



Influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono

Influence of three agroforestry systems of cocoa cultivation on carbon capture and storage

 Wilfredo Zavala¹; Erica Merino¹; Pedro Peláez^{2,*}
¹ Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Agronomía. Av. Universitaria km 1,21, Leoncio Prado, Tingo María, Huánuco, Perú.

² Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Av. Universitaria km 1,21, Leoncio Prado, Tingo María, Huánuco, Perú.

Received May 24, 2018. Accepted September 25, 2018.

Resumen

Con el fin de desarrollar actividades productivas económicas y ambientalmente sostenibles, se evaluó el efecto de tres sistemas agroforestales (SAF) del cultivo de cacao. Las variables respuestas fueron la captura y almacenamiento de carbono, en la biomasa arbustiva, arbórea, y suelo. Los SAF de cacao fueron de diferentes unidades fisiográficas con edades, menores de 8 años, entre 8 a 16 años y mayores de 16 años. Se utilizó el diseño estadístico completamente al azar, el método alométrico; la estimación del carbono orgánico se determinó por el método de Walkley y Black. El mayor almacenamiento de carbono total lo alcanzó el SAF mayor de 16 años con 344,24 t C/ha, el SAF entre 8 y 16 años con 178,61 t C/ha, y el SAF menor de 8 años con 154,91 t C/ha. se encontró mayor carbono orgánico en el suelo en el SAF con cacao menor de 8 años, con 66,16 t C/ha entre la capa del suelo de 0 a 10 cm. El análisis económico VAN, TIR y RB/C indicó que el mejor resultado lo tuvo el SAF menor de 8 años con S/.2627,66; 23,85%; y 1,40 respectivamente. El SAF mayor de 16 años, obtuvo el S/.1331,38, 21,64%, 1,21%, brindando mayor cantidad de servicios ambientales.

Palabras clave: Dióxido de carbono; diversidad biológica; sistemas agroforestales; fijación de carbono.

Abstract

In order to develop economically and environmentally sustainable productive activities, the effect of three agroforestry systems (SAF) of the cocoa crop was evaluated. The variable responses were the capture and storage of carbon, in the shrub, tree and soil biomass. The SAF of cocoa were from different physiographic units with ages, under 8 years, between 8 to 16 years and over 16 years. The statistical design was used completely at random, the allometric method; the organic carbon estimate was determined by the Walkley and Black method. The highest total carbon storage was reached by the SAF over 16 years with 344.24 t C / ha, the SAF between 8 and 16 years with 178.61 t C / ha, and the SAF under 8 years with 154.91 t C / ha. higher organic carbon was found in the soil in the SAF with cacao less than 8 years old, with 66.16 t C / ha between the soil layer of 0 to 10 cm. The economic analysis VAN, TIR and RB / C indicated that the best result was the SAF under 8 years with S / . 2627.66; 23.85%; and 1.40 respectively. The SAF over 16 years, obtained the S / . 1331.38, 21.64%, 1.21%, providing more environmental services.

Keywords: Carbon dioxide; biological diversity; agroforestry system; fixed carbon; stored carbon.

1. Introducción

Los países desarrollados deben de cumplir metas de reducción de emisiones de CO₂, una forma de reducir las emisiones es, secuestrándolo, capturándolo y manteniéndolo el mayor tiempo posible en la biomasa vegetal, principalmente en el suelo y ello se logra a través de la fotosíntesis, la descomposición y mineralización de la materia

orgánica. Por ello se propone la introducción de árboles de sombra para reducir las emisiones de C y por ende mejorar el rendimiento económico general de un Sistema agroforestal (SAF) a largo plazo, proporcionando ingresos alternativos (Rahman *et al.*, 2016). Los SAF, definidos como la presencia de árboles en los límites externos e internos, sobre tierras de

* Corresponding author
E-mail: pedro.pelaez@unas.edu.pe (P. Peláez).

cultivo, o en cualquier otro disponible nicho de tierra, pueden proporcionar beneficios tanto a la mitigación del cambio climático como los alimentos. Existen varios tipos de SAF con diferentes tasas de secuestro de carbono (C) sobre el suelo y el suelo. (Feliciano et al., 2018). Por otro lado, los beneficios asociados con la agroforestería, que incluyen el amortiguamiento del clima en el corto plazo la emisión de CO₂ puede reducirse de manera más efectiva al aumentar el área forestal (Waheed et al., 2018). A esto se suma la importancia de incrementar y mantener los SAF tradicionales (mayor diversidad de árboles frutales y forestales) que ayudan a mantener la biodiversidad en paisajes donde el hábitat forestal está disminuyendo debido a las actividades humanas, conservando especies en peligro de extinción (Abada et al., 2016). Asimismo, la cantidad de carbono almacenado por un SAF depende de la abundancia de árboles asociados, su estructura y su área basal (Nadège et al., 2018).

En cuanto a los árboles de cacao (*Theobroma cacao*) se cultivan para la producción de cacao en un área de más de 10 millones de hectáreas (ha) en regiones tropicales en todo el mundo (FAOSTAT, 2016). Produciendo cantidades significativas de hojarasca y por lo tanto, podrían contribuir sustancialmente a la formación de materia orgánica del suelo, independientemente de la presencia de árboles de sombra (Vaast y Somarriba, 2014).

Los beneficios que nos brindan los SAF son las apariciones de asociaciones microbianas en el suelo que están estrechamente vinculadas a las comunidades de plantas (Singh et al., 2014), y a la especiación vegetal que es uno de varios factores que controlan las comunidades microbianas del suelo (Cline y Zak, 2015). También existen combinaciones de los sistemas de manejo de agrosilvicultura y la selección de cultivos de cobertura pueden mejorar la salud del suelo y promover la sostenibilidad en los agroecosistemas tropicales (Buyer et al., 2017)

Las pérdidas de carbono causadas por la deforestación representan alrededor del 10% de las emisiones de carbono provenientes de la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento durante la última década (2000 y 2010) (Achard, et al., 2014).

De lo reportado se pudo establecer como objetivo de esta investigación el determinar la influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono.

2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación del campo experimental

La investigación se llevó a cabo en tres sistemas agroforestales (SAF), con diferentes unidades fisiográficas (Figura 1), el primero se instaló en el banco de germoplasma de cacao de la UNAS (SAF mayor de 16 años, 390970 m E, 8969865 m N, 745 m.s.n.m.), ubicado en una colina alta en Tingo María, distrito de Rupa Rupa; la segunda parcela, se instaló en una terraza baja en el caserío de Tulumayo, distrito de José Crespo y Castillo, pertenecientes a los terreno de la UNAS (SAF menor de 8 años, 385788 m E; 8990456 m N; 616 m.s.n.m.); considerado como el banco de germoplasma de cacao en Tulumayo, y por último el tercer sistema ubicado en el sector cacaotero de Trampolín, distrito de Daniel Alomías Robles (SAF entre 8 y 16 años, 395231 m E; 8982500 m N; 670 m.s.n.m.), ubicado en una colina alta.

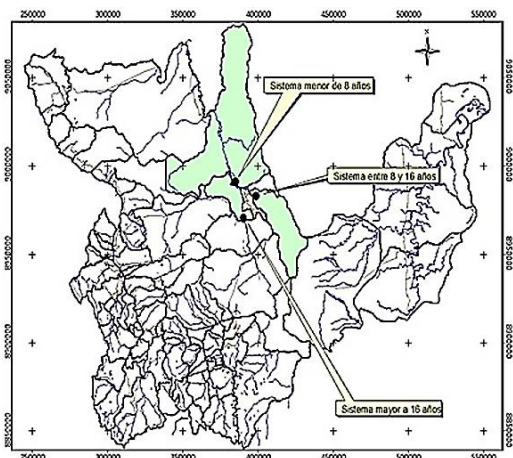


Figura 1. Ubicación geográfica de los sistemas agroforestales estudiados.

2.2. Materiales

Marco de madera de 1 m x 1 m y de 0,5 m x 0,5 m, bolsas de polietileno de diferentes capacidades y colores, bolsas de papel, palas, picota de geólogo, pico, cilindros para determinar densidad del suelo, martillo de madera y los equipos: GPS Garmin MAP 60 CSx, cámara fotográfica digital Sony W530, estufa y balanza analítica Citizen C T 3000 H, equipo de cómputo, equipo de absorción atómica marca Varian, espectral, espectrofotómetro UV-V Thermo Scientific, Genesys 6.

2.3. Metodología

La investigación fue de tipo alométrico, se realizó la descripción de las características más significativas del entorno ambiental en diferentes unidades fisiográficas manejadas bajo el sistema agroforestal con cacao,

se logró una descripción del entorno físico, biótico y social, evaluadas en el mismo campo, siguiendo los procedimientos para determinar la captura y almacenamiento del carbono en los SAFs con cacao de diferentes edades, utilizando la estadística descriptiva (Alegre et al., 2002). El procedimiento comprendió la fase preliminar, fase de campo, fase de laboratorio y fase de gabinete.

Selección y delimitación del área. Se ubicó el cultivo de cacao bajo un sistema agroforestal para la determinación de almacenamiento de carbono; con edades menores de 8, entre 8 a 16 y mayores de 16 años. Para cada edad las parcelas fueron de una hectárea, luego se procedió a delimitarlas formando ocho transectos (A, B, C, D, E, F, G y H), con dimensiones de 4m x 25m por cada transecto. También se realizaron evaluaciones de biomasa aérea, herbácea y muestreo de suelos (Arévalo et al., 2003).

Evaluación de la biomasa vegetal por el método alométrico. La metodología que se empleó para la evaluación de biomasa vegetal fue la recomendada por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (Arévalo et al., 2003).

Biomasa arbórea viva. Para evaluar la biomasa arbórea viva de árboles con diámetros mayores de 2,5 cm, se trazaron parcelas de 4m x 25m, se realizó el inventario de todos los árboles con diámetros de 2,5 cm hasta 30 cm, midiendo el diámetro a la altura del pecho (DAP) en el caso de árboles forestales se midió el diámetro basal, para el caso del cacao (*Theobroma cacao* L), se tomó a 30 cm desde la base del suelo (Alegre et al., 2002), para el componente forestal se evaluó el DAP a 1,30 m del suelo. Donde se encontraron árboles que superaron los 30 cm de DAP.

Biomasa arbustiva (BAb) y herbácea (Hbh). Compuesta por la biomasa sobre el suelo (epigea) de arbustos menores de 2,5 cm de diámetro, gramíneas y otras malezas. La recolección de muestras de material arbustivo y herbáceo se efectuó por muestreo directo con dos cuadrantes de 1m x 1m distribuidos al azar dentro de los transectos de 4 m x 25 m. Se cortó toda la vegetación al nivel del suelo, se pesó el total de la muestra y se sustrajo una submuestra en bolsas de papel periódico y se colocó en una estufa entre 75 °C y 100 °C durante 24 horas hasta que se obtuvo peso seco constante (Alegre et al., 2002).

Biomasa de la hojarasca. Se cuantificó la capa de mantillo u hojarasca y otros materiales muertos (ramillas, ramas, rastrojos),

utilizando 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, registrando el peso fresco total 0,25 m². Se sacó una sub muestra y se registró su peso, se secó a temperatura constante de 75 °C, por 24 horas, hasta obtener peso seco constante. Medición del carbono del sistema agroforestal de cacao

Cálculos de la biomasa vegetal. Las ecuaciones empleadas para la determinación del carbono aéreo y suelo fueron las establecidas por Arévalo et al. (2003):

$$BA = 0,1184 * DAP^{2,53}$$

$$Biomasa \text{ árbol} = 0,22582367*(D)^{2,4049471}$$

Biomasa arbórea viva (t.ha⁻¹). Se sumaron los árboles medidos y registrados en cada parcela y se les multiplicó por un factor de conversión: BAVT (t/ha) = BTAV*0,1

Cálculo de la biomasa arbustiva y herbácea: BAb-hb (t/ha) = ((PSM/PFM)*PFT)*0,01

Para la cantidad de C almacenado el peso seco de la biomasa se llevó a t/ha y se multiplicó por el factor 0,45, proporción de C (IPCC, 2004; Martel et al., 2012).

Biomasa de la hojarasca (t/ha):

$$Bh (t/ha) = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,04$$

Cálculo de la Biomasa Vegetal Total (t/ha):

$$BVT (t/ha) = BAVT + BAb - hb + Bh$$

Cálculo del C en la biomasa vegetal total. Se multiplicó la biomasa vegetal total por el factor 0,45 (45% de la materia seca es C). La biomasa vegetal total seca de cada árbol fue determinada sumando la biomasa seca de cada uno de sus componentes (Alegre et al., 2002): CBV (t/ha) = BVTx0,45

Densidad aparente y peso del suelo

Para C total del suelo, se realizó una mini calicata en cada uno de los transectos y cuadrantes delimitados para el muestreo de la biomasa herbácea y arbustiva (0,5 m x 0,5 m x 0,5 m), se tomaron muestras de suelo en forma estratificada (0–10, 10–20 y 20–30 cm de profundidad); en cada estrato se colocaron cilindros Uhland de volumen conocido y se llevó a la estufa a 105 °C por 24 h para estimar la densidad aparente del suelo (Agostini et al., 2014). Se obtuvieron muestras de 500 g de suelo en promedio para determinación de materia orgánica y cálculo del C (Walkley y Black, 1934).

Cálculo del peso del suelo (t/ha)

Para determinar el peso del suelo, se evaluó la densidad aparente del suelo por cada uno de los horizontes evaluados. El peso fue multiplicado por el porcentaje de carbono, dando como resultado el carbono orgánico en t/ha (Eyherabide et al., 2014).

Tabla 1

Biomasa vegetal del estrato superior en los sistemas agroforestales con cacao menores de 8 años, entre 8 y 16 años y mayores de 16 años (media \pm error estándar)

Edad del SAF	Cacao (t/ha)	Otras especies* (t/ha)	Biomasa aérea total (t/ha)
Mayor a 16 años	205,42 \pm 37,74 a	403,86 \pm 91,23 a	609,28 \pm 69,76 a
Entre 8 y 16 años	70,36 \pm 4,34 b	154,67 \pm 29,97 b	225,02 \pm 28,82 b
Menor de 8 años	81,12 \pm 9,26 b	101,91 \pm 10,94 b	170,29 \pm 13,46 b
%CV	53,67	71,67	37,39
P-Valor	0,0005	0,033	<0,0001

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según la prueba de Fisher. (*incluye árboles, arbustos y hierbas.)

Peso suelo (t/ha) = 100 m x 100 m x densidad aparente x profundidad del suelo

Densidad aparente del suelo (g/cc):
DA (g/cc) = PSN/VCH

Peso del suelo por estrato de muestreo:
PVs (t/ha) = DA \cdot Ps \cdot 10000

Cálculo del carbono total (biomasa vegetal más suelo)

Carbono en la biomasa vegetal total (t/ha) = CBV (t/ha.) = BVT x 0,45

Carbono en el suelo (t/ha): CS (t/ha.) = (PVs x %C)/100

Carbono total del SUT (t/ha.): CT (t/ha.) = CBV + CS

Análisis estadístico

Para evaluar los resultados experimentales se empleó el diseño completamente al azar (DCA) donde los sistemas agroforestales con cacao constituyeron los tratamientos; después de determinar si existió significación estadística se aplicó la prueba de medias de Fisher ($p \leq 5\%$) (Arévalo et al., 2003).

Rentabilidad económica. Se utilizaron los indicadores propuestos (Santana, 2005):

Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = -I + \sum_{j=0}^n \frac{(R_j - C_j)}{(1+i)^j}$$

Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$VAN = \sum_{j=0}^n \frac{(R_j - C_j)}{(1+r)^j} - I$$

Beneficio - costo (B/C)

$$R(B/C) = \frac{VPR_j - VPC_j}{VPI_j} > 1$$

3. Resultados y discusión

La biomasa aérea retenida en el estrato superior de los SAF mostró un incremento conforme aumentó su edad, aportaron mayor biomasa al igual que las plantas de cacao. Las biomásas aéreas totales de los sistemas tuvieron valores de 609,28, 225,02 y 170,29 t ha⁻¹ de C en los sistemas mayor a 16 años, entre 8 y 16 años y menores de 8 años respectivamente (Tabla 1);

debido a que las especies forestales al desarrollarse con el tiempo, son más vigorosas y por lo tanto producen mayor acumulación de biomasa. Es necesario considerar que las tasas de almacenamiento de carbono dependen de la edad y densidad de plantas, fertilidad, tipo de suelo y características del sitio (factores climáticos) y el manejo silvicultural al que se vea sometido el SAF (Vega et al., 2014).

Los sistemas mayores de 16 años presentaron más biomasa que los otros sistemas, reafirmando que los sistemas con mayor crecimiento e incremento de la biomasa presentan valores más altos de acumulación de carbono. Estadísticamente se determinó que existieron diferencias estadísticas entre los sistemas ($p \leq 0,01$), debido a que el sistema mayor a 16 años es de mayor edad, por lo tanto, los componentes arbóreos son más vigorosos y contenían mayor biomasa. Los SAF de 8 a 16 años y menores de 8 años, estadísticamente fueron iguales, no existió evidencias para aceptar diferencias estadísticas en cuanto a las reservas de carbono tanto en árboles de cacao como en árboles de otras especies (Abou Rajab et al., 2016). Biomasa aérea de los sistemas agroforestales con cacao de tres edades de producción

La biomasa del estrato inferior de los SAF fue influenciada por el cacao, especies forestales y estratos inferiores existentes, los mismos que generan hojas y ramas o mulch, que se descomponen generando altos valores de biomasa para el componente de hojarascas, para el componente herbáceo fue menor ya que el crecimiento de éste está directamente relacionada con el ingreso de la radiación solar que determina la capacidad fotosintética, y si es mínimo entonces es menor la formación de la biomasa herbácea (Córdoba y Hernández, 2009).

La biomasa total vegetal retenida por SAF mayores de 16 años, entre 8 a 16 años y menores de 8 años, son obtenidos de la suma de la biomasa arbórea viva de las plantas de cacao y otras especies (estrato superior), biomasa arbustiva herbácea y hojarascas (estrato inferior) (Tabla 2). La biomasa vegetal total fue 197,22, 258,29,

633,69 t/ha, para los SAF menores de 8 años, entre 8 y 16 y mayores de 16 años, respectivamente, donde la mayor biomasa vegetal total lo proporcionó el SAF de cacao mayor a 16 años. No se encontraron diferencias estadísticas entre los SAF menores de 8 años y entre 8 y 16 años, a pesar de tener medias superiores (Brown et al., 1993).

En los tres SAF, la cantidad de biomasa total es superior para el sistema mayor a 16 años de producción a comparación de los otros sistemas de menor edad.

En la [Tabla 3](#) se muestra el carbono total almacenado en la biomasa vegetal, asimismo el carbono almacenado en los componentes superior (arbóreo) e inferior (arbustiva, herbácea y hojarasca) de los SAF de diferentes edades. El carbono total aéreo almacenado (p -valor $< 0,0001$) donde existió evidencia para aceptar diferencias entre los SAF evaluados, siendo el SAF mayor de 16 años con el mayor almacenamiento de carbono (285,16 t ha⁻¹ de C) que los otros.

Los SAF entre 8-16 años y los menores de 8 años, tienen reservas de C estadísticamente similares. Los factores que están influyendo en la cantidad de carbono de la parte aérea son: la edad, tipo de especies, densidad, mezcla de especies ya sea a nivel herbáceo, hojarasca, o arbóreo. Esto puede deberse también a la biodiversidad y biomasa aérea que determinan las características biofísicas como un soporte, particularmente la densidad del soporte, que puede influir en la edad del árbol, variación de tamaño, diversidad de especies y biomasa aérea (Ali y Mattsson, 2017). Jagoret et al. (2017) describe a los SAF tradicionales son en su mayoría árboles anuales y frutales, en este sistema, la producción de cacao es máxima. A diferencia de un SAF innovador basado en especies anuales donde el estado ambiental generalmente es negativo.

En los SAF tradicionales también se ha observado que la mayor fijación de C tiene una relación directa con las regiones,

debido a las condiciones climáticas (Jagoret et al., 2017), y el nivel del componente hojarasca el sistema entre 8 y 16 años presenta mayor carbono almacenado a diferencia de los otros sistemas, se debe a que estos sistemas no presentan especies herbáceas en grandes cantidades por la existencia de sombra y auto sombreado a pesar que la investigación se desarrolló cuando no se llevaba a cabo el control de malezas rutinario que se realiza, el cual ha permitido encontrar valores mayores a los reportados por (Bringas, 2010). Por otro lado, las coberturas en un sistema como un bosque secundario aumentan la cantidad de almacenamiento de C, así en las tres edades del cacao el C almacenado en el componente hojarasca es superior al componente herbáceo, al no existir desarrollo de malezas permite una mayor acumulación de hojarasca y mulch incrementándose conforme avanza la edad del sistema, ya que en estos sistemas existe un aporte constante y de mayor cantidad de restos vegetales muertos, caídas de hojas en forma natural (Acosta et al., 2001). El almacenamiento de C se incrementa conforme el sistema avanza en edad, teniendo mayor almacenamiento de C en el sistema agroforestal mayor de 16 años (Bringas, 2010; Herrera, 2010) que evaluaron en SAF con cacao más árboles de laurel de 9, 10 y 11 años y en SAF con cacao con árboles de bolaina de 3, 4 y 5 años respectivamente, estableciendo un crecimiento ascendente en función al tiempo de desarrollo, crecimiento del cultivo y diferentes sistemas como en la investigación presente.

En la [Tabla 4](#) se observa la cantidad de C secuestrado y almacenado en el suelo por los SAF mayor de 16 años, entre 8 y 16 años y menor de 8 años, se estimó a partir de la materia orgánica del suelo y el % de C orgánico (Walkley y Black, 1934) que determina el carbono fácilmente oxidable y luego a partir de este se estima la materia orgánica considerando que la materia orgánica del suelo tiene 58% de C.

Tabla 2

Biomasa vegetal total en los sistemas agroforestales menores de 8 años, entre 8 y 16 años y mayores de 16 años (media \pm error estándar)

SAF Con cacao	Componentes del Sistema			
	Biomasa arbórea (t.ha ⁻¹)	Biomasa arbustiva herbácea (t.ha ⁻¹)	Biomasa de hojarasca (t.ha ⁻¹)	Biomasa vegetal total (t.ha ⁻¹)
Menor de 8 años	170,29	5,43	21,50	197,22 \pm 13,57 ^b
Entre 8 y 16 años	225,02	5,20	28,06	258,29 \pm 28,22 ^b
Mayor a 16 años	609,28	5,87	18,54	633,69 \pm 69,13 ^a
%CV				34,14
P-Valor				<0,0001

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según prueba de Duncan.

Tabla 3

Carbono de la biomasa vegetal en los sistemas agroforestales con cacao mayores de 16 años, entre 8 y 16 años y menores de 8 años

SAF	Estrato superior		Sub total CA (t/ha)	Estrato inferior		Total CBV (t/ha)
	CC (t/ha)	COE (t/ha)		CAH (t/ha)	CH (t/ha)	
Mayor a 16 años	92,44 a	181,74 a	274,18 a	2,64 a	8,34 b	285,16 a
Entre 8 y 16 años	31,66 b	69,60 b	101,26 b	2,34 a	12,63 a	116,23 b
Menor de 8 años	36,50 b	40,13 b	76,63 b	2,44 a	9,67 b	88,75 b
%CV	53,68	73,62	37,39	20,52	18,49	34,14
P-Valor	0,0005	0,0017	<0,0001	0,4953	0,0006	<0,0001

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según prueba de Fisher; C = Carbono; CC = Carbono en plantas de cacao; COE = carbono en otras especies forestales; CA = Carbono Aéreo; CAH = Carbono arbustivo y herbáceo; CH = Carbono de Hojarascas; CBV = Carbono en la Biomasa Vegetal.

La **Tabla 4** muestra la densidad aparente del suelo en tres profundidades, el porcentaje y la cantidad de C orgánico hasta 30 cm de profundidad del suelo y la cantidad total de carbono orgánico de los SAF evaluados en la investigación. Los resultados muestran que no existió diferencias estadísticas (p -valor = 0,4275) entre los tres sistemas en cuanto a la reserva total de carbono orgánico del suelo. Sin embargo, existieron diferencias numéricas con respecto al C total del suelo, siendo mayor para cacaotales menores de 8 años, y menores para cacaotales mayores de 16 años. Los SAF mayor de 16 años y entre 8 y 16 años se encuentran en terrenos residuales no inundables teniendo condiciones más estables con respecto a las inundaciones, mientras que el sistema menor de 8 años se encuentra en terrenos aluviales inundables, donde en épocas de crecientes del río Huallaga, están expuestos al lavado, lixiviado de sus principales horizontes o capas superficiales, provocando la acumulación de materia orgánica.

En la **Tabla 4** se puede observar que todos los sistemas presentan mayor cantidad de C en el estrato superficial de 10 cm frente a los estratos de 20 cm y 30 cm. La disminución de la materia orgánica es notoria en el horizonte B, lo que quiere decir que los procesos de descomposición por los microorganismos se dan primero en la parte superior del suelo y la cantidad de C orgánico disminuye a mayor profundidad manteniéndose también en SAF con cacao.

Timoteo *et al.* (2016) estimaron el carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante su primer año, obtuvieron valores de biomasa y necromasa aérea alrededor de 11 t C ha⁻¹ y en el suelo de 24 t C ha⁻¹. El C orgánico en el suelo representó casi el 60% del C total almacenado en estos sistemas agroforestales.

La **Tabla 5** muestra el C total almacenado en la biomasa vegetal total observándose diferencias estadísticas entre los sistemas ($p < 0,05$), resultando con mayor C el sistema mayor de 16 años (285,16 t C/ha.) seguido del resto de sistemas; mientras que con respecto al C orgánico del suelo no existe diferencias estadísticas entre ellos ($p > 0,05$), pero si diferencias numéricas siendo mayor el SAF menor de 8 años. A nivel de C del sistema de uso de la tierra (SUT) existe alta evidencia estadística para aceptar que los sistemas son distintos entre ellos, resultando el sistema mayor de 16 años con mayor C (344,24 t C/ha.) que los sistemas de menor edad (**Lapeyre *et al.*, 2004; Herrera, 2010; Bringas, 2010**). Al comparar el carbono almacenado en la biomasa vegetal en sistemas agroforestales con cacao, se encontraron datos inferiores en otro estudio realizado (**Bringas, 2010**). Reportaron 46,98, 62,59 y 79,98 t C/ha. en SAF de 9, 10 y 11 años respectivamente, sin embargo, coinciden en el incremento de C con la sucesión o incremento de las edades, lo mismo sucede con la investigación de (**Pocomucha *et al.*, 2016**).

Tabla 4

Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades de los sistemas agroforestales mayor de 16 años, entre 8 y 16 años y menor de 8 años (media \pm error estándar)

SAF	Profundidad (m)	Densidad aparente (t/m ³)	CO (%)	COS (t/ha)	Carbono total del suelo (t/ha)
Con cacao	0,1	0,97	2,75	27,74	
Mayor a 16 años	0,2	1,32	1,48	19,94	59,08 \pm 4,78 a
	0,3	1,41	0,87	12,41	
	0,1	0,80	3,38	27,11	
Entre 8 y 16 años	0,2	1,22	1,69	20,67	62,38 \pm 2,54 a
	0,3	1,39	1,05	14,59	
	0,1	0,94	3,01	28,36	
Menor de 8 años	0,2	1,35	1,72	23,29	66,16 \pm 3,64 a
	0,3	1,49	0,98	14,51	
	%CV				
P-Valor					0,4275

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según prueba de Fisher; CO: Carbono orgánico; COS: Carbono orgánico del suelo.

Tabla 5

Carbono total almacenado en los sistemas agroforestales con cacao, mayor de 16 años, ente 8 y 16 años y menor de 8 años (media \pm error estándar)

SAF Con cacao	Carbono en biomasa vegetal (t/ha)	Carbono del suelo (t/ha)	Carbono total en sistema (t/ha)
Mayor a 16 años	285,16 \pm 31,11 a	59,08 \pm 4,78 a	344,24 \pm 29,45 a
Entre 8 y 16 años	116,23 \pm 12,70 b	62,38 \pm 2,54 a	178,61 \pm 14,26 b
Menor de 8 años	88,75 \pm 6,11 b	66,16 \pm 3,64 a	154,91 \pm 8,09 b
%CV	34,14	17,03	24,36
P-Valor	<0,0001	0,4275	<0,0001

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según prueba de Fisher.

Por otro lado, [Herrera \(2010\)](#) evaluó dos sistemas agroforestales cacao + guabba y cacao + bolaina en las edades de 2, 3 y 4 años; ambos trabajos indican las diferencias existentes de C almacenado entre los tres rangos de edad del cultivo de cacao (*Theobroma Cacao* L.) bajo los dos sistemas agroforestales tanto a nivel aéreo y suelo. El C se almacena en la biomasa viviente (arriba y bajo del suelo), materia orgánica muerta (desechos y madera muerta) y en la materia orgánica del suelo ([IPCC, 2004](#)).

La distribución porcentual, que representa el contenido de carbono en los sistemas agroforestales con cacao mayor de 16 años, ente 8 y 16 años y menor de 8 años, también se observa que el mayor porcentaje se encuentran en el componente arbóreo en los tres sistemas, teniendo un 80% en el sistema mayor a 16 años, debido a las especies arbóreas existente, como el tornillo, el cedro y otras maderables, mientras que el sistema menor de 8 años logra un 48% de carbono arbóreo, resultando el menor porcentaje del estudio. Un estudio de cacao reporta ([Abdulai et al., 2017](#)) que hay que tener cuidado con la promoción y elección de árboles de sombra de cacao, especies como la leguminosa *A. ferruginea* constituyen un riesgo en el funcionamiento del cacao, bajo una sequía severa prolongada estos pueden tener efectos negativos, generando pérdidas económicas y muerte.

Tabla 6

Indicadores de rentabilidad económica

Indicadores Económicos	SAF		
	mayor 16 años	SAF- entre 8 y 16 años	SAF- menor de 8 años
VAN	1,331,38	1,273,90	2,627,66
TIR	21,64%	19,55%	23,85%
B/C	1,21	1,18	1,40

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

La rentabilidad económica ([Tabla 6](#)), muestra los indicadores de rentabilidad de los SAF de 6 a 8 años, mayores de 16 años y menores de 8 años. 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 mayores de 16 años y menores de 8 años, alcanzando un valor superior el sistema de cacao menor de 8 años con S/.2627, 66 frente a los sistemas agroforestales de 8 a 16 años, y mayores de 16 años, alcanzaron S/.1273, 90 y 1331,38 soles respectivamente, indicando viabilidad de los tres sistemas. La Tasa Interna de Retorno (TIR) calculado para el SAF entre 8 y 16 años fue de 19,55%, menor a la TIR del sistema de cacao menor de 8 años y mayor de 16 años que fueron de 23,85% y 21,64% respectivamente. A la vez este indicador de rentabilidad (TIR) nos muestra que los tres sistemas son viables, por cuanto en dichos casos la TIR es mayor que el costo de oportunidad que se utilizó (14%). La rentabilidad calculada fue la relación beneficio costo (R B/C), para el sistema entre 8 y 16 años fue de S/. 1,18 soles, menor que la obtenida por los sistemas menor de 8 años y mayor de 16 años que fueron de S/.1,40 y 1,21 respectivamente, sin embargo, también en los tres 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 S/. 1,21, 1,18 y 1,40 soles que corresponde a los sistemas mayores de 16 años, entre 8 y 16 años y menor de 8 años, se puede interpretar que por cada sol que se invierte se obtiene una ganancia de S/.0,21, 0,18 y 0,40 soles respectivamente. Según el análisis rentabilidad económica del presente trabajo 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 S/.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](#)) el VAN de S/. 17804,38 superior a los encontrados ([Bringas, 2010](#)) y a los obtenidos en el presente trabajo. La captura de carbono, a través de los SAF, permitirá generar beneficios a los productores de cacao, quienes además mejorarán

su economía al obtener un pago directo por el servicio ambiental (venta de carbono capturado), lo que posibilita obtener otros servicios y productos, tales como la madera y leña. Si el tamaño de un bosque aumenta, lo hará aumentar el volumen de secuestro de carbono, por lo tanto, se reducirá el costo del secuestro de carbono (Adetoye et al., 2018).

4. Conclusiones

El mayor almacenamiento de carbono total se obtuvo en el sistema agroforestal mayor de 16 años con 344,24 t C/ha, seguido por los sistemas entre 8 y 16 años y menor de 8 años con 178,61 y 154,91 t C/ha respectivamente. El mayor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea se obtuvo en el sistema agroforestal mayor de 16 años 285,16 t C/ha, seguido por el sistema agroforestal entre 8 y 16 años, con 116,23 t C/ha, y el menor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea lo presentó el sistema agroforestal menor de 8 años con 88,75 t C/ha. En cuanto al carbono en el suelo, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los sistemas evaluados, sin embargo, el sistema agroforestal con cacao menores de 8 años presentó la mayor reserva de carbono en el suelo con 66,16 t C/ha, seguido por el sistema agroforestal de 8 a 16 años con 62,38 t C/ha mientras que el sistema agroforestal mayor de 16 años presentó la menor reserva con 59,08 t C/ha. La mayor cantidad de carbono orgánico del suelo estuvo presente en la primera capa u horizonte del suelo entre 0 a 10 cm y fue mayor en el SAF de cacao menores de 8 años con 28,36 t C/ha, seguido del cacao mayor a 16 años con 27,74 t C/ha. y el de 8 a 16 años con 27,11 t C/ha. El valor económico según el VAN, TIR y RB/C fue mayor para el sistema agroforestal menor de 8 años con S/.2627,66; 23,85%; y 1,40 respectivamente, seguido por el sistema agroforestal mayor de 16 años con S/.1331,38; 21,64% y 1,21 respectivamente, y finalmente el sistema agroforestal entre 8 y 16 años con S/.1273,90; 19,55%, 1,18 respectivamente. Los conocimientos generados podrían ser aplicados a otros sistemas agroforestales, considerando cultivos como café, plátano, palma aceitera; con el fin de evaluar la captura y almacenamiento de carbono.

Referencias bibliográficas

Abada, Mbololo, M.M.; Zekeng, J.C.; Mala, W.A.; Fobane, J.L.; Djomo, C.C.; Ngavounsia, T.; Nyako, C.M.; Florent, E.; Tamenjong, Y.V. 2016. The role of cocoa

- agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central region of Cameroon. *Agroforestry systems* 90(4): 577-590.
- Abdulai, I.; Vaast, P.; Hoffmann, M.P.; Asare, R.; Jassogne, L.; Asten, P.V.; Graefe, S. 2018. Cocoa agroforestry is less resilient to suboptimal and extreme climate than cocoa in full sun: Reply to Norgrove. 2017. *Global Change Biology* 24(5): e733–e740.
- Abou, Rajab, Y.; Leuschner, C.; Barus, H.; Tjoa, A.; Hertel, D. 2016. Cacao Cultivation under Diverse Shade Tree Cover Allows High Carbon Storage and Sequestration without Yield Losses. *PLOS ONE* 11(2): e0149949.
- Achard, F.; Beuchle, R.; Mayaux, P.; Stibig, H.-J.; Bodart, C.; Brink, A.; Simonetti, D. 2014. Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology* 20(8): 2540–2554.
- Acosta, M.; Quednow, K.; Etchevers, J.; Monreal, C. 2001. Método Para la Medición del Carbono Almacenado en la Parte Aérea de Sistemas con Vegetación Natural e Inducida en Terrenos de Ladera en México. INFAF. Colegio de Postgraduados, México.
- Adetoye, A. M.; Okojie, L. O.; Akerele, D. 2018. Forest carbon sequestration supply function for African countries: An econometric modelling approach. *Forest Policy and Economics* 90: 59–66.
- Agostini, María, De, Los, Angeles; Monterubbianesi, María, Gloria; Studdert, Guillermo, Alberto; Maurette, Santiago. 2014. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Ciencia del suelo* 32(2): 171-176.
- Alegre, J.; Arévalo, L.; Ricse, R. 2002. Reservas de Carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía Peruana. ICRAF/INIA. Perú. Disponible en: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia2/vbconfe7.htm>
- Ali, A.; Mattsson, E. 2017. Disentangling the effects of species diversity, and intraspecific and interspecific tree size variation on aboveground biomass in dry zone homegarden agroforestry systems. *Science of The Total Environment* 598: 38-48.
- Arévalo, L.; Alegre, J.; Palm, C. 2003. Manual de determinación de las reservas de carbono en los diferentes sistemas de uso de tierras en Perú. ICRAF, CODESU, INIA, INRENA. Ediciones Gráfica Miguel Alvarez.
- 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 para optar el título de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional Agraria de la Selva Tingo Maria. Perú. 148 pp.
- Brown, S.; Hall, Ch.; Knabe, W.; Raich, J.; Trexler, M.; Woome, P. 1993. Tropical forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution* 70: 71-94.
- Buyer, J. S.; Baligar, V. C.; He, Z.; Arévalo-Gardini, E. 2017. Soil microbial communities under cacao agroforestry and cover crop systems in Peru. *Applied Soil Ecology* 120: 273-280.
- Cline, L.C.; Zak, D.R. 2015. Soil microbial communities are shaped by plant-driven changes in resource availability during secondary succession. *Ecology* 96(12): 3374–3385.
- Córdoba, S.; Hernández, L. 2009. Efecto de la sombra sobre el crecimiento herbáceo. México. 28 pp.
- Eyherabide, M.; Sainz, H.; Barbieri, P.; Echevarría, H. E. 2014. Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo* 32(1): 13-19.
- FAOSTAT, 2016. Database Collections. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://faostat.fao.org>
- Feliciano, D.; Ledo, A.; Hillier, J.; Nayak, D.R. 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world

- regions? Agriculture, Ecosystems & Environment 254: 117–129.
- Herrera, A. 2010. Estimación de la biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) clon CCN-51 de diferentes edades en la provincia de Leoncio Prado. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María. Perú. 95 pp.
- IPCC: Resumen Técnico. 2004. Climate change. Spatial report on emissions scenarios. intergovernmental panel on climate change (IPCC). Disponible en: <http://grida.no/climate/ipcc>
- Jagoret, P.; Michel, I.; Ngnoguè, T. H.; Lachenaud, P.; Snoeck, D.; Malézieux, E. 2017. Structural characteristics determine productivity in complex cocoa agroforestry systems. *Agronomy for Sustainable Development* 37: 60.
- Lapeyre, T.; Alegre, J.; Arévalo, L. 2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 3(1-2): 44.
- Martel, C.; Cairampoma, L. 2012. Cuantificación del carbono almacenado en formaciones vegetales amazónicas en "cicra", Madre de Dios (Perú). *Ecología Aplicada* 11(2): 59-65.
- Nadège, M.T.; Louis, Z.; Cédric, C.D.; Louis-Paul, K.B.; Funwi, F.P.; Ingrid, T.T.; Julliete Mancho, N. 2018. Carbon storage potential of cacao agroforestry systems of different age and management intensity. *Climate and Development*: 1–12.
- Pocomucha, V. S.; Alegre, J.; Abregú, L. 2016. Análisis socio económico y carbono Almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología Aplicada* 15(2): 107.
- Rahman, S. A.; Sunderland, T.; Kshatriya, M.; Roshetko, J. M.; Pagella, T.; Healey, J. R. 2016. Towards productive landscapes: Trade-offs in tree-cover and income across a matrix of smallholder agricultural land-use systems. *Land Use Policy* 58: 152–164.
- Santana, A. 2005. Elementos de Economía, Agro negocios y desenvolvimiento local. Serie Académica 01. GTZ, TUD, UFRA, Belém. Brasil. 63-67.
- Singh, K.; Trivedi, P.; Singh, G.; Singh, B.; Patra, D. D. 2014. Effect of Different Leaf Litters on Carbon, Nitrogen and Microbial Activities of Sodic Soils. *Land Degradation & Development* 27(4): 1215–1226.
- Timoteo, K.; Remuzgo, J.; Valdivia, L.; Sales-Dávila, F.; García-Soria, D.; Abanto, Rodriguez, C. 2016. Estimación del carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante el primer año de instalación en el departamento de Huánuco. *Folia Amazónica* 25(1): 45.
- Vaast, P.; Somarriba, E. 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agrofor. Syst.* 88: 947–956.
- Vega, G.; Ordoñez, C.M.; Suarez, J.C.; López, C.F. 2014. Almacenamiento de carbono en arreglos agroforestales asociados con café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 5(1): 213-221.
- 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 para optar el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María. Perú. 56 pp.
- Waheed, R.; Chang, D.; Sarwar, S.; Chen, W. 2018. Forest, agriculture, renewable energy, and CO2 emission. *Journal of Cleaner Production* 172: 4231–4238.
- Walkley, A.; Black, I. A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.