/ha) las cuales presentaron en una correlación variable – Factor 0,43; 0,43; y 0,43 respectivamente.

El componente cuatro o grupo 4 por su parte explicó un 11% de la variabilidad total y estuvo conformado por el peso de la variable: abundancia de frutales (510 plan/ha) con una correlación variable factor de 0,46. Siendo esta variable la de mayor peso para conformar dicho grupo.

Análisis de clasificación: el análisis clasificatorio permitió agrupar las 36 parcelas en cuatro grandes grupos caracterizados por su afinidad intragrupal y por sus diferencias intergrupales, a partir de lo cual se identificó las condiciones paisajísticas o variables que influyen sobre el almacenamiento de carbono en el SAF CL (Figura 2).

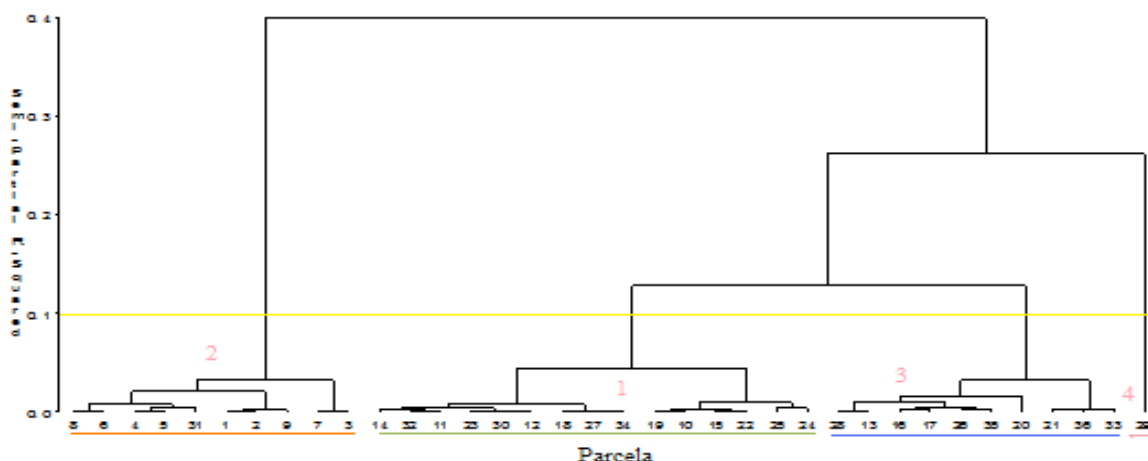


Figura 2: Conformación de grupos basados en un análisis de clasificación de las variables cuantitativas manejadas para evaluar influencia sobre el almacenamiento de carbono en SAF CL.

El grupo 1 está conformado por 15 parcelas que representan el 41,66% del total de parcelas evaluadas, 14 de las cuales se distribuyen sobre lomas en las comunidades de Namuwokir y Soki, y una parcela establecida sobre valle en la comunidad de Watsi. Este grupo se caracterizó por presentar parcelas con características paisajísticas como: un promedio de altura sobre el nivel del mar de 239,2m; pendiente promedio de 18,92%, mayor cantidad de arcillas (30,18%), mayor cantidad de agregados ente 8-2 mm (39,75%); mayor abundancia de cacao con un promedio de 572 individuos/ha, seguido por abundancia de frutales con un promedio de 149,33 individuos/ha; un promedio de biomasa aérea de 110,15 ton/ha; biomasa en raíces finas de 2,87 ton/ha; biomasa en raíces gruesas de 22,03 ton/ha; biomasa en hojarasca 2,41 ton/ha; biomasa en necromasa (d>10cm) de 5,50 ton/ha; y necromasa (d 2,5cm-10cm) de 2,50 ton/ha. Igualmente se identificó un promedio de carbono almacenado

por componente de 1,29 tonC/ha para raíces finas; para raíces gruesas de 10,35 tonC/ha; Para hojarasca de 1,12 tonC/ha; para necromasa (d 2,5-10cm) de 1,17 tonC/ha; y para necromasa (d>10cm) de 5,21 tonC/ha y finalmente para biomasa aérea se almacenó 51,77 tonC/ha.

El grupo 2 está conformado por 10 parcelas que representan el 27,77% de las parcelas evaluadas, de las cuales 9 se localizan en la comunidad de Amubri y una en la comunidad de Watsi, todas distribuidas sobre valle. Para este grupo se identificó un promedio de altura de: 86msnm, un promedio de pendiente del 0%, mayor cantidad de limo 41,15%; mayor cantidad de agregados ente 8-2mm (32,25%); mayor abundancia de musáceas con un promedio 534 individuos/ha; abundancia de cacao con un promedio de 457 individuos/ha; y abundancia de maderables con un promedio de 105 individuos/ha.

El grupo 3 estuvo conformado por 10 parcelas que representan el 27,77% de las parcelas evaluadas, distribuidas sobre lomas en las comunidades de Soki, Namuwokir y Watsi. Dichas parcelas agrupadas presentaron características paisajísticas como: altura promedio de 267 msnm; pendiente promedio de 20,8%; mayor porcentaje de arcillas (34,37%); agregados entre 2-8mm (41,22%); mayor abundancia de cacao con un promedio de de 784 individuos/ha; abundancia de frutales de 193 individuos/ha; abundancia de maderables con un promedio de 66 individuos/ha; abundancia de palmáceas con un promedio de 54 individuos/ha; un promedio de biomasa aérea de 72,34 ton/ha; para hojarasca de 3,29 ton/ha; necromasa (d>10cm) un promedio de 5,36 ton/ha; necromasa (2,5-10cm) de 3,04 ton/ha; raíces finas de 5,51 ton/ha; Raíces gruesas 15,16 ton/ha y un almacenamiento de carbono por componente de 34 ton/ha para biomasa aerea; hojarasca de 1,53; necromasa (d>10cm) 6,13 tonC/ha; necromasa (2,5-10cm) 1,42 tonC/ha; raíces finas 1,53 tonC/ha; y raíces gruesas 7,12 tonC/ha.

El grupo 4 está representado por la parcela 29, la cual representa el 2,7% de la red de parcelas de investigación, localizada en la comunidad de Watsi, caracterizada por estar a una altura de 82msnm, pendiente del 10%, mayor cantidad arcillas (34,7%); mayor

cantidad de agregados ente 2-8mm (41,53%); mayor riqueza de especies con respecto a las demás parcelas (26 especies), mayor abundancia de frutales con un promedio de 510 frutales/ha, abundancia de cacao con un promedio de 430 individuos/ha; seguido por abundancia de palmáceas con un promedio de 240 individuos/ha; un promedio de biomasa por componente de 2,2 ton/ha para hojarasca; de 2,68 ton/ha para necromasa (d 2,5 – 10cm); para biomasa aérea un promedio de 271,289 ton/ha; para raíces finas de 3,15 ton/ha; y Raíces gruesas de 41,02 ton/ha; y un promedio de almacenamiento de carbono para hojarasca de 0,99 tonC/ha; en necromasa (d 2,5 – 10cm) de 1,21 tonC/ha; necromasa (d>10cm) de 3, 36 tonC/ha, biomasa aérea de 127,506 tonC/ha, raíces finas de 0,99 tonC/ha, y de raíces gruesas de 23,04 tonC/ha.

Finalmente se aprecia que la parcela 29, o grupo 4, reportó un total de carbono almacenado superior a los 3 grupos anteriores, almacenando un total de carbono de 157,09 tonC/ha con la participación de componentes (raíces, necromasa, hojarasca y biomasa aérea), a partir de lo cual se aprecia que el componente biomasa aérea y biomasa en raíces gruesas, al igual que el carbono almacenado superan las cantidades con respecto a otros los grupos. Lo anterior puede explicarse debido a una mayor abundancia de frutales, cacao y palmáceas y especies maderables que presentaron un diámetro a la altura de pecho (dap) superior a las demás especies encontradas en las parcelas. Lo que explica una capacidad de almacenamiento tan diferente y mayor en biomasa aérea 127,506 tonC/ha y raíces gruesas (23,04 tonC/ha) con respecto a los demás grupos.

Sin embargo es importante resaltar que el grupo uno, el cual representa el 41,66% de las parcelas estudiadas, almacenó mayor cantidad de carbono comparado con los grupos 2 y 3, almacenando 77,77 tonC/ha, mientras que el componente 4 precedido solo por la parcela 29 almacenó una mayor cantidad de carbono 157,096 tonC/ha.

Esto permite afirmar que las condiciones paisajísticas presentes en los grupos uno y cuatro favorecen e influyen sobre el almacenamiento de carbono en el SAF CL, tales variables o

condiciones de paisaje se caracterizaron por presentar un promedio de altura sobre el nivel del mar de 160,6 msnm (239,2 msnm - 82 msnm respectivamente); promedio de pendiente de 14,46% (18,92% y 10% respectivamente); mayor cantidad de arcillas con un promedio de 32,44% (30,18 y 34,7 respectivamente); mayor cantidad de agregados ente 8-2mm con un promedio de 40,64% (39,75% y 41,53% respectivamente); abundancia de frutales con un promedio de 329,66 individuos/ha (149,33 y 510 individuos/ha respectivamente); abundancia de cacao con un promedio de 501 individuos/ha (572 y 430 individuos/ha respectivamente); abundancia de palmáceas con un promedio de 142,33 individuos/ha (44,66 y 240 individuos/ha respectivamente); mayor riqueza de especies con un promedio de 18,3 especies (10,6 y 26especies); y mayores cantidades de biomasa por componente y carbono almacenado por componentes como hojarasca, necromasa, biomasa aérea y raíces finas y gruesas.

Teniendo en cuenta que los grupos uno y cuatro están conformados por 16 parcelas, de las cuales 15 están distribuidas sobre loma, se puede afirmar que existe un mayor almacenamiento de carbono en SAF establecidos loma que en valle. Según Segura (2005) reportó que los SAF's distribuidos en loma almacenaron en promedio 132,8 tonC/ha y en valle 112,5 tonC/ha. Sin embargo Ortiz, *ét al* (2006) al contrario reporta que en SAFs CL en Talamanca, almacenan en promedio 126.4 tnC/ha en valle y de 114.5 tnC /ha en loma. Esto contradice lo presente en este estudio, pero podría explicarse por otras características paisajísticas relacionadas con cantidad de biomasa y carbono almacenado por cada componente del SAF CL.

De acuerdo a lo anterior, Mena (2008) y Ochoa *ét al* (2000) reportó que existe una correlación positiva entre la altitud y la materia orgánica almacenada en el sistema. Es decir al igual que en este estudio el incremento en altitud tuvo un efecto positivo sobre la capacidad de almacenamiento de carbono siendo la cantidad de materia orgánica proporcional a la cantidad de carbono orgánico en el sistema especialmente suelo.

Las parcelas distribuidas en zonas de ladera a mayores altitudes sobre el nivel del mar presentaron una mayor cantidad de biomasa acumulada para necromasa con diámetro entre 2,5cm-10cm, necromasa con diámetro mayor a 10cm), y hojarasca y por ende una capacidad mayor de almacenamiento de carbono en el sistema, esto debido a que existe una capa de Materia orgánica superior.

Según, Romanya *et al*, (2007) el tipo de suelo tiene un efecto significativo sobre los cambios del carbono en el suelo. Las arcillas y materiales finos del suelo protegen la MO de manera que la reserva de carbono en el sistema se relaciona con el contenido de dichos materiales. Esto explica la presencia de una correlación positiva con el porcentaje Arcilla en este estudio.

Según, Cerda (2008) en un estudio realizado en SAF CL, reporta que el mayor contenido de carbono se presenta en los agregados de 8-2mm. Situación que coincide con este estudio, determinándose una fuerte correlación. Esto indica que la capacidad de almacenamiento de carbono está influenciada por la estructura del suelo, mientras más grandes sean los agregados el carbono en el suelo, la capacidad de almacenamiento será mayor.

De igual manera se apreció que la abundancia de frutales, cacao (*Teobroma cacao*), especies maderables y palmáceas tiene una gran influencia sobre la capacidad de almacenamiento de carbono en el SAF, sin embargo la abundancia de musáceas no representa mayor influencia para un incremento de carbono en el SAF. Lo anterior se explica que las especies leñosas tienen la capacidad de incorporar en sus tejidos mayor cantidad de carbono (Nair *et al*, 2009).

CONCLUSIONES

El SAF CL almacenó un promedio total de carbono de 114,32 tonC/ha; identificándose como mayor reservorio a los componentes distribuidos por debajo del suelo (raíces y suelo) almacenando en promedio un total de 59,57 tonC/ha, representando el 53,56% del

carbono total almacenado por el sistema. Por su parte el carbono almacenado arriba del suelo en promedio almacenó 54,52 ton/ha y participó con un 46,44%.

El análisis de componentes principales (ACP) permitió establecer, con base en el porcentaje acumulado de los valores propios, un total de cuatro componentes o grupos que explican el 62,17% de la variabilidad total presente en las 36 parcelas en estudio; 20,88%; 17,41%; 13,18% y 11% respectivamente.

El análisis clasificatorio permitió agrupar las 36 parcelas en cuatro grandes grupos, el grupo 1 y 4, fueron aquellos que presentaron mayores promedios con respecto al almacenamiento de carbono en el SAF CL, identificándose la influencia de características paisajísticas como: altura sobre el nivel del mar, porcentaje de pendiente, mayor porcentaje de arcillas, mayor porcentaje de agregados entre 2-8mm, abundancia de frutales, cacao, palmáceas, y maderables, y biomasa por componente del SAF CL.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias a la colaboración y apoyo de las siguientes instituciones:

Al programa de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Nariño, en especial a Jorge Fernando Navia como copresidente; William Ballesteros y Luis Fernando Moreno como jurados delegados; Jorge Vélez como amigo y apoyo en el análisis estadístico del estudio.

Al Centro Agronómico Tropical de investigación y Enseñanza (CATIE, Turrialba, Costa Rica) en especial a MsC Rolando Cerda Bustillos, delegado como presidente de tesis.

A mis familiares y amigos, comunidad de la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica, y a todas aquellas personas que de una u otra forma ayudaron en el alcance de los objetivos planteados en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Andrade, H. e Ibrahim, M. 2003. Como monitorear carbono en sistemas silvopastoriles. Agroforesteria en las Américas, Vol. 10. CATIE. Turrialba. Costa Rica. Volumen 10: 109 - 116.

Andrade, H. y Segura, M. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. . Agroforestería en las Américas, CATIE. Turrialba. Costa Rica. no. 46. 89-96.

Brown, L. 1992. Processes and lands for sequestering carbon in the tropical forest landscapes. In Wisniewski J. y Lugo A. E. (eds), 1992. Natural sinks of CO₂. Water, air and soil pollution 64: 139-155.

CEPAL. 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Naciones Unidas, CEPAL. Santiago de Chile. 148 p.

Cerda, R. 2008. Calidad de suelos en plantaciones de Cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca, Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 16 p.

Dixon, R. 1995. Sistemas agroforestales y gases invernadero. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 2. no. 7, 1995; 22-26.

Eguren, L. 2004. El mercado de Carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas. Santiago de Chile: CEPAL. 83 p.

FAO. 2007. Cambio climático y seguridad alimentaria. Roma. 24 p.

Gayoso, J y Guerra, J. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. Instituto de manejo forestal, Universidad Austral de Chile. Volumen 26(2). 33 – 38.

IPCC, 2003. Orientación sobre las buenas prácticas para el uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS). Suiza. 628.

IPCC. 2007. Synthesis report: Climate change 2007. IPCC. Suiza. 52.

MacDiken, K. 1997. A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.

Mena, M. 2001. Clima de Costa Rica. Consultado 10 de octubre del 2006. Dponible en <http://www.imn.ac.cr/educa/clima/clima%20en%20costa%20rica.htm>

Mena, 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 maestría en Agroforestería tropical. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 90.

Nair, R. *et al.* 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. Plant nutrition. Soil Science.

Ortiz, A *et al.* 2008. Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao L*) y Laurel (*Cordia alliodora*). Agroforesteria en las Américas, CATIE, Turrialba, Costa Rica. No. 46 2008.

PCC, 2005. Proyecto cacao en Centroamérica. Protocolo captura de carbono. CATIE, Costa Rica.

Romanyà, J; Rovira, P y Vallejo, R. 2007. Análisis del carbono en los suelos agrícolas de España: aspectos relevantes en relación a la reconversión a la agricultura ecológica en el ámbito mediterráneo. *Revista Ecosistemas*. 16(1). 50 -57.

Segura, M y Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volumen and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *BIOTROPICA*. 37(1): 2–8.

Zaror, C. 2007. Cambio climático y cambio global. *Ciencia Ahora*. 20 (10). México. 21 – 34.