

Almacenamiento de Carbono en Sistemas agroforestales con café en Costa Rica

Oriana Ovalle Rivera

oriana.ovalle@gmail.com

7 de Diciembre de 2016



1 CONTENIDO

2	Lista de tablas	3
3	Lista de figuras	4
4	Resumen	5
5	Introducción	6
6	Área de estudio	7
7	Metodología	8
8	Resultados	11
9	Conclusiones	21
10	Recomendaciones	21
11	Bibliografía	22
12	Anexos	24

2 LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones alométricas para los sistemas agroforestales con café.....	9
Tabla 2. Arreglo agroforestal con café en cada región cafetera de Costa Rica según el censo cafetero Turrialba y Coto Brus 2003, Valle Central y Valle Central Occidental 2004, y Pérez Zeledón, Tarrazú y Zona Norte 2006 del INEC e ICAFE.....	10
Tabla 3. Arreglo agroforestal con café en cada región cafetera de Costa Rica según el diagnóstico de la caficultura: cosecha 2014-2015 del ICAFE.	11
Tabla 4. Densidades de sombra (#árboles / ha) en las innovaciones agroforestales con café.	11
Tabla 5. Carbono almacenado bajo el arreglo agroforestal del censo cafetero INEC e ICAFE.	12
Tabla 6. Carbono almacenado bajo el arreglo agroforestal del diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE.	13
Tabla 7. Almacenamiento de carbono (Mg C / ha) en cuatro innovaciones agroforestales con café para Costa Rica (carbono encima y bajo el suelo).	16

3 LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área y regiones cafeteras de Costa Rica.	7
Figura 2. Esquema de la metodología de almacenamiento de carbono	8
Figura 3. Almacenamiento de carbono (Mg C / ha) encima del suelo y en las raíces por sistema.	13
Figura 4. Almacenamiento de carbono para cuatro innovaciones agroforestales con café (carbono encima del suelo y raíces)	14
Figura 5. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Coto Brus y Los Santos.....	17
Figura 6. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Pérez Zeledón y Turrialba.	18
Figura 7. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Valle Central y Valle Occidental.	19
Figura 8. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Zona Norte.	20

4 RESUMEN

Costa Rica impulsa a sus sectores a ser carbono neutral en el 2021 y uno de sus principales es el caficultor. El café tiene un gran aporte en la economía, cultura y sociedad en Costa Rica, pues es el medio de vida de 47182 productores en todo el país (ICAFFE, 2015) además aporta un 5.2% del PIB agrícola. Los cafetales Costarricenses se encuentran con un 89% de sombra, siendo importante los arreglos agroforestales y la estimación del almacenamiento de carbono como un primer paso para el sector en lograr el objetivo de carbono neutral. En este trabajo se calculó el almacenamiento de carbono en las regiones caficultoras del país bajo dos arreglos agroforestales obtenidos del censo cafetero 2002-2006 y el diagnóstico de la caficultura: cosecha 2015-2016. Además se estimó y comparó con cuatro innovaciones agroforestales propuestas por CATIE bajo el marco de la iniciativa NAMA Café.

Para estimar el carbono almacenado en el sistema se tuvo en cuenta la planta de café, así como también del árbol de sombra, la poda y la hojarasca además del carbono bajo el suelo en raíces y del suelo. Los resultados muestran que el mayor porcentaje de almacenamiento del sistema lo aporta el suelo. Le sigue el árbol de sombra y la planta de café. El sistema de café almacena entre un 16.19 a 43.70 Mg C / ha (sin Carbono en el suelo) y el valor cambia dependiendo del arreglo con árboles de servicio, maderables, frutales o musáceas. La tasa de fijación también depende del tipo de árbol y se encuentra entre un 0.67 a 3.3 Mg C / ha.

La innovación agroforestal denominada agroforestal comercial es uno de los mayores almacenadores de carbono que va entre un 22.18 a 28.47 Mg C / ha sin tener en cuenta el carbono en el suelo. Le sigue la opción con árboles maderables en este caso Laurel entre un 21.91 a 28.65 Mg C / ha. La densidad y tipo de árbol es decisivo para la estimación del carbono almacenado así como el porcentaje de sombra que afectará directamente el rendimiento del cultivo.

Palabras claves: *Sistema agroforestal, café, Almacenamiento de Carbono, Costa Rica.*

5 INTRODUCCIÓN

La caficultura costarricense es una actividad de tradición e identidad en el país, además de que involucra miles de productores y un gran aporte en la economía del sector agrícola. Dentro del marco de país meta para ser carbono neutral en el 2021, Costa Rica ha implementado medidas de mitigación al cambio climático como son los NAMAs. La iniciativa NAMA Café busca reducir los daños al medio ambiente causados en la producción de café incentivando la adopción de nuevas tecnologías y mejores prácticas de producción, ya que el café reporta el 25% de las emisiones provenientes del sector agrícola del país. Por lo cual uno de los pasos es cuantificar el almacenamiento de carbono en los sistemas con café que se encuentran principalmente bajo sombra y una pequeña parte a pleno sol. Es así que los sistemas agroforestales juegan un papel importante en el sistema y en la estimación del almacenamiento de carbono en cada uno de las siete regiones cafeteras del país.

Para la estimación del almacenamiento de carbono por parte del sistema se tuvo en cuenta varios compartimientos: planta de café, árbol de sombra, hojarasca, poda y suelo. Sin embargo en Costa Rica, hasta el momento la única fuente de remoción aceptada es la parte aérea del árbol de sombra para obtener carbono neutral.

Este trabajo quiso adicionalmente obtener el potencial de todo el sistema y por lo tanto se incluyó otros compartimientos así como estimar el almacenamiento de carbono en cuatro diferentes innovaciones agroforestales, permitiendo tener una base y cálculos a partir de densidades y diferentes tipos de árbol de servicio, maderable, frutal y musáceas.

El trabajo también tiene como fin contribuir a posteriores análisis como huella de carbono y servir de base para determinar estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático como parte importante de los objetivos del NAMA Café y como parte de gestión del conocimiento y apoyo a estas iniciativas por parte de CIAT-CCFAS.

6 ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en siete regiones cafeteras según el informe sobre la actividad cafetera de Costa Rica (ICAFE, 2015): Coto Brus, Los Santos, Pérez Zeledón, Turrialba, Valle Central, Valle Occidental y Zona Norte (figura 1).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) que realizó durante el año 2014, reportó 84133.1 ha en 26527 fincas cafeteras en todo el territorio costarricense de los cuales Los Santos y el Valle Occidental son las dos regiones con más área de café y más número de fincas como se muestra en la figura 1.

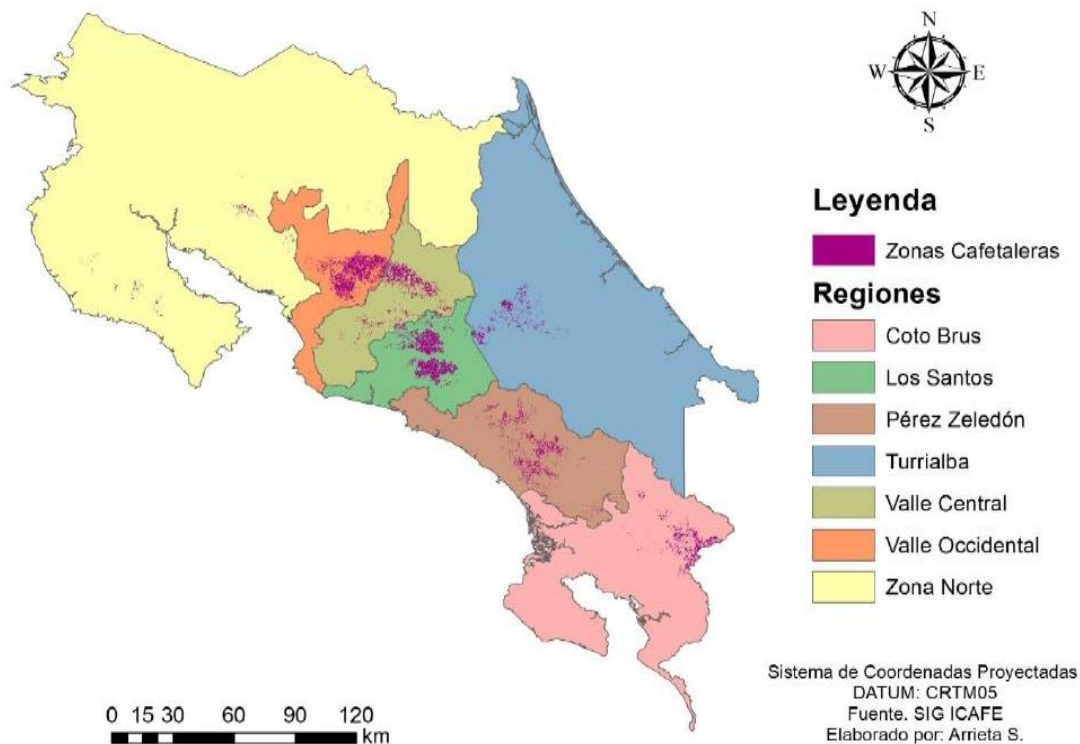


Figura 1. Área y regiones cafeteras de Costa Rica.

Para el estudio se tomó de manera general tres tipos de sistemas de café: pleno sol, monocultivo de sombra y policultivo comercial (Moguel and Toledo, 1999)

7 METODOLOGÍA

Para calcular el almacenamiento de Carbono en los sistemas con café se establecieron tres principales pasos: **revisión de literatura**, **determinar** y **calcular** la biomasa encima y bajo el suelo para finalmente obtener **carbono total** del sistema (figura 2).

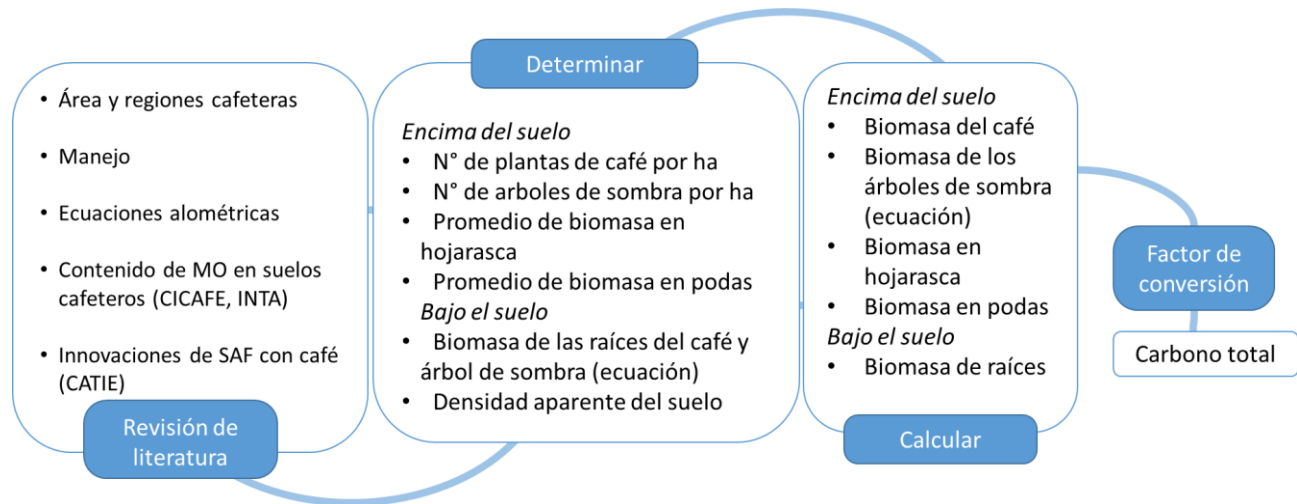


Figura 2. Esquema de la metodología de almacenamiento de carbono

Se hizo una revisión de los estudios hechos con carbono y café en Latinoamérica y algunos del mundo para obtener un inventario con datos levantados de diferentes investigaciones en Costa Rica.

La revisión se enfatizó principalmente en área total por región cafetera, tipologías de las fincas en donde se describa el manejo del sistema y los porcentajes de sombra. Así como también ecuaciones alométricas desarrolladas principales bajo sistemas con café para árboles de sombra y para la planta de café. Se revisó diferentes estudios que determinaban biomasa de la hojarasca y poda bajo diferentes sistemas agroforestales.

El ICAFE, Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y el centro de investigaciones agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica proporcionaron una base de datos de análisis de suelos en calicatas determinando principalmente (para este estudio) contenido de materia orgánica, densidad aparente y profundidad de cada perfil del suelo. El carbono en el suelo se estimó de 0 – 30cm de profundidad.

Para la estimación de carbono almacenado a partir de la biomasa se utilizó 0.5 como factor de conversión. Mientras que la tasa de fijación de carbono en los árboles se obtuvo del carbono almacenado de los árboles dividido entre la edad (años) de los mismos.

Inventarios de carbono

Para realizar los inventarios se estratificó el sistema en biomasa encima del suelo y bajo el suelo. Se recolectó información acerca de árboles en parcelas con café, mediciones de árboles de sombra (DAP, altura total, edad, cobertura de copa), biomasa de la hojarasca, biomasa de poda (ecuaciones para hoja, porcentaje de poda) y contenido de MO del suelo muestreadas en regiones cafeteras proporcionadas por el CICAPE, INTA y CIA.

Estimaciones de almacenamiento de carbono por componente

Biomasa encima del suelo.

Las estimaciones de biomasa encima del suelo incluyen la planta de café, árbol de sombra, así como sus podas y hojarasca. Excluye la biomasa de la vegetación herbácea ya que es difícil de calcular pues depende de la especie, manejo, altura y latitud.

La biomasa del café y árbol de sombra se basó en ecuaciones alométricas que se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones alométricas para los sistemas agroforestales con café.

Especie	Ecuación alométrica	Fuente	Datos originales
<i>Coffea arabica</i>	$\text{Log } 10 (\text{BT}) = -1.113 + 1.578 * \text{Log } 10 (\text{d15}) + 0.581 * \text{Log } 10 (\text{h})$	Segura et al., 2006	Nicaragua
Biomasa raíces	$\text{Br} = e^{(-1.0587 + 0.8836 * \text{Ln}(\text{Ba}))}$	Cairns et al., 1997	Países tropicales
<i>Inga laurina</i>	$\text{Ln} (\text{Bt}) = 1.17 + 30.78 * \text{dap} - 52.74 + \text{dap}^2$	Salgado, 2010	Nicaragua
<i>Terminalia amazonia</i>	$\text{Ln} (\text{Bt}) = 2.24 + 12.12 * \text{dap}$	Salgado, 2010	Costa Rica
<i>Eucalyptus deglupta</i>	$\text{Ln MS} = -2.31 + 2.4746 * \text{Ln} (\text{dap})$	Magaña et al., 2004	Costa Rica
<i>Cordia alliodora</i>	$\text{B} = 10^{(-0.51 + 2.08 * \text{Log} (\text{dap}))}$	Andrade. J et al., 2014	Colombia
<i>Cedrela odorata</i>	$\text{B} = 0.7371 \text{ DN}^2 - 15.5533 \text{ DN} + 94.9946$	Rueda Sánchez et al., 2015	México
<i>Citrus sinensis</i>	$\text{B} = -6.64 + 0.279 * \text{BA} + 0.000514 * \text{BA}^2$	Schroth et al., 2002	Brazil
<i>Theobroma cacao</i>	$\text{B} = 10^{(-1.625 + 2.63 * \text{Log} (\text{dap}))}$	Andrade et al., 2008	Costa Rica
Otros frutales	$\text{B} = 10^{(-1.11 + 2.64 * \text{Log} (\text{dap}))}$	Andrade et al., 2008	Costa Rica
<i>Musa sp.</i>	$\text{Y} = 0.0303 * \text{D}^{2.1345}$	Espinoza-Domínguez et al., 2012	México

La hojarasca y poda del cafeto como del árbol de sombra se tomó de los datos medidos por Romero Lopez (2006) bajo seis sistemas agroforestales de café en Turrialba, Costa Rica. Con árboles de sombra como poró (*Erythrina poeppigiana*), roble coral (*Terminalia amazonia*) y casha (*Chloroleucon eurycyclum*) y combinados bajo tres niveles de manejo alto convencional (AC), medio convencional (MC) y alto orgánico (AO). El porcentaje de poda de *Inga laurina* fue tomado de la tesis de Ovalle 2014.

El árbol de poró es manejado drásticamente en la mayoría de los cafetales de Costa Rica, por lo cual Magaña *et al.* (2004) explica que no se permitió establecer una relación entre el diámetro a la altura del pecho (dap) y la biomasa aérea del árbol. Lo cual para efectos de este estudio se tomó el valor medido por el mismo autor en árboles de poró con 4 años de edad para la zona del pacífico Sur de Costa Rica.

Biomasa bajo el suelo:

Se estimó la biomasa de las raíces a partir de la ecuación de raíces como muestra la tabla 1 (Cairns et al., 1997) y se utilizó los datos de muestreados en zonas cafeteras de materia orgánica antes descritos.

Determinación de sombra y arreglos agroforestales

Se utilizó 5000 plantas de café por ha en todos los arreglos agroforestales y regiones cafeteras con una pérdida del 10% por falla física. Para determinar los porcentajes de sombra se utilizaron dos arreglos agroforestales con café el primero extraído del censo cafetero realizado por el INEC e ICAFE en Turrialba y Coto Brus 2003, Valle Central y Valle Central Occidental 2004, y Pérez Zeledón, Tarrazú y Zona Norte 2006 (tabla 2). El segundo arreglo se obtuvo del diagnóstico de la caficultura: cosecha 2014-2015 del ICAFE (tabla 3). Es importante aclarar que el diagnóstico es una muestra de las fincas cafeteras por región mientras que el censo de hizo a todas las familias caficultores.

En la tabla 2 la casilla otros fue considerado como frutales mientras que en la tabla 3 otros no fue considerado ya que tiene porcentajes menores a 6 a excepción de la zona norte, sin embargo esta zona solo tiene 3 encuestas.

Tabla 2. Arreglo agroforestal con café en cada región cafetera de Costa Rica según el censo cafetero Turrialba y Coto Brus 2003, Valle Central y Valle Central Occidental 2004, y Pérez Zeledón, Tarrazú y Zona Norte 2006 del INEC e ICAFE.

Región	Pleno sol	% presencia de la especie					
		Servicio		Maderables		Musáceas	Otros (frutales)
		Poró	Guaba	Laurel	Eucalipto		
Turrialba	6	44	4	11	9	16	9
Coto Brus	9	32	24	1	1	30	4
Valle Central	32	20	11	3	5	18	11
Valle Occidental	10	23	29	3	5	20	10
Tarrazú	6	40	4	1	3	34	12
Pérez Zeledón	5	37	24	0	2	25	7
Zona Norte	13	44	4	11	7	21	18

Los arreglos agroforestales en ambas tablas tienen patrones similares en los árboles de servicio y musáceas, sin embargo los maderables y frutales son diferentes. Los porcentajes de sombra en ambos arreglos tienen las mismas tendencias sin embargo difiere en la zona Norte y en Coto Brus. En general la sombra es superior en el censo que en diagnóstico.

Los dos arreglos agroforestales muestran una finca promedio por cada región cafetera el cual es base para calcular el carbono almacenado para Costa Rica por ducha actividad. Los resultados muestran la comparación de los arreglos para toma de decisiones.

Tabla 3. Arreglo agroforestal con café en cada región cafetera de Costa Rica según el diagnóstico de la caficultura: cosecha 2014-2015 del ICAFE.

Región	Pleno sol	% presencia de la especie					
		Servicio		Maderables	Frutales	Musáceas	Otros
		Poró	Guaba				
Turrialba	5	53	18	0	18	8	0
Coto Brus	0	40	24	24	3	3	6
Valle Central	14	31	16	8	13	12	6
Valle Occidental	6	34	12	36	5	5	2
Los Santos	2	40	35	1	4	15	2
Pérez Zeledón	4	39	25	20	8	3	2
Zona Norte	0	18	18	9	9	18	27

Como estrategias de innovación de sistemas agroforestales con café se tomó como base la matriz de innovaciones agroforestales para NAMA-Café incluido en el reporte de tecnologías de sistemas agroforestales con café para validación en regiones cafeteras de Costa Rica (Arrieta Bolaños et al., 2015).

Son cuatro innovaciones categorizadas por zona altitudinal; para este estudio la cantidad de árboles por ha varía dependiendo de la especie y el arreglo agroforestal. La tabla 4 muestra los árboles de servicio, maderables y frutales así como los arreglos utilizados para calcular el almacenamiento de carbono.

Tabla 4. Densidades de sombra (#árboles / ha) en las innovaciones agroforestales con café.

Zona	Musáceas	SAF 1	SAF 2	SAF 3	SAF 4
Alta	450	75	60	38	240
Baja		150	85	70	340

SAF 1. Inga ó poró; **SAF 2.** Laurel ó Cedro ó Eucalipto ó Amarillon;
SAF 3. Naranja ó Cacao ú otros frutales **SAF 4.** Poró, Laurel, frutales y Musáceas.

8 RESULTADOS

Los resultados se dividen en dos partes: establecer la línea base del carbono almacenado en las regiones cafeteras según dos opciones de arreglos agroforestales con café y cuantificar el carbono almacenado bajo innovaciones agroforestales con café.

Carbono almacenado por cada región cafetera en Costa Rica

El carbono almacenado en Costa Rica bajo sistemas agroforestales con café es de 11.43 ± 0.26 millones de Mg C / ha. Siendo la Zona Norte, Valle Occidental y Tarrazú o Los Santos las regiones que más almacenan carbono.

Las mayores cantidades de carbono almacenado se encuentran en el suelo como demuestran diferentes estudios donde evidencian valores de más del 50% del carbono total. (Avila et al., 2001; Espinoza-Domínguez et al., 2012; Hergoualc'h et al., 2012; Mena et al., 2011; Negash and Kanninen, 2015; Negash and Starr, 2015; Soto-Pinto et al., 2009; Soto-Pinto and Aguirre-Dávila, 2014).

Los valores de carbono almacenado encima del suelo fluctúan dependiendo del arreglo agroforestal, edad y densidad pues las tasas de carbono fijado cambian según la especie de sombra. De las especies utilizadas en este estudio de mayor a menor fijación se encuentra *Cordia alliodora*, *Eucaliptus sp.*, *Terminalia ivorensis*, *Inga edulis*, *cedrella odorata*, *Erythrina poeppigiana* y frutales, respectivamente.

El arreglo agroforestal del censo y el diagnóstico para la región del Valle Central almacena bajo contenido de carbono para la sección encima del suelo, sin embargo tiene altos contenidos de carbono almacenados en el suelo. Esta región se caracteriza por presentar los porcentajes más altos de cafetales a pleno sol por lo cual explica los bajos valores de almacenamiento de carbono.

Turrialba es la región que presenta los más bajos contenidos totales de carbono almacenado en ambos arreglos agroforestales debido al contenido de carbono en suelo y a las bajas fijaciones de carbono por parte del arreglo agroforestal del diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 (tabla 6), mientras que en el censo es alto (tabla 5).

En general hay variaciones de almacenamiento de carbono entre arreglos agroforestales del censo y el diagnóstico cafetero. Sin embargo los valores son más bajos en el censo que en el arreglo del diagnóstico cafetero.

Tabla 5. Carbono almacenado bajo el arreglo agroforestal del censo cafetero INEC e ICAFE.

Detalle	Región cafetera (Mg C / ha)						
	Coto Brus	Tarrazú	Pérez Zeledón	Turrialba	Valle Central	Valle Occidental	Zona Norte
Carbono encima del suelo	16.71	13.74	17.1	20.59	13.61	18.99	20.53
Carbono bajo el suelo	113.17	123.6	101.37	83.87	148.97	111.86	113.78
C total*sistema	129.88	137.35	118.47	104.46	162.58	130.94	134.3
C total*región (millon)	1.32	2.53	1.48	0.83	2.22	2.5	0.29

Tabla 6. Carbono almacenado bajo el arreglo agroforestal del diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE.

Detalle	Región cafetera (Mg C / ha)						
	Coto Brus	Los Santos	Pérez Zeledón	Turrialba	Valle Central	Valle Occidental	Zona Norte
Carbono encima del suelo	26 ± 6.3	19 ± 0.17	24.5 ± 5.09	17.14	17.24 ± 2.07	27.15 ± 9.24	16.84 ± 2.33
Carbono bajo el suelo	115 ± 1.37	124.7 ± 0.04	102.98 ± 1.10	81.47	149.37 ± 0.45	113.37 ± 2	111.39 ± 0.5
C total*sistema	141 ± 7.67	144.7 ± 0.01	127.52 ± 6.2	98.61	166.61 ± 2.52	140.52 ± 11.24	128.23 ± 2.84
C total*región (millon)	1.44 ± 0.08	2.66	1.59 ± 0.08	0.78	2.27 ± 0.035	2.68 ± 0.21	0.275 ± 0.005

Coto Brus es la región que más difiere en la cantidad de carbono almacenado en el sistema excluyendo el suelo para los dos arreglos agroforestales del censo y el diagnostico (figura 3), debido a la mayor presencia de árboles maderables como sombra y menos de musáceas. Así mismo hay mayor presencia de maderables en las regiones de los Santos, Pérez Zeledón y Valle Occidental y menos en Turrialba y la zona Norte.

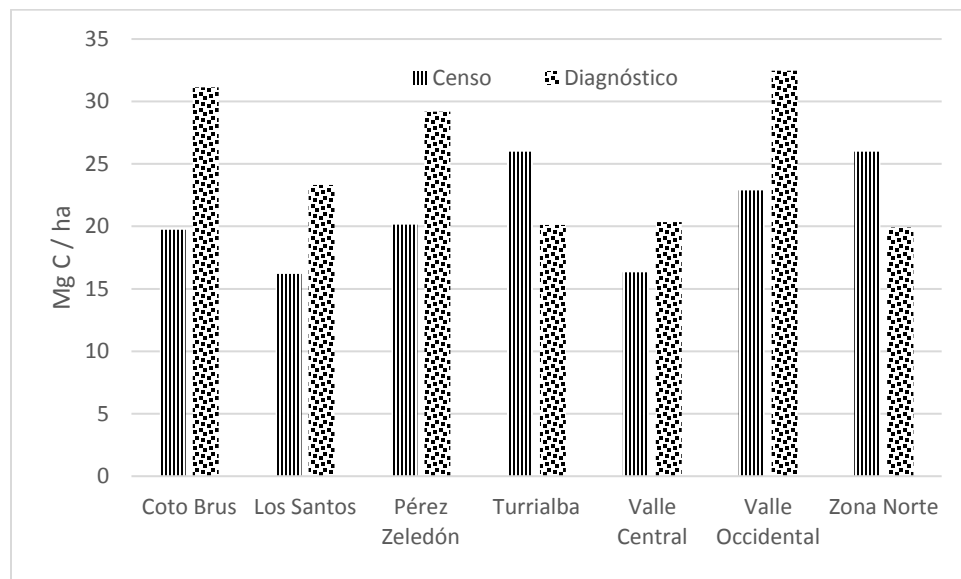


Figura 3. Almacenamiento de carbono (Mg C / ha) encima del suelo y en las raíces por sistema.

La tasa promedio anual de fijación de carbono oscila entre un 0.67 a 3.3 dependiendo del arreglo agroforestal en cada región cafetera.

Innovaciones Agroforestales con café en Costa Rica

Bajo la guía de la matriz de innovaciones agroforestales con café realizadas por los investigadores del CATIE, se calculó el almacenamiento de carbono para cuatro arreglos agroforestales con café con las densidades descritas en la tabla 4. El sistema que menor almacena carbono es a pleno sol que es de esperarse le siguen los arreglos con Cacao y otros frutales esto se debe a la baja densidad de árboles (38 a 70) y al bajo almacenamiento por parte de estas especies.

El sistema de asocio diversificado con árboles de servicio, maderables y frutales más musáceas (sistema Agroforestal comercial) sobresale como uno de los mayores almacenadores de carbono; con una densidad final de 240 a 340 árboles / ha almacena 22.18 a 28.47 Mg C / ha sin tener en cuenta el carbono en el suelo. Otro sistema interesante es con el árbol maderable Laurel (*Cordia alliodora*) pues también almacena cantidades similares al agroforestal comercial (entre un 21.91 a 28.65 Mg C / ha y densidades de 60 a 85 árboles / ha).

Los dos sistemas antes descritos (Laurel y agroforestal comercial) son muy variados y cada uno tiene importancia dependiendo del objetivo del agricultor. A pesar de tener bajas densidades de Laurel hay una gran cantidad de carbono almacenado pues esta especie tiene una tasa de fijación elevada de carbono. Mientras que el sistema agroforestal comercial tiene la ventaja de combinar especies que incluyen árboles de servicio, maderables, frutales y musáceas el cual ofrece mayores servicios ecosistémicos.

El sistema musáceas junto con el de poró, cedro y naranja presentan valores similares de almacenamiento de carbono lo cual se explica en las altas densidades de musáceas (450 árboles/ha) mientras las densidades de los otros sistemas son tres veces menores a estas.

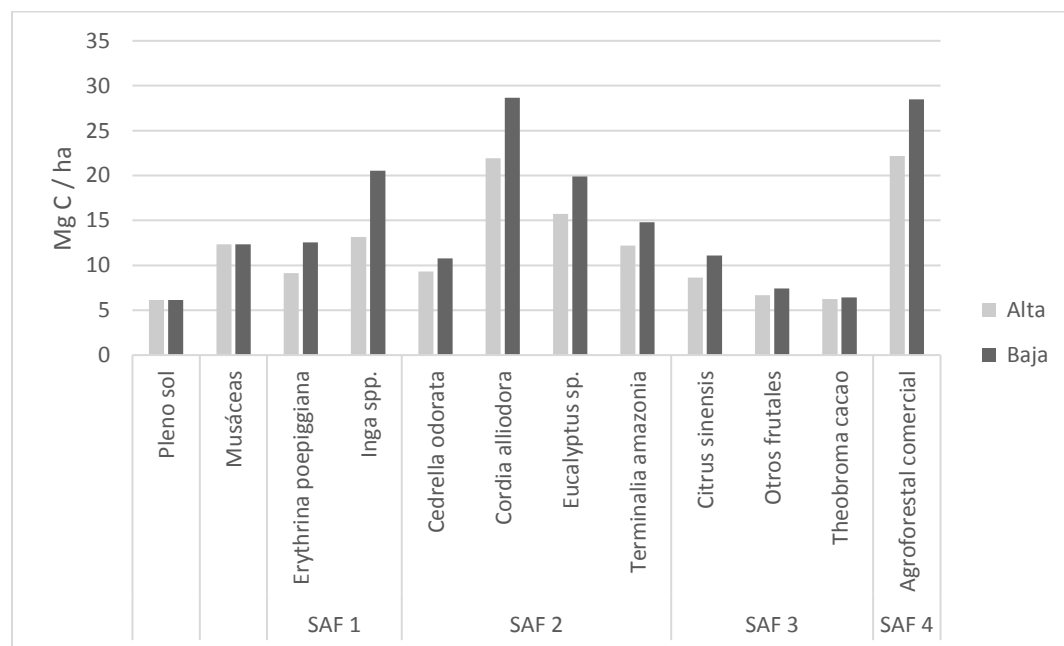


Figura 4. Almacenamiento de carbono para cuatro innovaciones agroforestales con café (carbono encima del suelo y raíces)

La tabla 7 muestra el almacenamiento de carbono por cada región cafetera incluyendo el carbono encima y bajo el suelo. Turrialba presenta los valores más bajos de almacenamiento sin embargo esto se debe al bajo contenido de carbono en el suelo, mientras que el Valle Central presenta los valores más elevados.

La innovación agroforestal con *Cordia allidora* (Laurel) presenta en general para casi todas las regiones cafeteras el sistema con más almacenamiento de carbono al igual que el agroforestal comercial.

Los resultados del laurel en Turrialba son parecidos a los encontrados por Mena et al.(2011) donde estimó 107 Mg C / ha para Aquiares y el cual tuvo en cuenta el suelo (0-30cm), biomasa aérea, abajo del suelo y necromasa. La cantidad de carbono almacenado cambia, según Mena et al.(2011), dependiendo del piso altitudinal en que se encuentre el arreglo agroforestal. De igual forma estimó para el arreglo café-poró 163.12 Mg C / ha para una zona alta (1300msnm) y 92.45 Mg C / ha para una zona media (800msnm). La diferencia se debe a la cantidad de carbono en el suelo. Por lo cual el valor estimado en este estudio presenta la misma tendencia de Mena.

Avila et al. (2001) estimó para el sistema eucalipto y café 120.9 t C/ha (8 años), datos que difieren al estimado en este estudio pues el contenido de carbono en el suelo es mayor por 36 t C / ha.

Las figuras 5, 6, 7 y 8 muestra la diferencia del sistema base (censo y el diagnóstico) y el arreglo planteado para las innovaciones agroforestales por cada región cafetera. Estas demuestran que la innovación agroforestal comercial es la que presenta mayor almacenamiento de carbono en todas las regiones además de que un sistema agroforestal almacena más carbono que un sistema a pleno sol. La innovación con Laurel (árboles maderables) es la segunda innovación que más almacena carbono. Mientras que los árboles frutales es el arreglo que menos almacena carbono.

Tabla 7. Almacenamiento de carbono (Mg C / ha) en cuatro innovaciones agroforestales con café para Costa Rica (carbono encima y bajo el suelo).

Región cafetera	Zona	Pleno sol	Musáceas	SAF 1		SAF 2				SAF 3			SAF 4
				<i>Inga spp.</i>	<i>Erythrina poeppigiana</i>	<i>Cordia alliodora</i>	<i>Cedrella odorata</i>	<i>Terminalia amazonia</i>	<i>Eucalyptus sp.</i>	<i>Citrus sinensis</i>	<i>Theobroma cacao</i>	<i>Otros frutales</i>	<i>Agroforestal comercial</i>
Coto Brus	Alta	116.27	122.47	123.29	119.29	132.06	119.45	122.36	125.87	118.79	116.39	116.81	132.33
	Baja			130.7	122.69	138.8	120.93	124.94	130.03	121.24	116.58	117.58	138.61
Los Santos	Alta	127.28	133.49	134.3	130.3	143.07	130.46	133.37	136.88	129.8	127.41	127.82	143.34
	Baja			141.71	133.7	149.81	131.94	135.95	141.04	132.25	127.59	128.59	149.63
Pérez Zeledón	Alta	104.46	110.67	111.48	107.48	120.25	107.64	110.55	114.06	106.98	104.59	105	119.76
	Baja			118.89	110.88	126.99	109.12	113.13	118.22	109.43	104.77	105.77	126.05
Turrialba	Alta	84.61	90.82	91.63	87.63	100.4	87.79	90.7	94.21	87.13	84.74	85.15	100.67
	Baja			99.04	91.03	107.14	89.27	93.28	98.37	89.58	84.92	85.92	106.96
Valle Central	Alta	152.38	158.59	159.4	155.4	168.17	155.56	158.47	161.98	154.9	152.51	152.92	168.44
	Baja			167.81	158.8	175.91	157.04	161.05	166.14	158.35	152.69	153.69	174.73
Valle Occidental	Alta	114.19	120.4	121.21	118.21	129.98	117.37	120.28	124.79	116.71	114.32	115.73	130.25
	Baja			130.62	120.61	138.72	118.85	122.86	127.95	121.16	114.5	115.5	136.54
Zona Norte	Alta	114.45	120.66	121.47	117.47	130.24	117.63	120.54	124.05	116.97	114.58	114.99	130.51
	Baja			129.88	120.87	137.98	119.11	123.12	128.21	120.42	114.76	115.76	136.8

Figura 5. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Coto Brus y Los Santos.

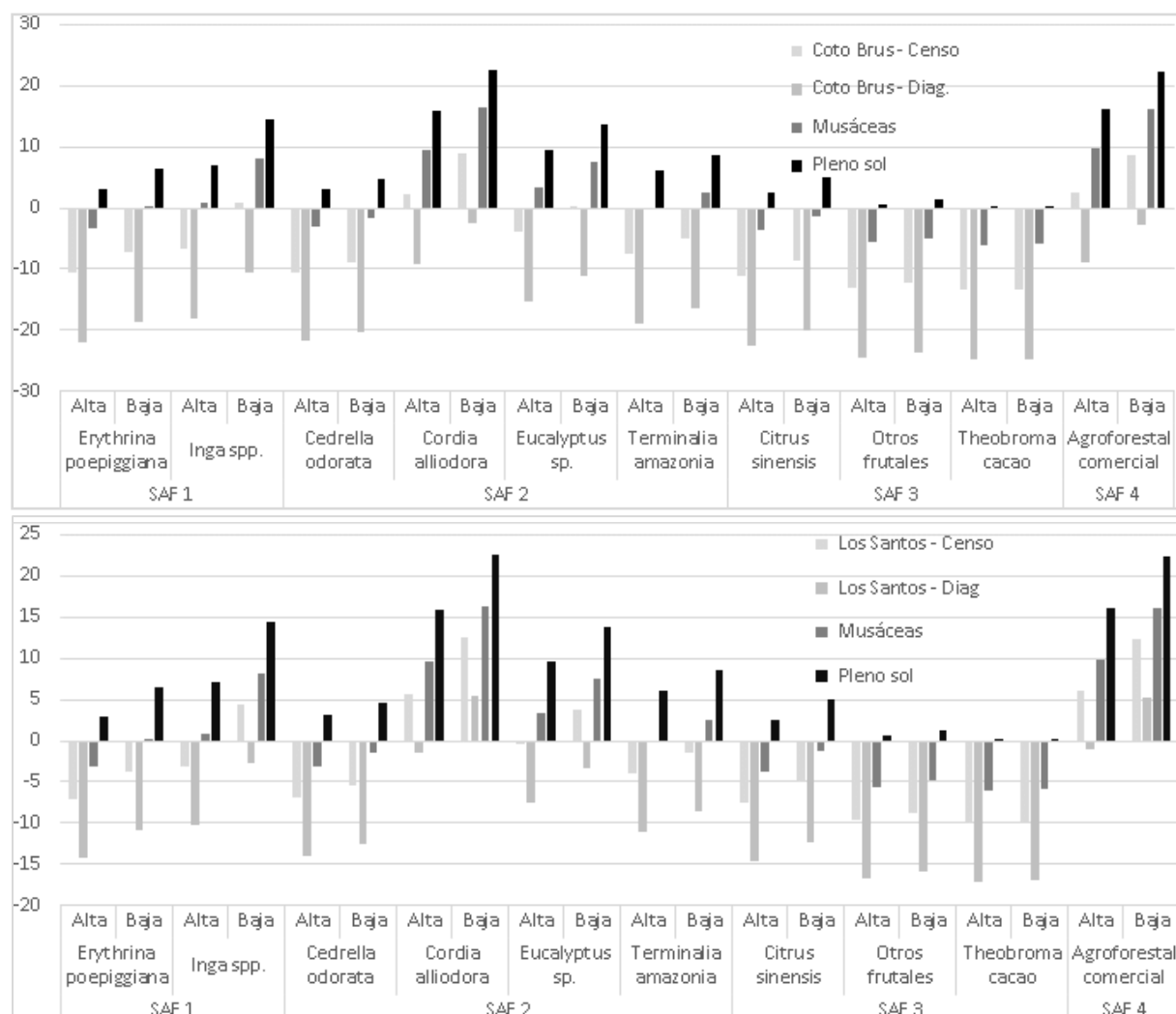


Figura 6. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Pérez Zeledón y Turrialba.

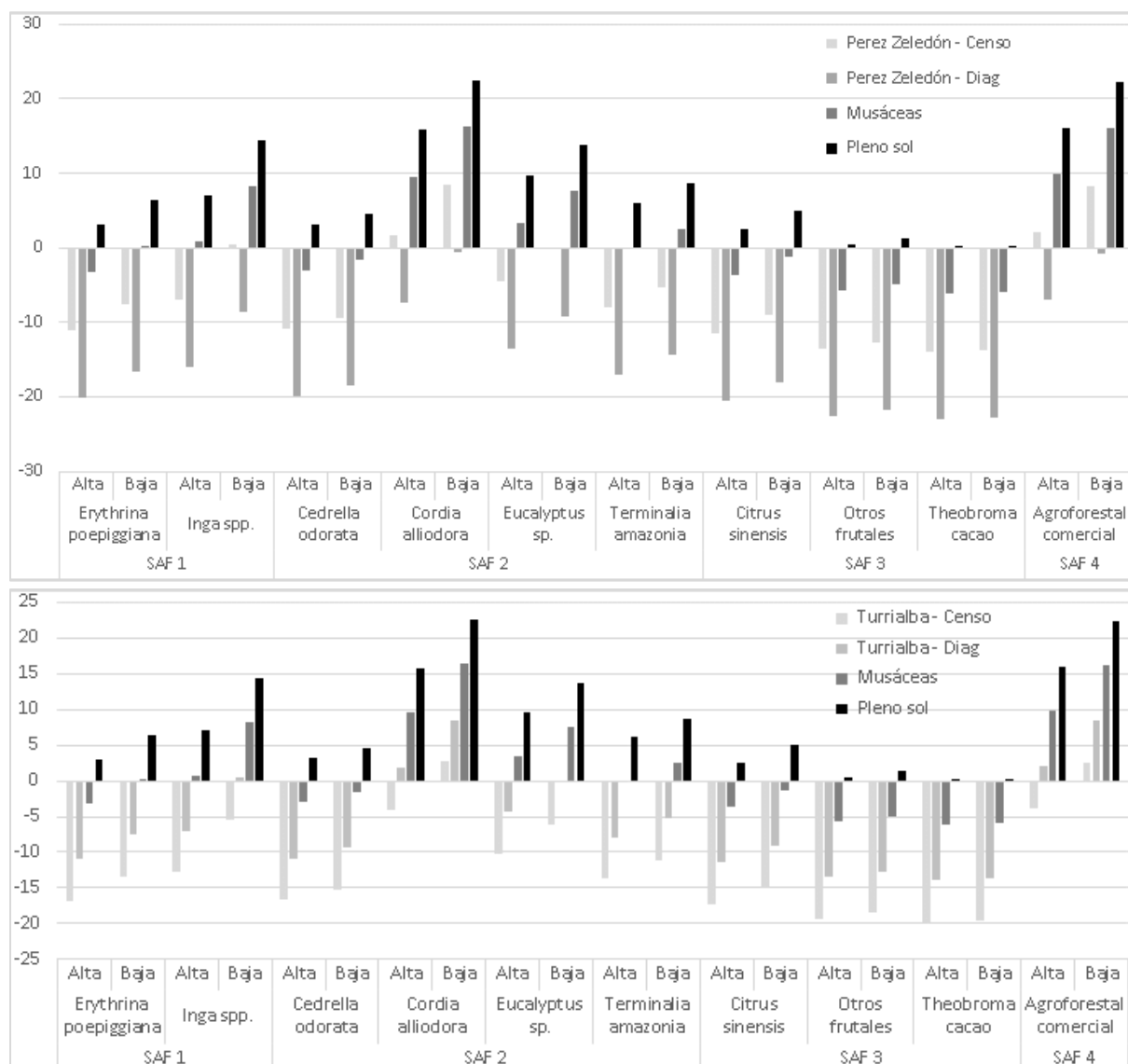


Figura 7. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Valle Central y Valle Occidental.

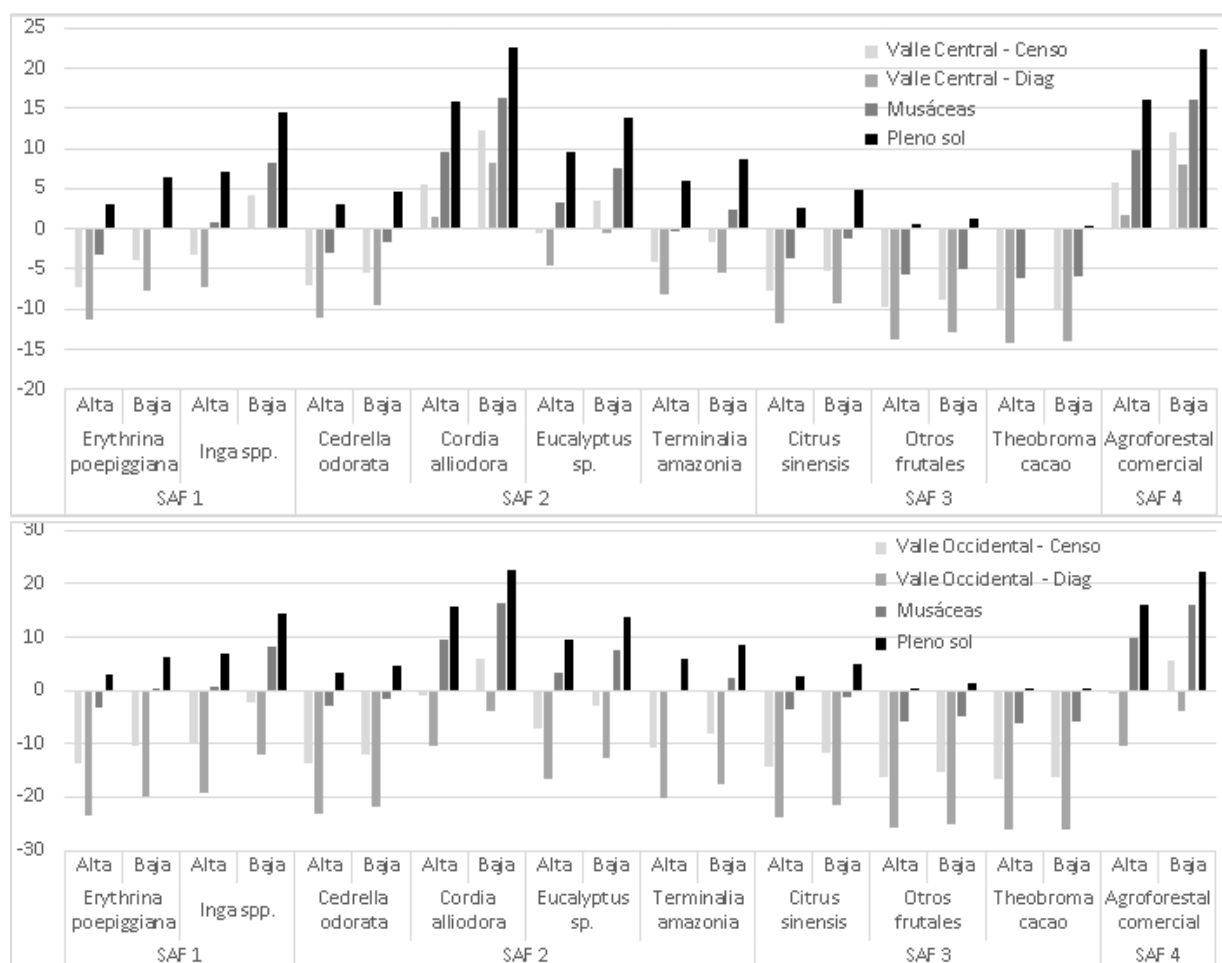
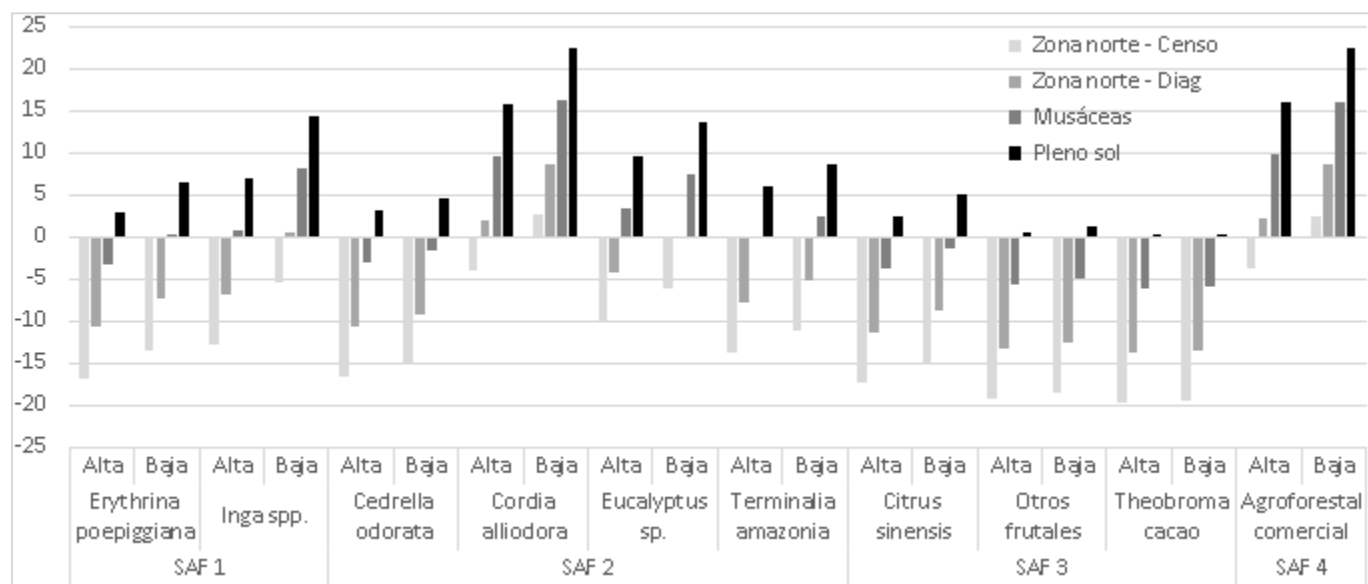


Figura 8. Comparación del almacenamiento de carbono (Mg C / ha) de las innovaciones agroforestales Vs línea base del promedio del Sistema con café según el Censo y el diagnóstico cafetero: cosecha 2015-2016 del ICAFE para la región de Zona Norte.



9 CONCLUSIONES

Los sistemas agroforestales con café en Costa Rica almacenan mayores contenidos de carbono que un sistema a pleno sol. La densidad de siembra y tipo de árboles de sombra son determinante para obtener mayores cantidades de carbono en el sistema y dependerá de las condiciones del sitio y de los objetivos del productor.

En la línea base obtenida en el Diagnóstico cafetero, Coto Brus, Pérez Zeledón y el Valle Occidental son las regiones que presentan los mayores contenidos de carbono mientras que Turrialba y la Zona Norte presentan los más bajos almacenes de carbono (sin tener en cuenta el suelo). Caso contrario ocurre para el censo Turrialba y la Zona Norte son las regiones con más contenido de carbono. Y se debe a los arreglos agroforestales de cada uno.

Los mayores contenidos de carbono se encuentra en el suelo sin embargo en Costa Rica solo se puede reportar el almacenamiento de carbono por parte de los árboles. Es así que la innovación agroforestal comercial es el arreglo que presenta los mayores contenidos de carbono en todas las regiones cafeteras en comparación a la línea base identificada. La combinación de árboles de servicio, maderables y frutales aportan mayores servicios ecosistémicos, beneficios al sistema e influye directamente en los medios de vida del productor.

Las innovaciones agroforestales muestra la variabilidad que tiene un sistema para almacenar carbono y la importancia del arreglo seleccionado. Diferentes innovaciones son atractivas para cada región dependiendo del arreglo agroforestal: densidad, especie, altitud, variedad y objetivos del productor.

10 RECOMENDACIONES

Los resultados muestran una aproximación del carbono almacenado por cada región cafetera teniendo como base dos arreglos agroforestales sin embargo se debería tener información más actualizada como por ejemplo de otro Censo cafetero para obtener datos reales del sector.

Los arreglos agroforestales utilizados (Censo y el diagnóstico) son dos metodologías válidas y tienen resultados interesantes sin embargo se recomienda al MAG e ICAFE escoger uno de estos dos para trabajar bajo una base única y así el sector pueda guiarse en una misma línea.

Para las innovaciones agroforestales se recomienda hacer trabajo de campo para optimizar y validar densidades y tipo de árbol por cada región cafetera teniendo en cuenta el objetivo de productor, altitud, clima, mercado entre otros.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, J. H., Marin, M. L., Pachón, P. D., 2014. Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro* 26, 127–132.
- Andrade, H., Segura, M., Somarriba, E., Villalobos, M., 2008. Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 46, 45–50.
- Arrieta Bolaños, S., Virginio Filho, E. de M., Rounsard, O., Rapidel, B., 2015. Diseño de piloto de sistemas agroforestales en el ámbito de la NAMA-CAFÉ Costa Rica. *Tecnologías de sistemas agroforestales con café para validación en regiones cafeteras de Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica.
- Avila, G., Jiménez Otárola, F., Ibrahim, M., Beer, J., 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8, 32–35.
- Cairns, M.A., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests 1–11.
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., Torres-Rivera, A., 2012. Almacén de Carbono en Sistemas Agroforestales con Café. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. y del Ambient.* XVIII, 57–70. doi:10.5154/r.rchscfa.2011.04.030
- Hergoualc'h, K., Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C., Harmand, J.M., 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 148, 102–110. doi:10.1016/j.agee.2011.11.018
- ICAFFE, 2015. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Heredia, Costa Rica.
- Lorenz, K., Lal, R., 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 443–454. doi:10.1007/s13593-014-0212-y
- Magaña, S.D.M., Harmand, J.M., Hergoualc'h, K., 2004. Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea y el mantillo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 41–42, 98–104.
- Mena, E.V., Andrade, H.J., Navarro, C.M., 2011. Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios e un gradiente altitudinales en Costa Rica. *Agroforestería Neotrop.* 1.
- Moguel, P., Toledo, M., 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conserv. Biol.* 13, 11–21.
- Negash, M., Kanninen, M., 2015. Modeling biomass and soil carbon sequestration of indigenous agroforestry systems using CO2FIX approach. *Agric. Ecosyst. Environ.* 203, 147–155. doi:10.1016/j.agee.2015.02.004

- Negash, M., Starr, M., 2015. Biomass and soil carbon stocks of indigenous agroforestry systems on the south-eastern Rift Valley escarpment, Ethiopia. *Plant Soil* 393, 95–107. doi:10.1007/s11104-015-2469-6
- Romero Lopez, S.A., 2006. Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* var. Caturra), con tres niveles de manejo. CATIE.
- Rueda Sánchez, A., Gallegos Rodríguez, A., González Eguiarte, D., Ruiz Corral, A., Benavides Solorio, J. de D., López Alcocer, E., Acosta Mireles, M., 2015. Estimación de biomasa aérea en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. *Rev. Mex. Ciencias For.* 5, 8–17.
- Salgado, J., 2010. Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua.
- Schroth, G., D'Angelo, S.A., Teixeira, W.G., Haag, D., Lieberei, R., 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *For. Ecol. Manage.* 163, 131–150. doi:10.1016/S0378-1127(01)00537-0
- Segura, M., Kanninen, M., Suárez, D., 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agrofor. Syst.* 68, 143–150. doi:10.1007/s10457-006-9005-x
- Soto-Pinto, L., Aguirre-Dávila, C.M., 2014. Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, Mexico. *J. Agric. Sci.* 7, 117–128. doi:10.5539/jas.v7n1p117
- Soto-Pinto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Ferrer, G.J., de Jong, B., 2009. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agrofor. Syst.* 78, 39–51. doi:10.1007/s10457-009-9247-5

12 ANEXOS

Diseño de Piloto de Sistemas Agroforestales – NAMA-CAFÉ, Costa Rica
CATIE-CIRAD-FUNDECOOPERACION-ICAFÉ-MAG
Matriz de Innovaciones Agroforestales para NAMA-CAFÉ (Fase de Validación)

Parámetros de Referencia	Sistemas testigos (un tercero testigo es el del sistema del productor en fincas de validación)		Sistemas con Innovaciones Agroforestales –NAMA-CAFÉ			
Tipo de sombra/dosel	Producción en Pleno Sol	Asocio con Musáceas	Asocio solo con árboles de Servicio	Asocio solo con árboles maderables	Asocio solo con árboles frutales leñosos	Asocio diversificado con árboles de servicio, maderables y/o frutales
% de cobertura de sombra	0%	20 a 30 %	30 a 45%	30 a 45%	30 a 45%	30 a 50%
Escala de Importancia General (servicios ecosistém.)	0,5	1	4	3	2	5
Composición dosel	Ausente dosel	Musáceas (banano y/o plátano en predominio)	Erythrina y/o Ingas y/o Gliricidia en predominio (Todas las altitudes)	Laurel, Cedro, Amarillón, Caoba, Cenizaro, Gallinazo, Jaul, Guachipelin, Cocobolo, Cristobal, Cortesa amarillo, Ron ron, Eucalipto, Casuarina, Ciprés, Pino.	Cítricos, Aguacate, Anonas, Guayaba, Durazno, Macadamia, Guanabana, Cacao, Cas, Papaya, Jocote.	Mezcla con especies de servicio, maderable y frutal.
Rango Densidad de árboles/ha)	0	Musáceas (300 a 600 plantas/ha)	Zonas Altas: 70/ha a 80/ha con manejo Zonas Medias y Bajas: 100 a 200 con manejo	(después de 10 años de sembrado para maderables) Zonas Altas: 40/ha a 70/ha Zonas Medias y Bajas: 70 a 100	Zonas Altas: 25/ha a 50/ha Zonas Medias y Bajas: 50/ha a 80/ha	ZA (70/ha a 600/ha): (serv 60 a 80; mad 30 a 70; fru 20 a 50; musáceas 100 a 370) ZM y ZB (100/ha a 750/ha): (serv 90 a 200; mad 60 a 100; fru 40 a 80; musáceas 200 a 500)
Variedades de café	Caturra, Catuai,	Caturra, Catuai	Mezclas de minino dos variedades con resistencia, productividad y calidad complementares	Mezclas de minino dos variedades con resistencia, productividad y calidad complementares	Mezclas de minino dos variedades con resistencia, productividad y calidad complementares	Mezclas de minino dos variedades con resistencia, productividad y calidad complementares
Productividad Fan café/ha/año	25 a 30	20 a 30	>25	>25	>25	>25
Tipos y niveles de manejo agronómico	Alto y Moderados Convencionales	Alto y Moderados Convencionales	Moderados Convencionales y Moderados Orgánicos	Moderados Convencionales y Moderados Orgánicos	Moderados Convencionales y Moderados Orgánicos	Moderados Convencionales y Moderados Orgánicos
Factor emisión N (excluyendo poda)	1%	1%	1,2%	1 a 1,2%	1%	1 a 1,2%
Rango de Emisiones de CO ₂ e/t/ha/año equivalente	2,71 a 5		1,5 a 6,13	0,5 a 5,14		2,29 a 3,20
Rango de Secuestro anual CO ₂ e/t/ha/año	3,03 a 4,43		0,3 a 14,25	0,4 a 47,24		15,97 a 25,12
Rango de Almacenamiento/estoque CO ₂ e/t/ha/año equivalente	Suelo: 77 a 153,9 Café: 2,88 a 3,1 (Rango Total: 79,88 a 157)	Suelo: 49,5 a 52,8* Café: 2 a 3,1 Dosel: 9,3 a 27** (Rango Total: 60,8 a 82,9)	Suelo: 81,25 a 184,4 Café: 2 a 3,8 Dosel: 9 a 12 (Rango Total: 92,25 a 200,2)	Suelo: 123,4 a 183 Café: 2,59 a 3,21 Dosel: 9 a 55,18 (Rango Total: 134,99 a 241,39)	Suelo: 50* a 60 Café: 2 a 3 Dosel: 31,5* a 34 * (Rango Total: 83,5 a 97)	Suelo: 66,2** a 104,7 Café: 3 a 3,8 Dosel: 9 a 84,37* (Rango Total: 78,2 a 192,87)

Elaborado por: Virgínio Filho, E. de M.; Rapidel, B.; Rounsard, O.; Arrieta, S.; 2015. en base a estudios previos CATIE-CIRAD y otros autores.