



Anales Científicos

ISSN 2519-7398 (Versión electrónica)
Website: <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/index>

Mitigación del cambio climático a través del secuestro y almacenamiento del carbono y evaluación de los servicios ambientales del SAF caucho o jebe (*Hevea brasiliensis*) y cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tingo María

Climate change mitigation through carbon capture and sequestration and evaluation of the environmental services of rubber AFS (*Hevea brasiliensis*) and cocoa (*Theobroma cacao* L.) in Tingo Maria

José Wilfredo Zavala Solórzano^{1*}; Luis Mansilla Minaya²; Sandra L. Zavala Guerrero³; Érica G. Merino Maguiña⁴

¹ Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. Email: wilzaso1961@hotmail.com

Recepción: 08/10/2018; Aceptación: 05/06/2019

Resumen

La investigación tuvo como objetivo determinar la biomasa y el contenido de carbono almacenado en el sistema agroforestal de jebe (*Hevea brasiliensis*) con cacao (*Theobroma cacao* L.), en un suelo aluvial (Entisols) del fundo agrícola de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en Tingo María, Perú, con la finalidad de determinar el almacenamiento de carbono y los servicios ambientales, como medida de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) y el cambio climático. Para ello, se determinó el contenido de carbono almacenado en el perfil de suelo del gran paisaje de planicie, terraza baja, a diferentes profundidades, la biomasa y carbono almacenado en la plantación de jebe y cacao y se identificaron los efectos del Sistema Agroforestal (SAF) en algunos servicios ambientales. La biomasa aérea total que se obtuvo en el SAF fue de 281,43 t.ha⁻¹ conformada por la biomasa de árboles vivos (198,10 t.ha⁻¹), biomasa del cacao (61,39 t.ha⁻¹), biomasa de hojarasca (13,49 t.ha⁻¹) y la biomasa arbustiva (8,45 t.ha⁻¹). El carbono almacenado en la biomasa del SAF fue de 0,405 t C.ha⁻¹ en los arbustivos, 1,98 t C.ha⁻¹ en la hojarasca, 10,42 t C.ha⁻¹ en el cacao, 35,17 t C.ha⁻¹ en el componente arbóreo y 158,24 t C.ha⁻¹ en el suelo representando el 0,19, 0,96, 5,05, 17,05 y 76,73% respectivamente, con un total de carbono almacenado en el SAF de jebe de 206,21 t C.ha⁻¹. La mayor captura de carbono total almacenado se dio en el ecosistema terrestre (suelo) con 158,24 t C.ha⁻¹ y la menor captura fue el componente arbustivo con 0,405 t C.ha⁻¹. Asimismo, la edad del cultivo de jebe es un factor que influye en el secuestro y almacenamiento de carbono; por otro lado, las plantaciones de caucho o jebe en SAF con cacao, brindan servicios ambientales. El SAF jebe cacao disminuyó el calor y generó microclimas favorables; demostrándose que existe

Forma de citar el artículo: Zavala et al. 2019. Mitigación del cambio climático a través del secuestro y almacenamiento del carbono y evaluación de los servicios ambientales del SAF caucho o jebe (*Hevea brasiliensis*) y cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tingo María. Anales Científicos 80 (2):462-475 (2019).

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i2.1478>

Autor de correspondencia (*): José Wilfredo Zavala Solórzano. Email: wilzaso1961@hotmail.com

© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

una alta significación entre la temperatura promedio y la humedad relativa dentro de las parcelas del SAF. También la luminosidad influyó en el SAF, demostrándose que los SAF controlan la radiación de los rayos ultravioletas y los infrarrojos que, de alguna manera, influyen en el cambio climático. Finalmente, el Valor Actual Neto (VAN) para los sistemas agroforestales con cacao de 6 a 8 años, alcanza un valor inferior al sistema del jebe de más de 60 años, en el cual el VAN para el jebe es de 1480,5, mientras que para el cacao fue de 1360,6. Asimismo, el TIR para el jebe fue de 22,80% y para el cacao fue de 20,60%, con una relación B/C de 1,39 para el jebe y 1,24 para el cacao de 6 a 8 años. La relación beneficio costo de 1,39 y 1,24, que corresponde a los sistemas entre 8 y 16 años para el cacao y mayor a 60 años para el jebe, se puede interpretar que por cada sol que se invierte se obtiene una ganancia de S/ 0,39 y 0,24, respectivamente.

Palabras clave: VAN; TIR; captura; secuestro; almacenamiento; dióxido de carbono; biomasa; carbono almacenado; SAF.

Abstract

The objective of the research was to determine the amount of biomass and its carbon content stored in the agroforestry systems of rubber (*Hevea brasilienses*) with cocoa (*Theobroma cacao* L.) in an alluvial soil (Entisols) in the agricultural farm of the faculty of agronomy of the Universidad Nacional Agraria de la Selva in Tingo Maria, Peru, with the purpose of determining the carbon storage and environmental services, as a mitigation measure of greenhouse gas (CO₂) emissions and climate change. For that, the carbon content stored in the soil profile of the large plain landscape, low terrace at different depths, the biomass and carbon stored in the rubber and cocoa plantations were determined. Also the AFS effects over some environmental services were identified. The total aerial biomass obtained in the AFS was of 281, 43 t.ha⁻¹ conformed by the live tree biomass (198,10 t. ha⁻¹), cocoa biomass (61,39 t. ha⁻¹), leaf litter biomass (13,49 t.ha⁻¹) and the shrub biomass(8,45 t.ha⁻¹). The carbon stored in the biomass of the rubber AFS was; in shrubs 0,405 t C.ha⁻¹; leaf litter 1,98 t C.ha⁻¹, for cocoa 10,42 t C.ha⁻¹, in the arboreal component 35;17 t C ha⁻¹ and in the soil 158,24 t C.ha⁻¹ representing 0,19%, 0,96%, 5,05%, 17,05% and 76,73% respectively, with a total carbon stored in the rubber AFS of 206,21 t C.ha⁻¹. The highest total carbon capture stored was in the terrestrial ecosystem (soil) with 158,24 t C. ha⁻¹ and the lowest capture was the shrub component with 0,405 t C.ha⁻¹. Also, the age of the rubber cultivation is a factor that influences carbon sequestration and storage. On the other hand, rubber plantations in AFS with cocoa, provide environmental services. The rubber/cocoa AFS, decreased the heat and generated favorable microclimates, proving that there is a high significance between the average temperature and relative humidity within the AFS allotment. Also the luminosity influenced the rubber AFS, showing that AFS control the ultraviolet radiation and infrared rays that somehow have influence over climate change. Finally, the Net Present Value (NPV) for the agroforestry systems with cocoa from 6 to 8 years, reaches a value lower than the rubber system of more than 60 years, in which the NPV for the rubber was 1480,5, while for the cocoa was 1360,6, also the IRR for the rubber was 22,80% and for cocoa was 20,60%, with a cost-benefit ratio of 1,39 and 1,24 corresponding to the systems between 6 to 8 years for the cocoa and more than 60 years for the rubber; it can be interpreted that for each Peruvian Sol (PEN) that is inverted, a profit of S/ 0,39 and 0,24 (PEN) is obtained, respectively.

Keywords: NPV; IRR; capture; sequestration; storage; carbon dioxide; biomass; stored carbon; AFS.

1. Introducción

La Amazonía tropical, con sus ecosistemas, son la base de la existencia de una inmensa mayoría de la población mundial. Sin embargo, la progresiva destrucción y degradación de los recursos naturales en los países en desarrollo, por culpa de los países desarrollados, amenazan el éxito de los esfuerzos que se realizan para lograr un desarrollo sostenible y combatir de manera eficaz la pobreza. El protocolo de Kyoto y las subsiguientes Conferencias de las Partes (COP) de la convención de Cambio Climático han despertado interés sobre el potencial de los ecosistemas de los bosques secundarios y plantaciones forestales para fijar y almacenar carbono. Los cambios climáticos que en la actualidad están ocurriendo en el planeta, se atribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes fuentes. La quema de combustibles fósiles y la producción de cemento en los países industrializados, así como la deforestación y el cambio de uso de tierras en países tropicales son la principal fuente de emisión de CO₂, por lo que es necesario estabilizar y mitigar estas concentraciones, mediante el control de emisiones y flujos de CO₂ y la aplicación de otras medidas. De este modo, los bosques y sistemas agroforestales adquieren protagonismo por su capacidad de fijar C y mitigar emisiones de CO₂. Asimismo, el efecto invernadero está generando un incremento de la temperatura por el reingreso y la no salida de los rayos infrarrojos, lo cual incrementa en 2 a 3 grados centígrados la temperatura, generando el deshielo de los glaciares o el retroceso de los glaciares. Asimismo, el calentamiento global y el cambio climático en nuestro planeta, afecta a los principales países que presentan una alta biodiversidad, para lo cual es necesario tener como una medida de mitigación la implementación de los sistemas integrales de producción, principalmente a los SAF (Zavala, 2015). En este contexto, es necesario cuantificar la fijación de carbono

mediante el crecimiento natural de los bosques secundarios o por plantaciones agroforestales, para implementar procesos de valoración económica, definición de línea de base, certificación y monitoreo en proyectos de venta de certificados de reducción de emisiones de C.

Se tienen referencias históricas detalladas del efecto que ejerció la actividad cauchera luego de la creación del departamento de Madre de Dios y, en especial, de la ciudad de Iberia a partir del fundo 'Iberia', con un área de influencia de 4000 km² del cauchero peruano Máximo (Ríos, 2007). En la actualidad, existen pocas plantaciones de caucho natural, al haber sido remplazadas por los hidrocarburos; sin embargo, sus propiedades y, sobre todo, los servicios ambientales que ofrecen son altos para ayudar a controlar o mitigar el efecto invernadero, el calentamiento global y el cambio climático. Las plantaciones de jebe o caucho ocupan más de 200 000 hectáreas en tres continentes (África, Asia y América) y, en el Perú, aproximadamente 10 000 ha. Actualmente, no se da mucha importancia a las investigaciones del cultivo del caucho debido a que ha sido reemplazado por los hidrocarburos en el mercado internacional de fabricación de llantas; sin embargo, se empieza a retomar las investigaciones con fines de agroforestería y de servicios ambientales que ofrecen estos bosques remanentes en la Amazonía, y que se puede utilizar para la explotación de los SAF con cacao y otros cultivos agrícolas, como el achiote (Márquez, 2005).

Los diferentes métodos para estimar la cantidad de carbono existente en todos los vegetales, son el método destructivo que, según Hernández (2001), utiliza datos colectados a partir de las mediciones destructivas de la vegetación en una unidad de superficie determinada. Por su alto costo, generalmente no se aplica, teniendo como alternativa el método alométrico que consiste en medir una parte del individuo

para inferir el total. Como una primera aproximación, se estimaron a partir de datos de volumen de fuste y valores de densidad de biomasa aérea arbórea (BA) de los bosques regionales, aplicando las ecuaciones alométricas desarrolladas por Barbarán (1998). La biomasa aérea arbórea se estima, usualmente, mediante la aplicación de ecuaciones de regresión alométrica a un conjunto de árboles de una parcela media. De acuerdo con Hernández (2001), citado por Barbarán (1998), su método se puede aplicar de manera general a bosques secundarios y maduros presentes desde climas húmedos y secos. Sin embargo, es más apropiada usarlo en bosques densos ya que los datos originales usados para desarrollar el método, provinieron de tales tipos de bosques.

Por otro lado, el papel del carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra, se evalúan con el almacenamiento de carbono en diferentes áreas tropicales y se puede obtener un almacenamiento de 21 a 50 t C.ha⁻¹ en zonas subhúmedas a húmedas, respectivamente, y con ciclos de corte de ocho o cinco años, mucho más cortos que en los bosques. En estos cálculos no se incluyó el carbono del suelo, sin embargo, las raíces por sí solas podrían incrementar esos valores en 10% (Arévalo *et al.*, 2002). Recientemente, encontraron tasas de acumulación potencial de carbono más bajas en los suelos forestales (0,3 a 0,6 t/ha/año) que en los suelos de praderas. Las enmiendas de suelos con carbonato de calcio o la fertilización incrementan la biomasa, tanto aérea como en el suelo, siempre que no haya otras condiciones limitantes (Ordoñez, 1999).

En general, el contenido de carbono de un suelo bajo pasturas es mayor que bajo cultivos; sin embargo, el 70% de las tierras de pastoreo están degradadas. El sobre pastoreo es una de las principales causas de la degradación, especialmente en zonas sub húmedas, semiáridas o áridas donde

predominan las pasturas (Arévalo *et al.*, 2002).

En lo que se refiere al suelo, uno de los principales factores limitantes para el crecimiento de las plantas es la deficiencia de nutrientes. La fertilización en bajas dosis puede ser una solución (tal vez con fósforo en lugar de nitrógeno). Sin embargo, una mejor fertilización nitrogenada, más ecológica y más sostenible, se obtiene mediante la introducción de leguminosas fijadoras de nitrógeno. Otra solución puede ser la modificación de la calidad del pastoreo e introducir especies más productivas con sistemas radicales más profundos, más resistentes a la degradación de las pasturas. Todas estas soluciones incrementarán en buena medida la captura de carbono, ya que las pasturas pueden almacenar muy altas cantidades de carbono en forma estable. Paralelamente, el incremento de los rendimientos también puede ser importante, duplicando o triplicando la producción (Suárez, 2002).

Como se indicó anteriormente, el manejo del suelo y de los cultivos puede mejorar en forma importante el tiempo de residencia y el almacenamiento del nuevo carbono en el suelo, lo cual es digno de consideración en el Protocolo de Kyoto o en cualquier acuerdo post Kyoto. Los diferentes tipos de usos de la tierra y de prácticas agronómicas fueron evaluados con respecto a su efecto sobre la captura y la liberación de carbono (DZIB, 2003). Es por ello que el presente trabajo propone estudios para determinar qué cantidades de carbono almacenan los sistemas agroforestales con jébe y cacao en el fundo agrícola de la UNAS, planteando la investigación con miras futuras, para el establecimiento e implementación de los servicios ambientales como el almacenamiento de carbono que ofrece cada uno de ellos y las posibilidades de mitigar el cambio climático.

2. Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la parcela de jebe del fundo Agrícola de la Facultad de Agronomía, ubicada en el distrito Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, el cual se encuentra a una altitud de 645 m s.n.m. El cultivo de jebe asociado al cacao evaluado tiene un promedio de 60 años de edad y una extensión de 0,5 hectáreas, a un distanciamiento de 4 x 4 m, asociado con cacao, guaba y otras especies forestales.

El presente trabajo se realizó en dos etapas: una fase de campo, donde se trazaron tres transectos en el shiringal, para luego realizar las evaluaciones correspondientes, y otra fase de laboratorio donde se realizó la determinación de carbono como se describe a continuación.

Determinación de biomasa en sistema agroforestal

Biomasa vegetal aérea total (BVT)

Para calcular la cantidad de biomasa total se sumó la biomasa de todos los árboles medidos y registrados (BTAV) en la parcela de 4 m x 25 m. La metodología que se siguió corresponde a lo establecido por [Catie \(2005\)](#), usando la siguiente fórmula:

$$BVT (t. ha^{-1}) = (BTAV + BAH + Bh) \quad (1)$$

Donde:

BVT = Biomasa vegetal total t.ha⁻¹

BTAV = Biomasa total de árboles vivos de 4 m x 25 m o 4 m x 100 m

BAH = biomasa arbustiva y herbácea

Bh = Biomasa de la hojarasca, materia seca

Biomasa arbórea viva (jebe, cacao y otras especies)

Evaluación de la especie de jebe

Se estimó la biomasa arbórea encontrada en el transecto trazado de 4 m x 25 m, la

cual fue determinada por las medidas del diámetro a la altura del pecho (DAP_{2.25m}). Se calculó la biomasa de cada uno de los árboles vivos en pie, utilizando el siguiente modelo de ecuación recomendado por Arévalo *et al.* (2002):

$$BA = 0,1184 \text{ dap}^{2,53} \quad (2)$$

Donde:

BA = Biomasa árboles vivos (kg. árbol⁻¹)

0,1184 = Constante

Dap = Diámetro a la altura del pecho (cm)

2,53 = Constante

Para árboles que se ramificaron debajo del DAP, se estimó su biomasa después de calcular el diámetro general del árbol, utilizando la fórmula raíz cuadrada de la suma de las ramas individuales.

$$d = \sqrt{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n} \quad (3)$$

También se consideró nominarse en todos los casos los nombres locales de cada árbol, si era ramificado (R) o no (NR); también el uso del índice de la densidad de la madera de la especie (alta 0,6, media 0,4 y baja 0,2).

Evaluación de la biomasa de las plantas de cacao

Se calculó realizando la evaluación de todas las plantas de cacao, considerando el área de evaluación, determinando el diámetro del tallo a 30 cm del suelo y la altura total de la planta. Una vez determinadas las medidas, se procedió a realizar el cálculo de la biomasa del cacao, para lo cual se usó el modelo de tipo logarítmico, utilizando Diam₃₀ como variable independiente. La ecuación empleada fue la recomendada por [Suárez \(2005\)](#):

$$\text{Ln}B = -2,39 + 0,95 \text{Ln}(d) + 1,27 \text{Ln}(h) \quad (4)$$

Donde:

B = Biomasa

Ln = Logaritmo natural

d_{30cm} = diámetro (cm)

h = altura (m)

Constantes = - 2,39; 0,95 y 1,27

Biomasa arbustiva y herbácea

En la biomasa arbustiva y herbácea se consideró las plantas con tallos menores a 2,5 cm de diámetro, gramíneas y otras hierbas. La biomasa se estimó por muestreo directo en tres cuadrantes de 1 m x 1 m, distribuidas al azar dentro de las parcelas de 4 m x 25 m y en 4 m x 100 m cortándose la vegetación a nivel del suelo y llenándose en bolsas plásticas. Luego, se trasladó al laboratorio registrándose el peso fresco total por metro cuadrado, del cual se sacó una sub muestra y también se registró el peso fresco, luego se colocó en una bolsa de papel debidamente codificada y se colocó en la estufa por 24 horas a temperaturas de 75°C a más, hasta obtener peso seco constante. El peso seco de esta biomasa se convirtió a $t.ha^{-1}$. Para estimar la biomasa arbustiva/herbácea se utilizó la siguiente ecuación planteada por [Catie \(2005\)](#):

$$BAH(t.ha^{-1})=((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,01 \quad (5)$$

Donde:

BAH= Biomasa arbustiva/herbácea, materia seca

PSM = Peso seco (g) de la muestra colectada

PFM = Peso fresco (g) de la muestra colectada

PFT = Peso fresco total (g) por metro cuadrado

0,01 = Factor de conversión

Biomasa de la hojarasca

Se cuantificó en base a la hojarasca y otros materiales muertos (ramillas, ramas) en

cuadrantes de 0,5 m x 0,5 m colocados dentro de cada uno de los cuadrantes de 1 m x 1 m. Se colocó toda la hojarasca en bolsas de polietileno con su codificación correspondiente y fueron enviadas al laboratorio de análisis de suelo para su evaluación, donde se registró su peso fresco total por 0,25 m²; de esta se sacó una muestra y se registró su peso fresco y luego se colocó en una estufa a temperatura constante de 75 °C, hasta obtener un peso seco constante. El peso seco de esta biomasa se convirtió en $t.ha^{-1}$ y este valor se multiplicó por el factor de 0,45, obteniéndose la cantidad de $C.ha^{-1}$. Para lo cual se utilizó la siguiente formula:

$$Bh(t.ha^{-1})=((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,04 \quad (5)$$

Donde:

Bh = Biomasa de la hojarasca, materia seca

PSM = Peso seco (g) de la muestra colectada

PFM = Peso fresco (g) de la muestra colectada

PFT = Peso fresco (g) total por metro cuadrado

0,04 = Factor de conversión

Determinación del carbono total almacenado en el SAF

Para determinar la biomasa aérea total se utilizó la siguiente ecuación:

$$CBV(t.ha^{-1})=BVT \times 0,45 \quad (7)$$

Donde:

CBV= Carbono en la biomasa vegetal

BVT= Biomasa vegetal total

0,45= Constante determinada por convención

Determinación de carbono en el suelo

En los cuadrantes señalados para el muestreo de biomasa herbácea, se hicieron

minicalicatas de 0,5 m de profundidad, donde se definió las capas de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm y 20 a 30 cm.

Cálculo de la densidad aparente del suelo (g/cc)

$$DA(\text{g/cc}) = \text{PSN} / \text{VCH} \quad (8)$$

Donde:

DA (g/cc) = Densidad aparente, en g/cc

PSN = Peso seco del suelo dentro del cilindro

VCH = Volumen cilindro (constante)

Cálculo del peso del volumen de suelo por horizonte de muestreo

$$\text{PVs}(\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}) = \text{DA} \times \text{Ps} \times 10\,000 \quad (9)$$

Donde:

PVs = Peso del volumen de suelo

DA = Densidad aparente

Ps = Espesor o profundidad del horizonte del suelo

10 000 = Constante

El carbono en el suelo fue determinado a través de la descripción morfológica del perfil haciendo minicalicatas, donde mostraron una conformación diferente de sus horizontes o capas, por lo cual se realizó la extracción de muestras de suelos (0,5 kg) de cada uno de los horizontes para realizar el cálculo del contenido de carbono en el laboratorio a través del método de calcinación. Cabe mencionar que el contenido del suelo para cada sistema fue determinado por la suma de todos sus horizontes.

El método de calcinación consistió en tomar el peso inicial de un crisol, luego el peso del mismo más 1 g de suelo seco; el suelo fue luego llevado a una mufla a temperaturas superiores a los 600 °C por un lapso de 48 horas, obteniéndose la ceniza. Conocidos los pesos del suelo

y ceniza, se determinó el porcentaje de materia orgánica:

$$\text{MO} = 1 - (W_c - (W_{c+\text{cenizas}})) \quad (10)$$

Donde:

MO = Materia orgánica

W_c = Peso del crisol (g)

$W_{c+\text{cenizas}}$ = Peso del crisol (g) más cenizas

Cálculo del carbono en el suelo:

$$\text{CS}(\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}) = (\text{MO} \times 100) / 1,724 \quad (11)$$

Donde:

CS = Carbono en el suelo en t/ha

MO = Materia orgánica

1,724 = Coeficiente de Van Vanmelen

Cálculo del carbono total del sistema de uso de tierra ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$):

$$\text{CT}(\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}) = \text{CBV} + \text{CS} \quad (12)$$

Donde:

CT = Carbono total del sistema de uso de tierra

CBV = Carbono en la biomasa vegetal total

CS = Carbono en el suelo

3. Resultados y discusión

Densidad aparente del suelo y carbono orgánico

Durante los trabajos efectuados se evaluó la densidad aparente del suelo por capas, teniendo entre 1,40 a 1,10 g/cc, como promedio; asimismo, en cada una de las capas se determinó el porcentaje de carbono orgánico, así como el carbono orgánico total por hectárea. Al respecto, se encontró que entre 0 a 10 cm existe mayor cantidad de carbono en porcentaje y total por hectárea,

con un promedio de carbono orgánico por hectárea de 25,172 toneladas. A medida que se profundiza en el suelo, su densidad

desciende de 1,40 a 1,10; asimismo, el carbono orgánico en porcentaje de 1,798 a 0,4408 o de 25,172 a 4,849 t. ha⁻¹ (Tabla 1).

Tabla 1. Densidad aparente del suelo por capas de carbono orgánico en porcentaje y carbono orgánico total/ha

Sub-parcela de jebe	Campo Profundidad del suelo	Densidad y carbono orgánico		Carbono orgánico del suelo t. ha ⁻¹
		Densidad aparente t/m ³	carbono orgánico %	
A1	0 - 10 cm	1,40	1,798	25,172
	10 - 20 cm	1,20	0,9686	11,623
	20 - 30 cm	1,10	0,4408	4,849
	Subtotal	1,23	1,0691	41,644
A2	0 - 10 cm	1,36	1,798	24,453
	10 - 20 cm	1,19	0,9686	11,526
	20 - 30 cm	1,05	0,4408	4,628
	Subtotal	1,2000	1,0691	40,608
A3	0 - 10 cm	1,38	1,798	24,812
	10 - 20 cm	1,26	0,9686	12,204
	20 - 30 cm	1,1	0,4408	4,849
	Subtotal	1,2467	1,0691	41,866
A4	0 - 10 cm	1,34	1,798	24,093
	10 - 20 cm	1,23	0,9686	11,914
	20 - 30 cm	1,06	0,4408	4,672
	Subtotal	1,2100	1,0691	36,400
B1	0 - 10 cm	1,36	1,798	24,453
	10 - 20 cm	1,29	0,9686	12,495
	20 - 30 cm	1,01	0,4408	4,452
	Subtotal	1,2200	1,0691	41,400
B2	0 - 10 cm	0,9	1,798	16,182
	10 - 20 cm	1,28	0,9686	12,398
	20 - 30 cm	1,3	0,4408	5,730
	Subtotal	1,1600	1,0691	34,310
B3	0 - 10 cm	0,96	1,798	17,261
	10 - 20 cm	1,32	0,9686	12,786
	20 - 30 cm	1,14	0,4408	5,025
	Subtotal	1,1400	1,0691	35,071
B4	0 - 10 cm	0,95	1,798	17,081
	10 - 20 cm	1,23	0,9686	11,914
	20 - 30 cm	1,34	0,4408	5,907
	Subtotal	1,1733	1,0691	34,902
B5	0 - 10 cm	1,34	1,798	24,093
	10 - 20 cm	1,28	0,9686	12,398
	20 - 30 cm	1,12	0,4408	4,937
	Subtotal	1,2467	1,0691	41,428

Servicios ambientales que ofrecen los SAF jebe con cacao

Las plantaciones de caucho o jebe en SAF con cacao, brindan servicios ambientales como control de la temperatura, humedad relativa,

luminosidad y horas de sol, microclimas favorables, control de malezas, así como secuestro, captura y almacenamiento del dióxido de carbono en el suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Servicios ambientales con respecto a la variación de la temperatura, humedad relativa y luminosidad en los transectos de la parcela agroforestal, jebe-cacao, dentro de la parcela SAF y fuera de la parcela

Hora de Evaluación	N° de Repeticiones	Registro T° °C	En el HR %	Interior Luminosidad Lux	Registro T° °C	En el HR %	Exterior Luminosidad Lux
8.00 a.m.	01	25,4	80	167	26,6	77	489
	02	24,8	82	189	27,1	76	318
	03	25,3	84	238	26,9	77	634
	04	24,7	81	160	26,4	78	756
	05	24,6	84	189	26,8	76	810
	06	25,2	79	145	27,1	76	789
	07	24,7	81	210	26,2	75	820
	08	25,4	83	179	26,7	77	978
	09	24,9	84	169	26,4	75	789
	10	24,2	81	200	26,9	76	910
Prom.		24,92	81,9	184,6	26,71	76,3	729,3
1.00 p.m.	01	27,2	79	188	29,9	69	4250
	02	27,7	78	240	30,4	57	3160
	03	27,4	79	290	31,2	54	3900
	04	27,9	77	310	29,8	62	3789
	05	27,4	79	430	31,2	60	4589
	06	27,2	78	748	30,1	55	5678
	07	27,6	75	458	29,7	67	2890
	08	27,8	77	378	30,5	58	2740
	09	27,1	78	560	30,2	58	5700
	10	27,2	79	199	30,4	59	4590
Prom.		27,45	77,9	380,1	30,34	60,5	4128,6
5.00 p.m.	01	24,7	85	189	26,2	74	890
	02	24,3	84	180	26,4	73	780
	03	24,7	83	210	26,5	70	890
	04	25,1	82	236	26,3	72	1023
	05	24,2	84	185	26,1	78	670
	06	24,6	81	169	26,7	70	969
	07	24,2	84	176	26,2	76	1289
	08	24,8	83	189	25,9	72	990
	09	24,1	82	159	26,4	71	835
	10	25,2	80	230	26,8	73	967
Prom.		24,59	82,8	192,3	26,35	72,9	930

Habiéndose encontrado temperaturas promedios de 26,71 grados fuera de las parcelas SAF jebe con cacao a las 8 a.m.; siendo 30,34 grados a la 1.00 p.m. de la tarde y 26,35 a las 5 p.m. y, dentro de las parcelas, un promedio de 24,92 grados a las 8 a.m., 27,45 grados a la 1.00 p.m. y 24,59 a las 5 p.m.; notándose que el SAF jebe cacao, disminuye el calor y genera microclimas favorables; asimismo, que la humedad relativa del ambiente fuera de la parcela fue de 66%, 70% y 72,9% a las 8 a.m., 1.00 p.m. y 5.00 p.m. y, dentro de la parcela, se incrementó entre 81%, 77% y 82,8% a las 8.00 a.m., 1.00 p.m. y 5.00 p.m., respectivamente, se observa que existe una alta significación entre la temperatura promedio y la humedad relativa dentro de las parcelas de SAF jebe cacao; finalmente, la luminosidad influye siendo menor dentro de la parcela, entre 184 a las 8.00 a.m. y 380 a

la 1.00 p.m., mientras que fuera de la parcela fue de 729 a las 8.00 a.m. y 4,128 lux a la 1.00 p.m., esta luminosidad demuestra que los SAF controlarían un poco la radiación de los rayos ultravioletas y los infrarrojos, hecho que, de alguna manera, influye en el cambio climático (Tabla 3 y 4).

Biomasa de un sistema agroforestal

En la Tabla 5 se muestran las diferencias de los resultados obtenidos entre los diferentes componentes evaluados: la biomasa de árboles vivos de jebe con mayor representatividad en todos los componentes evaluados es de 198,10 t.ha⁻¹, seguido de la biomasa del cacao con 61,39 t.ha⁻¹, la biomasa de hojarasca con 13,49 t.ha⁻¹ y la biomasa arbustiva con 8,45 t.ha⁻¹. La biomasa total en el SAF con jebe y cacao es 281,43 t.ha⁻¹ superior a los valores de aportes de biomasa

Tabla 3. Evaluación final de la temperatura y humedad relativa del sistema agroforestal dentro de la parcela del SAF

Evaluaciones	Registro Interior					
	Temperatura T°			Humedad Relativa HR %		
	8.00 a.m.	12.00 m.	5.00 p.m.	8.00 a.m.	12.00 m.	5.00 p.m.
Muestra 01	23,9 °C	27,3 °C	24,6 °C	81%	79%	71%
Muestra 02	23,4 °C	27,2 °C	24,8 °C	78%	79%	70%
Muestra 03	23,2 °C	27,7 °C	24,5 °C	80%	77%	74%
Muestra 04	22,9 °C	27,4 °C	24,5 °C	75%	73%	75%
Promedios	23,4 °C	27,4 °C	24,6 °C	79%	77%	72,5%

Tabla 4. Evaluación final de la temperatura y humedad relativa del sistema agroforestal fuera de la parcela del SAF

Evaluación	Registro Exterior					
	Temperatura T°			Humedad Relativa HR %		
	8.00 a.m.	12.00 m.	5.00 p.m.	8.00 a.m.	12.00 m.	5.00 p.m.
Muestra 01	23,2 °C	29,9 °C	25,9 °C	79%	69%	71%
Muestra 02	23,9 °C	30,4 °C	26,1 °C	79%	57%	72%
Muestra 03	24,1 °C	30,2 °C	26,2 °C	77%	54%	72%
Muestra 04	24,1 °C	30,0 °C	26,5 °C	73%	62%	73%
Promedios	23,8 °C	30,1 °C	26,20 °C	68%	61%	72%

encontrados en los ensayos de [Suárez \(2002\)](#) quien reporta valores entre 33 y 35,7 t ha⁻¹ en SAF de café con sombra diversificada y especies maderables, respectivamente, con árboles mayores a 10 m de altura en la región de Matagalpa, Nicaragua. [DZIB \(2003\)](#), en un estudio realizado en cafetales con *Eucalyptus deglupta* en Costa Rica, encontró valores de aporte de biomasa entre 17,9 y 27,9 t.ha⁻¹, de la misma forma. Asimismo, encontró para tres especies forestales en cafetales, aportes entre 28 y 77 t.ha⁻¹ que corresponden al eucalipto y laurel, respectivamente. Analizando los valores promedios de biomasa en cacao (61,39 t.ha⁻¹) estos son superiores, debido al número de plantas por hectárea en el estudio realizado en el fundo 'UNAS' el cual reportó un total de 3333 plantas.ha⁻¹ con un distanciamiento de 2 x 1,5 m; en comparación con los resultados obtenidos por [Salgado \(2010\)](#) quien separa el cacao a pleno sol del cacao con sombra que muestran valores entre 4,0 y 4,5 t ha⁻¹ en contraste con el pleno sol que reporta valores de 3,3 y 3,7 t ha⁻¹.

En el fundo 'UNAS' de la Facultad de Agronomía, el promedio de biomasa aérea para la especie guaba (*Inga edulis*) fue de 384,53 kg/árbol utilizando árboles entre 19 y 40 cm de DAP mayor a lo encontrado por [Salgado \(2010\)](#) que halló un promedio de 50,2 kg.árbol⁻¹ en árboles de 6 cm a 36 cm de DAP.

en la hojarasca fue de 1,98 t C.ha⁻¹. Para el cacao se determinó un contenido de 10,42 t C.ha⁻¹, en el componente arbóreo 35,17 t C.ha⁻¹, siendo superior a todos los demás componentes el contenido de carbono en el suelo con 158,24 t C.ha⁻¹, representados por el 0,19, 0,96, 5,05, 17,05 y 76,73%, respectivamente. El total de carbono almacenado en el SAF de jebe cacao es de 206,21 t C.ha⁻¹.

El carbono total almacenado en los diferentes componentes del SAF de café en estudio, es similar a los resultados de [Suárez \(2002\)](#) quien determinó 198,5 t C.ha⁻¹ en un SAF de café asociado con poró, de libre crecimiento, donde las raíces de los árboles y de las plantas de café contribuyen con el 2,2% al carbono total. Este sistema jebe cacao representa el SAF con mayor potencial de almacenamiento hasta ahora reportado. Mientras que [Ávila et al. \(2000\)](#) determinaron un rango de almacenamiento de 195 a 120 t C.ha⁻¹ en cuatro SAF de café, tres asociados con *Eucalyptus deglupta* de 4, 6 y 8 años de edad y café más poró (*Erythrina poeppigiana*), en el valle central de Costa Rica.

El alto contenido de carbono en el suelo puede estar influenciado por un acumulado en el cambio de uso del suelo de bosque a plantaciones de cacao. Los suelos de los bosques son grandes sumideros de carbono; [Robert \(2002\)](#) entrega cifras de 123 t C.ha⁻¹

Tabla 5. Biomasa total de los componentes en un sistema agroforestal jebe cacao

BIOMASA	Componentes del SAF con jebe				Total
	Arbustivo	Hojarasca	Cacao	Arbóreo Jebé	
Biomasa (t.ha ⁻¹)	8,45	13,49	61,39	198,10	281,43
Biomasa (%)	3,00	4,79	21,81	70,39	100

Carbono almacenado en el SAF con jebe cacao

Lo relativo a la biomasa aérea se muestra en la [Tabla 6](#), donde los arbustivos presentan un contenido de 0,405 t C.ha⁻¹; mientras que

¹, inferiores a los encontrados en el estudio (158,24 t C.ha⁻¹) almacenado en suelo de bosque tropical. El contenido de carbono también va a estar influenciado por la densidad de plantas de cacao (1,111 plantas/

ha), la textura de suelo: franco arenoso, granular, profundos (mayores de 50 cm) y manejo adecuado de la plantación: podas, prácticas de conservación de suelo que permite mayor acumulación de carbono en los perfiles del suelo. La edad de las especies repercute en un mayor desarrollo de las raíces y mejora la estructuración del suelo, como también el aporte de biomasa aérea al suelo, tipo de vegetación existente. Los bosques y los pastizales son grandes potenciales en el almacenamiento de C en el suelo. [Ávila \(2000\)](#) reporta carbono almacenado (0-25 cm) en pasto brachiaria a pleno sol por la cantidad de 66 ton/ha de C pasto a pleno sol, 84 t ha⁻¹ de carbono y brachiaria-eucalipto (3 años), 87 t.ha⁻¹ de carbono; asimismo, indica que estudios realizados sobre la cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agrosistema cacao, encontró valores similares a los nuestros donde reporta cantidades de carbono orgánico en el suelo que oscilan de 97,18 a 167,60 t C.ha⁻¹ en diferentes niveles altitudinales y se observa el incremento de almacenamiento de carbono en el suelo conforme aumenta la altitud.

[Viena \(2010\)](#) menciona que el almacenamiento de carbono es mayor en la biomasa arbórea de los árboles vivos en

todos los sistemas evaluados; asimismo, los diferentes sistemas de usos de tierra presentan biomasa heterogénea en función a las especies y al tipo de los suelos; siendo este último influyente de la predominancia y desarrollo de las especies vegetales ([Tabla 6](#)).

Indicadores de rentabilidad del sistema agroforestal jebe con cacao

La [Tabla 7](#) muestra los indicadores de rentabilidad de los SAF de jebe de más de 60 años con cacao mayor de 8 años, donde el costo de oportunidad utilizado para los cálculos es de 14% por año. [Santana \(2005\)](#) determinó el Valor Actual Neto (VAN) para los sistemas agroforestales con cacao de 6 a 8 años, alcanza un valor inferior al sistema del jebe de más de 60 años, en el cual el VAN para el jebe es de 1480,5, mientras que para el cacao es de 1360,6, asimismo el TIR para el jebe es de 22,80 y para el cacao fue de 20,60, con una relación B/C de 1,39 para el jebe y 1,24 para el cacao de 6 a 8 años ([Tabla 7](#)).

A la vez este indicador de rentabilidad (TIR) nos muestra que los dos sistemas son viables, por cuanto en dichos casos la TIR es mayor que el costo de oportunidad que se

Tabla 6. Carbono total de los componentes en un sistema agroforestal

	Componentes					Total
	Arbustivo	Hojarasca	Cacao	Arbóreo	Suelo	
Carbono (t.ha ⁻¹)	0,405	1,98	10,42	35,17	158,24	206,21
Carbono (%)	0,19	0,96	5,05	17,05	76,73	100

Tabla 7. Indicadores de rentabilidad económica

Indicadores económicos	SAF mayor 60 años para jebe	SAF- entre 8 y 16 años para cacao
VAN	1480,5	1360,6
TIR	22,80%	20,60%
B/C	1,39	1,24

VAN: Valor actual neto, TIR: Tasa interna de retorno, RB/C: Relación beneficio costo

utilizó (14%). La rentabilidad calculada fue la relación beneficio costo (RB/C) para el sistema entre 8 y 16 años de cacao, que fue de 1,24 menor que la obtenida por los sistemas mayor de 60 años para cacao que fueron de 1,39; sin embargo, también en los dos casos, es viable el proyecto por ser mayor que 1, lo que quiere decir que el ingreso es mayor al costo de inversión. La relación beneficio costo de 1,39, y 1,24, que corresponde a los sistemas entre 8 y 16 años y mayor a 60 años, se puede interpretar que por cada sol que se invierte se obtiene una ganancia de S/ 0,39 y 0,24, respectivamente. Según el análisis de la rentabilidad económica del presente trabajo, estos resultaron semejantes a los encontrados por Bringas (2010) en su análisis de costos para sistemas agroforestales con cacao + laurel de 9, 10 y 11 años, con un costo de oportunidad de 14%. Encontrando un VAN de S/ 1077,69, TIR de 17,81% y la RB/C fue de 1,16 asumiendo que dicho sistema es rentable, pero dichos indicadores resultan ser menores a los obtenidos en el presente trabajo; en otro trabajo de investigación similar, Viena (2010) halló VAN de 1780,38 superior a los encontrados por Bringas (2010) y a los obtenidos en el presente trabajo. Lo cual indica que la rentabilidad de los sistemas evaluados está ligada al tipo de asociación que realiza con el componente forestal, la cual brinda beneficios para el sistema como acumulación de materia orgánica, y ello hace que la humedad y las propiedades del suelo mejoren y sean adecuadas para los cultivos; además de ello, brindan servicios ambientales, protección, mayor producción y generan beneficios económicos a mediano y largo plazo, por lo que es necesario enriquecer las parcelas con árboles maderables valiosos, para aumentar la captura de carbono, almacenarlo en el suelo y generar ingresos complementarios por la venta de este servicio ambiental a la sociedad (López *et al.*, 2002).

4. Conclusiones

La mayor captura de carbono total almacenado se da en el ecosistema terrestre (suelo) y la menor captura es en el componente arbusto. La edad del cultivo de jebe es un factor que influye en el secuestro y almacenamiento de carbono, siendo necesario determinar la curva de mayor almacenamiento de dióxido de carbono. Las plantaciones de caucho o jebe en SAF con cacao, brindan servicios ambientales como control de la temperatura, humedad relativa, luminosidad y horas de sol, microclimas favorables, control de malezas y secuestro, captura y almacenamiento del dióxido de carbono en el suelo. Con los SAF de jebe con cacao es posible disminuir la generación de gases de efecto invernadero por la captura y almacenamiento del carbono por parte del sistema agroforestal y, al mismo tiempo, por los servicios ambientales que ofrece como la obtención de compost y humus que se recicla en el cacaotal y jebal y el control de los factores ambientales dentro de la parcela.

5. Literatura citada

- Arévalo, L.; Alegre, J.; Palma, C. 2002. Determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra. World Agroforestry Centre y Codesu, Lima, Perú. 124 p.
- Ávila, G.; Jiménez, F. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Catie, Turrialba. 7 p. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/LEAD/X6349s/X6349s00.pdf>.
- Barbarán, G. 1998. Determinación de biomasa y carbón en los principales usos de la tierra en la zona de Campo Verde. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa. Perú. 54 p.

- Bringas, P. 2010. Estimación del carbono almacenado en un sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) comparado con un bosque secundario de tres edades. Tesis de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.
- Hernández, L. 2001. Densidad de biomasa aérea en bloques extensos del neo trópico húmedo. México. 28 p.
- López, A.; Schlonvoigt, A.; Ibrahim, M.; Kleinn C.; Kanninen, M. 2002. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. Revista Agroforestería en las Américas. San José, Costa Rica. 85 p.
- Márquez, T. 2005. Cálculo de biomasa y captura de carbono en cuatro sistemas agroforestales diferentes de café con sombra en la estación experimental del Instituto de Cultivo Tropicales. Lima, Perú. 60 p.
- Martínez, O. 1993. Evaluación de 34 variedades de maní mediante técnicas multivariadas. Curso intensivo sobre recursos fitogenéticos. CIAT, Cali, Colombia. 60 p.
- Ordoñez, A. 1999. Captura de carbono en un bosque templado. El caso de San Juan Nuevo Michigan. Instituto Nacional de Ecología Semarnap, México D.F. 72 p.
- PNUD. 1997. Protocolo de Kyoto para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, 2-4 p.
- Ríos, A.J. 2007. Armazenamento de carbono e valoraçao econômica em sistemas de uso da terra comparados com o cultivo da coca (*Erythroxylon coca* Lam) no distrito de José Crespo y Castillo, Perú. Belem (PA), Brasil. 125 p.
- Robert, M. 2002. Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la tierra. FAO. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP /005/Y2779S/y2779s00.htm#Contents; dctos>.
- Salgado, J. 2010. Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Catie, Turrialba, CR. 110 p.
- Suárez, D. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café de la Comarca Yassica Sur, Matagalpa Nicaragua. Tesis Mag Sc. Catie, Turrialba, Costa Rica. 117 p.
- Viena, V. 2010. Estimación y valoración de las reservas de carbono del cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres sistemas de uso de la tierra. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María. Perú. 56 p.
- Zavala, J. 2015. Influencia de la edad del cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo sistemas agroforestales en la captura y almacenamiento del carbono en Tingo María, Tesis de Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. UNFV, Lima. Perú. 123 p.