

FIJACION Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFE ARABIGO Y CACAO, EN DOS ZONAS AGROECOLOGICAS DEL LITORAL ECUATORIANO¹

Rubén Corral Castillo², Luis Alberto Duicela³, Héctor Maza Chamba⁴

RESUMEN

Los efectos negativos que causan en el clima local y mundial la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, constituyen temas relevantes del Protocolo de Kyoto. Las acciones orientadas al control de emisiones de carbono; así como, la estimación del potencial de fijación de CO₂ por la vegetación son importantes. En este contexto, los sistemas agroforestales (SAF) en base a los cultivos de café y cacao juegan un papel esencial en el ciclo global del carbono.

Los objetivos definidos para el presente trabajo de investigación fueron: cuantificar el carbono fijado y almacenado en sistemas silvoagrícolas con café y cacao; y, estimar el valor económico del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono. En las zonas de Pichilingue (Los Ríos) y Caluma (Bolívar), se seleccionaron tres SAF con café: *C.arabica* + *Inga edulis*, *C.arabica* + *Schizolobium parahyba*, *C.arabica* + *Cordia alliodora*, y tres SAF con cacao: *T.cacao* + *Inga edulis*, *T.cacao* + *Schizolobium parahyba* y *T.cacao* + *Cordia alliodora*, todos de 6,5 años de edad.

Los suelos de los SAF con café y cacao, son depósitos importantes de carbono (72,5 y 75,7 t/ha respectivamente). Los contenidos de carbono almacenados en el suelo, son el producto del constante flujo de biomasa de los árboles y arbustos componentes de los sistemas.

El almacenamiento de carbono en la biomasa de los SAF de café y cacao fue 115 y 121 t/ha, respectivamente, similares a la captura de carbono reportada en los bosques secundarios del trópico. La fijación potencial de carbono (suelo + biomasa aérea); en los SAF en base de café fue 187,5 t/ha, mientras, en los SAF de cacao fue 196,7 t C/ha. En consideración de la importante fijación atmosférica de carbono encontrada en los SAF de café y cacao, deben ser incluidos en los planes de pago por servicios ambientales.

I. INTRODUCCION

El incremento en la concentración de algunos gases en la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO₂), producto del crecimiento de la población mundial y sus actividades productivas, ha provocado una intensificación del efecto invernadero natural del planeta. Como fuentes principales de emisión de CO₂ se mencionan la combustión de combustibles fósiles y la producción de cemento en los países industrializados; así como, la deforestación y el cambio de uso de la tierra en los países tropicales. La importancia creciente que tiene el CO₂, por ser uno de los gases que en mayor proporción contribuye al efecto invernadero y que incide con ello sobre el calentamiento global, hace que el adoptar medidas que permitan

¹ Tesis de postgrado previa a la obtención del título de Magíster Scientiae en Agroforestería para el Trópico Húmedo. Universidad Nacional de Loja. 2006.

² Responsable del Programa de Innovación Tecnológica del Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC). Portoviejo, Ecuador. gcorral@cofenac.org

³ Director de la División Técnica del Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC). Portoviejo, Ecuador. lduicela@cofenac.org

⁴ Catedrático de la Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. mazhecforest@yahoo.es

mitigar sus efectos, sea un reto para todos, identificando y proponiendo alternativas que generen bienestar sostenible.

De esta manera los bosques y sistemas agroforestales juegan un rol importante no solo como factor de desarrollo de un país y de sus modelos de sostenibilidad, sino que adquieren protagonismo mundial por su probable reconocimiento como sumideros en los sistemas contables de los ciclos de carbono. El debate actual se intensifica alrededor de los beneficios que los Sistemas Agroforestales pueden proporcionar, más allá de sus funciones productivas; el de los denominados “*servicios ambientales*”. Los árboles, base de los sistemas agroforestales, juegan un papel importante en el ciclo global del carbono, porque cuando una planta crece, progresivamente acumula CO₂ y lo convierte en biomasa. Si esta biomasa es almacenada en forma estable, se captura y retiene una significativa cantidad de carbono de la atmósfera durante mucho tiempo.

El Protocolo de Kyoto (ratificado el 16 de febrero del 2005) y las subsecuentes Conferencias de las Partes de la Convención de Cambio Climático han despertado interés sobre el potencial de ecosistemas de plantaciones agroforestales y bosques secundarios para fijar carbono. La adopción de la Agroforestería para secuestrar y conservar carbono depende de demostrar sus beneficios económicos y medioambientales.

En el Ecuador, los cultivos de café y cacao tienen una relevante importancia en los órdenes económico, social y ecológico. En este contexto, el presente trabajo de investigación representa una primera aproximación para la negociación del servicio ambiental de captura de carbono de las áreas cafetaleras y cacaoteras, las que de por sí mismas presentan una estructura de sotobosque, contribuyendo así, al mejoramiento de los ingresos de los productores, por los aportes que se pueden captar por estos servicios.

II. OBJETIVOS GENERALES

- Cuantificar el carbono fijado y almacenado en los sistemas silvoagrícolas: *Coffea arabica* + *Inga edulis*, *Coffea arabica* + *Schizolobium parahyba*, *Coffea arabica* + *Cordia alliodora*, *Theobroma cacao* + *Inga edulis*, *Theobroma cacao* + *Schizolobium parahyba* y *Theobroma cacao* + *Cordia alliodora*, en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano.
- Estimar el valor económico del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales en base de café y cacao.

III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Localización

La investigación se realizó en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano:

1. En Pichilingue, el lote experimental se encuentra en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), provincia de los Ríos. La altitud es de 120 msnm. De acuerdo a la clasificación de zonas de vida de Holdridge, corresponde a la formación ecológica Bosque Tropical Húmedo. Los suelos de Pichilingue según el Soil Taxonomy corresponden al Orden: Inceptisoles; Suborden: Andepts y Gran grupo: Eutrandepts. En base del mapa de fertilidad potencial

de los suelos, estos se caracterizan por su origen en cenizas volcánicas que dan lugar a sustancias amorfas muy hidratadas (alofanas) y amorfas (hidróxidos de Al y Fe).

2. En Caluma, los SAF de café y cacao evaluados se encuentran en la Granja Experimental de la Universidad de Bolívar, extensión Caluma, provincia de Bolívar. Se ubica en una altitud de 260 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo a la clasificación de zonas de vida de Holdridge esta zona corresponde a la formación ecológica Bosque Muy Húmedo Sub Tropical. En Caluma predominan los suelos ácidos con elevada capacidad de lixiviación de Ca, Mg, K y Na. Las condiciones climáticas de esta zona permiten una acumulación muy alta de materia orgánica, elemento que es fuente importante de la acidez. Según el Soil Taxonomy, los suelos de Caluma se encuentran dentro del Orden: Alfisoles; Suborden: Udalfs y Gran grupo: Tropudalfs

3.2. Tratamientos

Los tratamientos resultaron de la combinación de los factores cultivo base y especie forestal y se presentan en el cuadro 1.

3.3. Diseño Experimental

El experimento se condujo bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar con arreglo factorial 2 X 3 (cultivos x especies forestales), con dos repeticiones (localidades).

Cuadro 1. Tratamientos del estudio de contenidos de carbono en SAF con café y cacao, en dos zonas agroecológicas.

Nº	Código	Cultivo Base	Especie Forestal
1	CG	Café	Guaba
2	CP	Café	Pachaco
3	CL	Café	Laurel
4	TG	Cacao	Guaba
5	TP	Cacao	Pachaco
6	TL	Cacao	Laurel

3.4. Análisis Estadístico

El análisis de varianza, para las variables de estudio, se realizó mediante la prueba de Fisher (técnica paramétrica), Además, para los contenidos de carbono en el suelo de los SAF, se realizó el análisis estadístico por el método NONORTHO⁵, que permitió calcular el ADEVA, en una tabla de dos sentidos, considerando la base de datos de 96 muestras de suelo y necromasa recolectadas en el estudio, con lo cual se incrementaron los grados de libertad del error experimental, mejorando con aquello la precisión del experimento. Se complementó el análisis con la prueba de medias por rangos de Duncan 0,05.

⁵ MSTATC: Microcomputer Statistical Program. Michigan State University. 1986. 6/38 – 6/44 pp.

El ADEVA por el método de Fisher fue:		El ADEVA por el método Nonorthogonal fue:	
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Fuente de Variación	Grados de Libertad
Localidad	1	Localidad (L)	1
Cultivo base (CB)	1	Especie Forestal (EF)	2
Especie Forestal (EF)	2	Interacción L(EF)	2
CB x EF	2	Error A - L(EF)	90
Error	5	Cultivos Base (Cb)	1
Total	11	Interacción L(Cb)	1
		Error b - L(Cb)	92
		Interacción EF x Cb	2
		Error C - EF x Cb	90

3.5. Variables Estudiadas

3.5.1. Determinación de Carbono

La capacidad de almacenamiento de carbono en los SAF, en base de los cultivos de café y cacao, se determinó a partir de la evaluación en los siguientes niveles/estratos:

- Carbono en el suelo (A)
 - a. carbono en el suelo a la profundidad de 0 – 30 cm
 - b. carbono en la necromasa
 - c. carbono total del suelo (a + b)
- Carbono en la biomasa de los cultivos: café y cacao (B)
- Carbono en la biomasa de las especies forestales: guaba, pachaco y laurel (C)
- Carbono en los Sistemas Agroforestales (A + B + C)

3.5.2. Valoración del servicio de captura de Carbono en los Sistemas Agroforestales

Para la valoración de servicio ambiental de captura de carbono, se utilizó el criterio de contabilización de carbono en función de la tierra, el cual toma como punto de partida el carbono total existente en el momento, sin considerar las alteraciones que podrían implicar los cambios de uso de tierra en el flujo de carbono. La valoración del servicio ambiental, del presente estudio, se realizó tomando como referencia el valor por tonelada de carbono utilizado en proyectos internacionales; esto es \$US10,00; y bajo dos escenarios de valoración: a) Valor del servicio brindado por los componentes arbustivos (café y cacao) y arbóreo (guaba, pachaco y laurel), es decir el carbono almacenado a nivel de la biomasa arbórea; y 2) Valor del servicio brindado por los sistemas agroforestales (carbono en el suelo y en la biomasa aérea).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. CARBONO EN EL SUELO

Al evaluar el contenido total del carbono en el suelo, de los SAF en base de los cultivos de café y cacao, se determinó diferencia estadística altamente significativa ($P < 0,01$), entre las localidades Pichilingue y Caluma, según los análisis de varianza por los métodos de Fisher y Nonortho. Además, se determinó diferencias estadísticas para las interacciones: Localidad x Especie Forestal ($P < 0,05$) y Localidad x Cultivo base ($P < 0,01$). La prueba de T estableció una alta correlación (0,78) entre las localidades y el contenido total de carbono en el suelo.

En el presente estudio no fue incluida la biomasa de las raíces. Sin embargo este compartimiento puede representar cantidades significativas de biomasa y por lo tanto de carbono. Existe poca información sobre la biomasa en las raíces por el trabajo extensivo que representan las mediciones. Cairns et al (1997) calcularon la biomasa promedio en raíces de bosques tropicales en un 24% de la biomasa aérea.

En la figura 1, se observa que el contenido promedio de carbono en el suelo de los SAF en la localidad de Caluma fue de 92,8 t/ha; de los cuales el 99,3% se encontró en el perfil de suelo 0-30 centímetros y el 0,7% restante se determinó a nivel de la necromasa, mientras que en Pichilingue, el contenido promedio de carbono en el suelo fue de 55,4 t/ha (98,6% en el perfil de suelo 0-30 centímetros y 1,4% en la necromasa). La mayor cantidad de carbono almacenado en los suelos de los SAF de Caluma obedece a la influencia de factores edafo climáticos que inciden en una favorable capacidad para la acumulación de contenidos muy altos de materia orgánica y por ende de carbono (Mejía, 1997). Además, la mayor productividad de los cultivos de café y cacao, obtenidos en los SAF de Pichilingue, es una muestra de un mayor grado de extracción de nutrientes del suelo, lo que ocasiona un acelerado grado de descomposición de la materia orgánica.

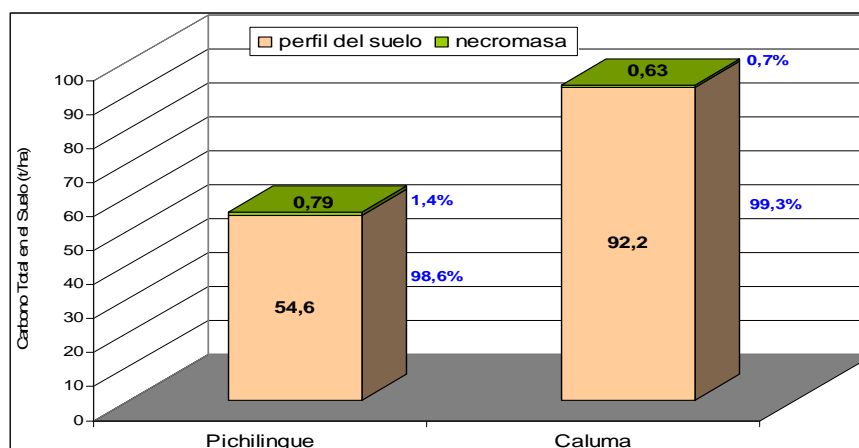


Figura 1. Contenidos de carbono total del suelo (t/ha) en SAF, de dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano. 2005.

En el cuadro 2, se presentan los promedios de carbono total de los suelos, por cada uno de los SAF en base de los cultivos de café arábigo y cacao, en una tabla de dos entradas. Se determinó, que los contenidos de carbono en el suelo fueron mayores en los SAF de café y cacao bajo sombra de laurel, aunque estadísticamente similares. Según Jandl (2001), se puede demostrar, que existe una gran interacción entre las especies que conforman el sistema

agroforestal y el suelo puesto que los altos contenidos de carbono almacenados en este último, son el producto del constante y abundante flujo de este elemento aportado por la biomasa vegetal.

Los promedios para los contenidos de carbono total del suelo fueron superiores en el SAF café + laurel con 78,8 t/ha; seguidos por el SAF café + guaba con 72,0 t/ha y el SAF café + pachaco con 66,9 t/ha. El contenido promedio de carbono total en el suelo, para los SAF en base del cultivo de cacao, fue mayor en el SAF cacao + laurel con 81,8 t/ha, en comparación con los SAF cacao + pachaco (74,5 t/ha) y cacao + guaba (70,7 t/ha).

Cuadro 2. Contenidos de carbono total del suelo (t/ha), en función de los SAF con café y cacao, en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano. 2005.

SAF	Carbono total del suelo (t/ha)		
	Pichilingue	Caluma	Media
Café + Guaba	58,4	85,7	72,0
Café + Pachaco	59,7	74,1	66,9
Café + Laurel	63,1	94,3	78,7
Cacao + Guaba	45,3	96,2	70,7
Cacao + Pachaco	54,2	94,8	74,5
Cacao + Laurel	51,8	111,8	81,8

Fassbender *et al* (1985) en Turrialba, Costa Rica obtuvieron 104 y 121 t/ha respectivamente, para los sistemas café + poró y café + laurel. Fournier (1996) reporta 198,0 t/ha para un sistema café + poró en Ciudad Colón (Valle Central) de Costa Rica. Márquez (1997) en Guatemala, en SAF con café, obtuvo datos de 115,5 t/ha; y, Alvarado *et al* (1999), en el mismo país reportan 91,6 t/ha.

En sistemas agroforestales con café, en el Valle central de Costa Rica, Ávila (2000), determinó los mayores contenidos de carbono en el suelo (perfil 0–30 cm), en el sistema café + poro de 10 años de edad (184,4 t/ha) y menor en café + eucalipto de 8 años (108,6 t/ha). La diferencia, en relación al presente estudio, se debe a la menor edad de los SAF de café y cacao (6,5 años al momento del muestreo); aunque a una profundidad de muestreo similar.

Fassbender *et al* (1985), en Turrialba (Región Atlántica) de Costa Rica, obtuvieron 164,4 t/ha de carbono almacenado a una profundidad del suelo de 45 cm, en SAF con café. Márquez (1997) reporta datos de 93,3 a 117,5 t/ha de carbono y ANACAFE (1998) de 55 a 60 t/ha en SAF con café, de 0 a 15 cm de profundidad, en Guatemala. En cafetales de Turrialba, Costa Rica, Montenegro y Abarca (2001), determinaron que la cantidad de carbono almacenado, en sistemas cafetaleros, en el perfil del suelo 0- 30 centímetros, fue de 19,8 t/ha, que fue menor a los encontrados en un ecosistema de bosque natural (en la misma región) que reportó 32,8 toneladas. Estos valores, están por debajo de los contenidos de carbono, encontrados en el suelo de los sistemas agroforestales de café y cacao, del presente estudio.

El carbono del suelo se encuentra en la hojarasca, en el sistema radicular y el carbono negro. Se debe manejar los SAF de manera que fijen y conserven sosteniblemente carbono en el suelo, lo cual se puede manipular mediante la selección adecuada de especies arbóreas, la

ordenación espacial, con la implementación de prácticas de conservación de suelos y por la duración del turno de las especies forestales.

4.2. CARBONO ACUMULADO EN LA BIOMASA AEREA DE LOS CULTIVOS DE CAFE Y CACAO

El análisis de varianza permitió establecer diferencias estadísticas significativas, para el contenido total de carbono en la biomasa de los cultivos base café y cacao ($P < 0.01$).

En la figura 2, se grafican los promedios del contenido de carbono para los cultivos de café arábigo y cacao. Se destaca que los cafetos tienen mayor capacidad de almacenamiento de carbono en su biomasa; 4,12 t/ha, en comparación con las plantas de cacao en las que se registraron 1,8 t/ha. Estos valores representan una superioridad de los cafetales sobre los cacaotales de 128,9%, en cuanto a la capacidad de almacenamiento de carbono en la biomasa.

En las plantas de café arábigo, se determinó 1,31 t C/ha en las hojas; 1,49 t/ha en las ramas y 1,32 t/ha en los tallos; en términos porcentuales estos valores corresponden a 31,9; 36,1 y 32,2 por ciento, respectivamente. En las plantas de cacao los contenidos de carbono fueron 0,67 ton/ha a nivel de las hojas (37,0%); 0,46 t/ha en las ramas (25,3%); y 0,68 t/ha en los tallos que corresponden al 37,7 por ciento del contenido de carbono total.

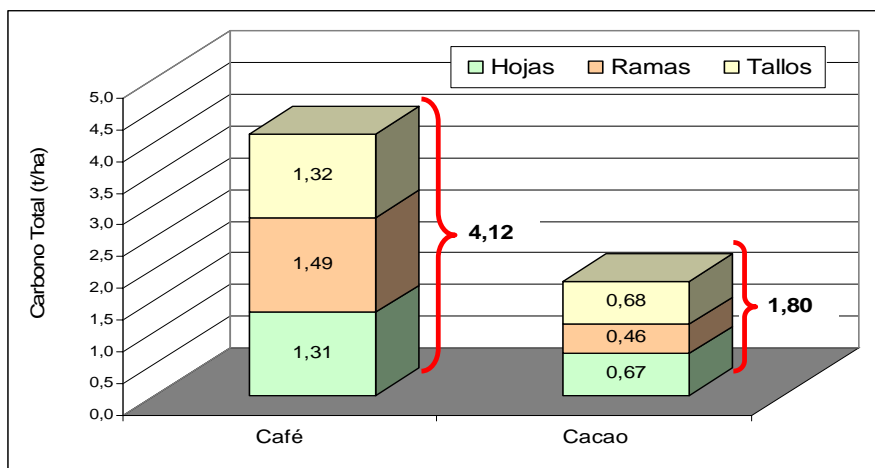


Figura 2. Carbono en la biomasa de los cultivos de café y cacao (t/ha), en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano. 2005.

El contenido de carbono en los cafetales, en función de las especies forestales con que se asocian los SAF, fueron superiores cuando estuvieron bajo la cobertura de los árboles de guaba (4,79 t/ha). Esta situación se puede atribuir a que los cafetos bajo una copa de árbol que proporciona alto sombreado, como lo es la guaba, desarrollan una gran cantidad de follaje, expresado en una mayor proporción de biomasa. En un segundo nivel, aunque estadísticamente similares, se reportó los cafetales bajo sombra de laurel con 4,44 t/ha y café asociados al pachaco con 3,14 t/ha (cuadro 3).

En lo referente al aporte del cultivo de café, al total de carbono almacenado en SAF, los datos de Ávila (2000), oscilan entre 1,21 t/ha en café + eucalipto y 4,50 ton/ha en café + poró. Márquez (1997), en Guatemala, reporta que el aporte del café al total de carbono almacenado en un SAF de café fue de 3,77 t/ha. Consecuentemente, los datos del aporte de carbono del

componente café, del presente estudio, fueron ligeramente superiores en relación a los reportados por Ávila y Márquez.

Fassbender *et al* (1985) en un SAF de café + poró y café + laurel en Turrialba, Costa Rica obtuvieron 7,65 y 3,93 t/ha de aporte del café al total de almacenamiento de carbono. En el presente estudio, los cafetales bajo sombra de laurel, aportaron adicionalmente 0,51 toneladas de carbono por hectárea. Mientras que Fournier (1996) encontró 8,4 t/ha en un sistema de café + poró en el Valle central de Costa Rica.

En los cacaotales la tendencia fue diferente, la cobertura de pachaco permitió mayor concentración de carbono en la biomasa de las plantas de cacao (1,98 t/ha). En este caso debido a una mayor luminosidad (la altura y la forma de las copas de los árboles de pachaco permiten mayor ingreso de luminosidad) los cacaotales desarrollaron mayor cantidad de biomasa. En las plantas de cacao sombreadas por la guaba se almacenó 1,83 t/ha y bajo cobertura de laurel 1,59 t/ha (cuadro 3).

Aristizabal *et al* (2002), en Bogotá, Colombia; en sistemas agroforestales de cacao (1 600 arbustos) con laurel, estimó mediante proyecciones que las plantas de cacao, a los seis años de edad, almacenan alrededor de 4,09 t C/ha. Este valor supera a todos los datos generados en los sistemas cacaoteros estudiados, que apenas tenían una densidad poblacional de 833 plantas de cacao por hectárea.

Cuadro 3. Carbono en la biomasa de los cultivos de café y cacao (t/ha), en función de las especies forestales asociadas en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano. 2005.

Especies Forestales	Carbono en la biomasa de los cultivos base (t/ha)	
	Café	Cacao
Guaba	4,79	1,83
Pachaco	3,14	1,98
Laurel	4,44	1,59

4.3. CARBONO ACUMULADO EN LA BIOMASA DE LAS ESPECIES FORESTALES: GUABA, PACHACO Y LAUREL

Los contenidos de carbono determinados en el presente estudio, en el componente forestal o arbóreo de los SAF con café y cacao, corresponden a la fracción almacenada en el fuste, hasta la altura comercial (primera bifurcación o inicio de la copa), no considerándose el carbono capturado a nivel de la biomasa de las copas de los árboles.

El análisis de varianza permitió establecer que existen diferencias estadísticamente significativas entre la guaba, el pachaco y el laurel ($P < 0,05$); en cuanto a la capacidad de almacenamiento de carbono. La interacción cultivo base (CB) x especie forestal (EF), no mostró diferencia estadística significativa, lo cual permite deducir que los cultivos de café y cacao no afectaron el desarrollo de los árboles.

Los promedios generales mantienen la tendencia de superioridad de los árboles de pachaco, en cuanto a la capacidad de almacenamiento de carbono en su biomasa aérea, con 251,4 t/ha; resultando estadísticamente superiores al contenido de carbono de los árboles de guaba en los que se registraron 55,3 t/ha y de laurel con 38,5 t/ha. En términos porcentuales, los árboles de pachaco almacenaron más carbono, 355% adicional comparado con guaba y 553% con laurel. La prueba de Duncan 0,05 permitió establecer en un primer nivel a los contenidos de carbono en la biomasa del pachaco y en un segundo nivel a las de guaba y laurel. Por lo tanto, se resalta la superioridad del pachaco como especie forestal, en cuanto a su capacidad de almacenamiento de carbono.

Al respecto, es necesario destacar lo que reporta Alfaro (1997), las plantaciones de madera para aserrío contribuyen en mayor medida a la mitigación de gases de efecto invernadero que aquellas destinadas para pulpa de papel a para la producción de leña. Sin embargo, las especies para pulpa (como lo es el pachaco), son generalmente de crecimiento más rápido y logran fijar más carbono en poco tiempo. Asamadu (1999), enfatiza en la importancia de las especies forestales de rápido crecimiento para almacenar carbono, se basan en una mayor tasa de fijación.

Alder y Montenegro (1999) indican que el crecimiento del laurel (*Cordia alliodora*) depende sobre todo de la densidad del rodal (número de árboles por hectárea) e índice de sitio. Con una densidad de 400 árboles de laurel/ha, Benítez *et al* (2001), estimaron una biomasa total aérea de alrededor de 220 t/ha después de los 15 años y 250 t/ha después de 20 años. Esta biomasa podría compararse bien con la biomasa estimada para los árboles de laurel, en los SAF de café y cacao, que reportaron a los 6,5 años de edad; 77 t/ha, con una densidad poblacional de 93 árboles por hectárea.

La interacción especie forestal x cultivo base, en términos estadístico no fue significativa, lo que permitió establecer que los contenidos de carbono en la biomasa de los árboles no están relacionados con el tipo de cultivo con que asocian, aunque son ligeramente superiores cuando se combinan en SAF con el cultivo de cacao (figura 3).

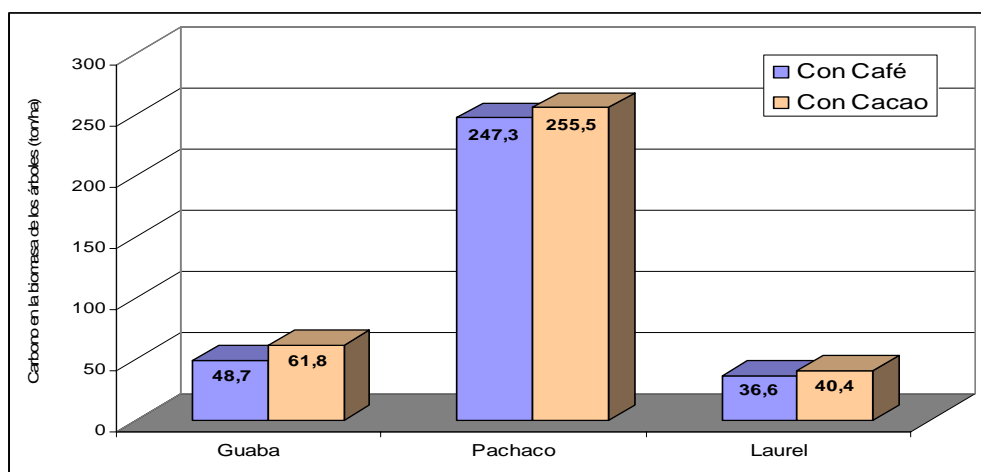


Figura 3. Relación entre los contenidos de carbono (t/ha), en la biomasa de los árboles de guaba, pachaco y laurel, en función de la asociación agroforestal con café y cacao, en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano. 2005.

4.4. CARBONO EN EL CONJUNTO DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES

El análisis de varianza para los contenidos de carbono en los Sistemas Agroforestales, permitió establecer que existe significación estadística ($P < 0,05$); a nivel de las especies forestales. En los cultivos base de los SAF: café y cacao; así como, en la interacción Cultivo base x Especie Forestal, no existen diferencias estadísticas ($P > 0,05$).

Los SAF de Pichilingue presentaron mayor capacidad de almacenamiento de carbono con 207,0 t/ha, en comparación con los SAF de Caluma en los que se registraron 177,2 t/ha. En la zona de Pichilingue, la mayor cantidad de carbono almacenado se determinó a nivel de los árboles con 148,8 t/ha; correspondientes al 71,9% del total, mientras que a nivel del suelo se encontraron 55,4 t/ha (26,8%) y en la biomasa de los cultivos base apenas 2,8 t/ha equivalentes al 1,4% del carbono presente en los sistemas agroforestales. En Caluma, la mayor proporción de carbono se detectó en el suelo de los SAF con 92,8 t/ha que equivalen al 52,4% del carbono total, seguido de los contenidos presentes en la biomasa de las especies forestales con 81,8 t/ha; esto el 45,9% y un porcentaje del 1,7% (3,1 t/ha) que se encontró a nivel de la biomasa de los cultivos de café y cacao.

En este punto es importante volver a resaltar, la capacidad para la acumulación de contenidos muy altos de materia orgánica y por ende de carbono de los suelos de Caluma (Mejía, 1997); y la mayor capacidad productiva de los suelos de Pichilingue que se expresan en los contenidos de carbono sobresalientes a nivel del fuste de los árboles.

En los SAF en base del cultivo de café arábigo, se destaca el asociado a los árboles de pachaco (café + pachaco); con 317,3 t/ha de carbono, de los cuales la mayor proporción (77,9%) se encontró en la biomasa de los árboles con 247,3 t/ha; a nivel del suelo se determinaron 66,9 t/ha correspondientes al 21,1% y en la biomasa de los cafetos 3,1 t/ha equivalentes al 1,0% del contenido de carbono total del sistema. Mediante la prueba de Duncan 0,05 se ubicó en un primer nivel al SAF café + pachaco y en un segundo nivel a los SAF café + guaba y café + laurel (figura 5).

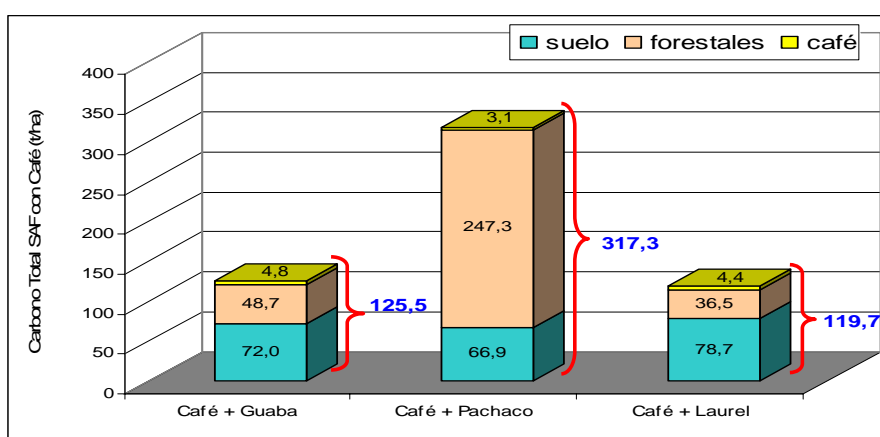


Figura 5. Contenidos absolutos (t/ha) de carbono en los SAF con café, en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano. 2005.

Ávila (2000), encontró que el aporte del carbono del suelo al total del carbono almacenado en los SAF varió entre 89,8% en café + eucalipto a 94,6% en café + poró. Estos datos, junto con

los valores de carbono encontrados en los SAF de café y cacao del presente estudio, ponen en evidencia la importancia del suelo, en almacenamiento de carbono como lo muestran otros estudios de Fassbender *et al* (1985), Márquez (1997), Fournier (1996).

Por otra parte es importante anotar que a pesar de que las cantidades de carbono almacenado en el suelo son bastantes altas, las cifras presentadas podrían estar subestimadas al considerarse solamente los primeros 30 cm de profundidad del suelo y al no considerarse la biomasa radicular, la microfauna y otras formas de vida existentes en el suelo.

Se coincide con Jandl (2001), cuando señala que los suelos agroforestales son grandes depósitos de carbono en los ecosistemas terrestres, por eso merecen atención cuando se buscan mecanismos de secuestro de carbono.

Aristizabal *et al* (2002), en sistemas agroforestales de cacao (1600 arbustos) con laurel (200 árboles/ha), en Colombia, estimaron una capacidad de almacenamiento de carbono, a nivel de la biomasa, por el orden de 18,32 t/ha; inferior a los datos obtenidos en la presente investigación que alcanzaron 42 t/ha. La menor densidad poblacional, tanto del cacao (833 arbustos) como del laurel (93 árboles), menor presión poblacional, parece favorecer la capacidad de almacenamiento de carbono del sistema.

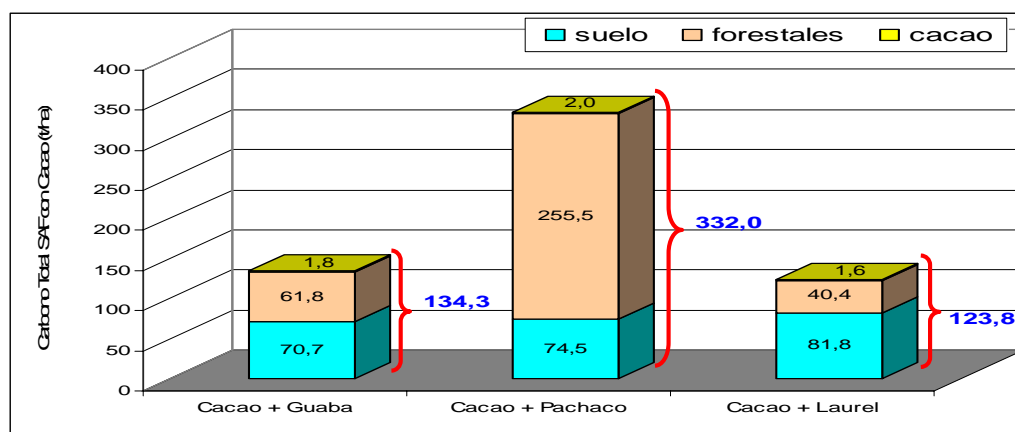


Figura 6. Contenidos absolutos (t/ha) de carbono en los SAF con cacao, en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano. 2005.

En el cuadro 4, se exponen las estimaciones de biomasa aérea y del potencial de captura y/o almacenamiento de carbono, realizadas por varios investigadores, en bosques húmedos tropicales. Los datos de secuestro de carbono, en la biomasa aérea, por parte de los sistemas agroforestales de café y cacao (115 y 121 t/ha), en Caluma y Pichilingue, se encuentran dentro de los rangos encontradas por estas investigaciones. En base de este análisis, se deduce, que los SAF de café y cacao, tienen una capacidad de captura y/o almacenamiento de carbono semejante a los bosques secundarios.

Jandl (2001), señala que los bosques del mundo no tienen la capacidad de almacenar todo el carbono que se emite, pero tienen el potencial de retenerlo durante algunas décadas. Los sistemas agroforestales ofrecen la opción de ganar tiempo, considerando su alta capacidad para fijar carbono a nivel del suelo y de la biomasa, a corto y mediano plazo.

Cuadro 4. Reportes de estimaciones de biomasa aérea y carbono, en el trópico (Adaptado de López, *et al*, 2002).

Tipo de Bosque y SAF	Biomasa (t/ha)	Carbono (t/ha)	Fuente
Tropical de Montano	290	145	Adams, 1997
Tropical premontano húmedo*	284	142	Golley, et al., 1975
Tropical montano húmedo*	428	214	Brun, 1976
Tropical premontano muy húmedo*	362	181	Greenland and Kowal, 1960
Tropical premontano muy húmedo*	456	228	Huttel, 1975
Tropical húmedo (América)*	546	273	Folster, 1989
Tropical secundario (América)	254	127	Folster, 1989
Tropical plantación (América)	310	155	Folster, 1989
Tropical primario (Brasil)	291-398	145 – 199	Alves <i>et al.</i> , 1997
Tropical secundario degradado (Brasil)	143-176	72 – 88	Alves <i>et al.</i> , 1997
Tropical húmedo* (Amazonía - Bolivia)	171	86	Dauber <i>et al.</i> , 2000
Tropical secundario (Venezuela)	464	232	San José <i>et al.</i> , 1998
Tropical húmedo* (Brasil)	356	178	Laurance, 1999
Tropical primario cerrado	334	167	Compilación de Bundestag, 1990
Tropical secundario cerrado	170-270	85 – 135	Compilación de Bundestag, 1990
Tropical húmedo* (Brasil)	318	159	Fujisaka <i>et al.</i> , 1998
Barbecho (Brasil)	136	68	Fujisaka <i>et al.</i> , 1998
Subtropical secundario (Ecuador)	255	128	Fehse <i>et al.</i> , 1999
Tropical húmedo cerrado*	192	96	Brown <i>et al.</i> , 1989
Tropical secundario (improductivo)	138	69	Brown <i>et al.</i> , 1989
Tropical húmedo* (América)	340	170	Brown <i>et al.</i> , 1989
Tropical húmedo y seco* (América)	211	106	Brown <i>et al.</i> , 1989
Tropical húmedo* (Brasil)	300-400	150 – 200	Citado por Brown y Lugo, 1992
Tropical húmedo* (Brasil)	414	207	Citado por Brown y Lugo, 1992
Tropical húmedo* (Brasil)	227	114	Brown y Lugo, 1992
Tropical secundario (Brasil)	200	100	Steininger, 2000
Bosque secundario (Ecuador)	223	112	López <i>et al.</i> , 2002
SAF con café	230	115	Corral, 2005 (presente estudio)
SAF con cacao	242	121	Corral, 2005 (presente estudio)

* Bosque no intervenido

4.5. VALORACION DEL SERVICIO DE CAPTURA DE CARBONO

El precio de referencia fijado para este análisis, es de \$US 10,00/t carbono valor empleado en los internacionales de valoración de servicios ambientales. La valoración de servicio ambiental, por el reconocimiento de la captura de carbono, de los sistemas agroforestales, en los estratos evaluados (a nivel del suelo y de la biomasa aérea), se presenta en el cuadro 5. Los mayores ingresos, por el reconocimiento del servicio de almacenamiento de carbono, a nivel del suelo, se reportan en los SAF cacao + laurel (\$US818) y café + laurel (\$US787). La importancia del carbono almacenado a nivel del suelo de los sistemas agroforestales y por consiguiente su reconocimiento en las propuestas de valoración, podrían incrementar notablemente los ingresos que se generarían con la comercialización de bonos de carbono.

Los contenidos de carbono en la biomasa de los SAF, son decisivos en la determinación de los ingresos, para el reconocimiento de los contenidos de carbono globales en los sistemas agroforestales de café y cacao. Con el reconocimiento aditivo (carbono en el suelo + carbono en la biomasa), los SAF de cacao + pachaco serían los que permitirían mayores ingresos (\$US3 320), ligeramente superiores a los valores que se obtendrían en los SAF de café + pachaco (\$US3 173).

En las condiciones del presente estudio, y bajo la modalidad de valoración propuesta, los sistemas cacaoteros obtendrían mayores ingresos (\$US1 967), en comparación con los sistemas cafetaleros con \$US1 875 en el caso de reconocerse el servicio de almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa aérea.

Cuadro 5. Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales de café y cacao. 2005.

SAF	Valoración del Servicio Ambiental (dólares)		
	Valor del Carbono en el suelo	Valor del Carbono de la Biomasa Aérea	Valor del Carbono de los SAF
	A	B	A + B
Café + Guaba	720	535	1 255
Café + Pachaco	669	2 504	3 173
Café + Laurel	787	410	1 197
SAF con Café	726	1 150	1 875
Cacao + Guaba	707	636	1 343
Cacao + Pachaco	745	2 575	3 320
Cacao + Laurel	818	420	1 238
SAF con Cacao	757	1 210	1 967

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el estudio de *Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábigo y cacao, en dos zonas agro ecológicas del litoral ecuatoriano*, permitieron establecer las siguientes conclusiones:

- Los suelos de Caluma presentaron una mayor capacidad de almacenamiento de carbono (92,8 t/ha), en comparación a los suelos de Pichilingue (55,4 t/ha). Esta situación obedece a la influencia de factores edafo climáticos que inciden en la acumulación de contenidos muy altos de materia orgánica y por consiguiente de carbono en la zona de Caluma.
- En la localidad de Pichilingue se determinó una mayor capacidad de captura de carbono a nivel de la biomasa aérea de los SAF con café y cacao (151,6 t/ha), frente a 84,4 t/ha de Caluma. Esto implica un alto grado de extracción de nutrientes del suelo, expresado en un mayor desarrollo del componente arbóreo en Pichilingue.
- Los suelos de los sistemas agroforestales con café y cacao, son depósitos importantes de carbono: 72,5 y 75,7 t/ha, respectivamente. Los contenidos de carbono almacenados en el suelo, son el producto del constante flujo de materia orgánica aportado por la biomasa vegetal.

- A nivel de la biomasa aérea de los cafetos, se determinó un contenido de 4,12 t C/ha; mientras que en los arbustos de cacao, fue de 1,80 t C/ha. Esto representa el 2,24% y el 0,92% del contenido total de carbono en los SAF con café y cacao, respectivamente.
- La asociación de especies forestales de rápido crecimiento, como el pachaco (*Schizolobium parahyba*), con los cultivos de café y cacao, en sistemas agroforestales, permite incrementar los contenidos de carbono a nivel de la biomasa que esta determinada por la capacidad de crecimiento de los árboles y su capacidad de almacenamiento de carbono.
- Los SAF de café y cacao, tienen una capacidad de captura y/o almacenamiento de carbono de 115 y 121 t/ha, respectivamente. Esta situación, a nivel de la biomasa aérea, resulta semejante a la captura de carbono en los bosques secundarios del trópico.
- Los sistemas agroforestales en base del cultivo de café, tienen un potencial de fijación de carbono de 187,5 t/ha (carbono del suelo + carbono de biomasa aérea), a los 6,5 años después de su plantación. En el caso de los sistemas agroforestales con cacao, se determinó 196,7 t C/ha a la misma edad mencionada.
- Los ecosistemas cafetaleros y cacaoteros son cultivos ecológicamente amigables que favorecen la protección del ambiente. Por estas consideraciones, al contribuir a la fijación de carbono atmosférico, deberían ser incluidos en los planes de pago por servicios ambientales, dentro de las propuestas de Mecanismo de Desarrollo Limpio.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Alder, D., Montenegro, F. 1999. A yield model for *Cordia alliodora* plantations in Ecuador. *International Forest Review* 1 (4): 242-250.
- Alfaro, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistemas forestales. *Revista Forestal Centroamericana* N° 19: 9-12.
- Alvarado, J., López de León, E., Medina, M. 1999. Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agro ecosistema café en Guatemala. *Boletín PROMECAFE. IICA. N° 81: 7-14.*
- Aristizabal, J., Guerra, A., Gutiérrez, B., y Romero, M. 2002. Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema *agroforestal nogal cafetero (Cordia alliodora) – cacao (Theobroma cacao) – plátano (Musa paradisíaca)*. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Distrital Francisco José Caldas. Bogotá, Colombia. 107 P.
- Asociación Nacional de Café (ANACAFE). 1988. Cuantificación estimada de dióxido de carbono fijado por el agro ecosistema café en Guatemala. Guatemala. 35 P.
- Asumadu, K. 1999. El comercio del derecho de emisión: una nueva oportunidad para los países productores de maderas tropicales. *Actualidad Forestal Tropical*. 6 (4):2.
- Ávila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 99 P.
- Benítez, P., Olschewski, R., de Koning, F., López, M. 2001. Análisis costo – beneficio de usos del suelo y fijación de carbono en sistemas forestales de Ecuador Noroccidental. Informe TWF-30s del Programa de Apoyo Ecológico de la Cooperación Técnica Alemana. Eschborn, Alemania. 82 P.
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E., Baumgardner, G. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecología*. 111: 1-11.
- Fassbender, H., Alpizar, L., Heuvelodp, J., Enriquez, G; y, Folsters, H. 1985. Sistemas Agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) o poró (*Erythrina poeppigiana*), en Turrialba, Costa Rica. In *Biomasa y reservas nutritivas*. Turrialba. 35 (3): 233-242.

- Fournier, L. 1996. Fijación de carbono y diversidad biológica en el agro ecosistema cafetalero. Boletín PROMECAFE. IICA. N° 71: 7-13.
- Jandl, R. 2001. Secuestro de carbono en bosques – El papel del suelo. Centro de Investigación Forestal. Viena, Austria. In memorias de taller internacional sobre secuestro de carbono. 9 P.
- López, M., de Koning, F., Paredes, H., Benítez, P. 2002. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el noroccidente de Ecuador. GTZ. Eschborn, Alemania. 34 P.
- López, M., de Koning, F., Veldkamp, E. 2002. Comparación de carbono en el suelo de pastos y bosques en el noroccidente de Ecuador. Programa de Apoyo Ecológico de la Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Eschborn, Alemania.
- Márquez, L. 1997. Validación en campo de los métodos del Instituto Winrock para el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para cuantificar carbono en sistemas agroforestales. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 45 P.
- Mejía, L. 1997. Suelos del Ecuador. Reconocimiento general en base a su capacidad – fertilidad y mapa general de clasificación por capacidad – fertilidad. Quito, Ecuador. 57 P.
- Montenegro, J. y Abarca, S. 2001. Emisión de gases con efecto invernadero y fijación de carbono en el sistema de producción de café (*Coffea arabica*) en Costa Rica. Boletín PROMECAFE. N 89. Tegucigalpa, Honduras. 9 / 17 pp.