

ALMACENAMIENTO DE CARBONO ORGANICO EN SUELOS DE PRODUCCION AGRICOLA EN CULTIVO DE CACAO (Theobroma cacao L.) EN ECOSISTEMA TROPICAL.

Jaime Alfonso Ortiz Londoño¹.

¹Ingeniero Agrónomo, Esp. Gestión Ambiental y Evaluación de Impacto Ambiental, Asesor Agroambiental, Carrera 9 # 35-85 La Ceiba I, Ibagué, Tolima, e-mail: jaimeaortizl@hotmail.com.

Resumen

El presente estudio se basa en analizar la capacidad de captura de carbono por parte del suelo, cuando es sometido a dos modelos de producción aplicables al cultivo de cacao en ecosistemas tropicales, tomando como área de estudio el municipio de Nilo Departamento de Cundinamarca, con el fin de conocer la influencia que tienen las prácticas agrícolas asociadas sobre los procesos de captura de carbono y la capacidad de fijación que tiene los sistemas de producción referidos. A partir de la toma de muestras y la cuantificación del Carbono a diferentes profundidades del perfil del suelo, se permite reconocer la importancia que tiene este elemento, en el mantenimiento de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo y su relevancia en procesos de desarrollo vegetal, calidad del recurso y la mitigación de emisiones de Gases de efecto invernadero, en especial el Dióxido de Carbono. Esto permitirá reconocer los factores y prácticas que inciden en la emisión-fijación de Carbono en suelo e identificar niveles de captura de carbono, con el fin de determinar tanto su relación con la calidad y conservación del suelo, como el papel del recurso dentro de los procesos de cambio climático y desarrollo sostenible.

Aunque los dos modelos productivos analizados, arrojan datos positivos frente a la captura de carbono, el modelo productivo con cobertura bajo sistema agroforestal, demuestra un nivel más alto en la capacidad de captura de carbono orgánico con 49,27 tC ha⁻¹, debido al asocio vegetal y aporte de biomasa. Vale la pena resaltar la importancia de la taxonomía y litología del suelo en los procesos de fijación y captura, ya que tienen relación directa con el almacenamiento del carbono, determinadas principalmente por la textura, estructura y densidad aparente.

Palabras claves: Fijación de Carbono, Suelos, Cacao, Cambio climático, Sistemas productivos.

Abstract.

The present study is based on analyzing the capacity of carbon capture by the soil, under two production models applicable to cocoa crops in tropical ecosystems, taking as study area the Nilo municipality in Department of Cundinamarca, In order to know the influence that the associated agricultural practices have on the carbon capture processes and the fixation capacity in these production systems. From the taking of samples and the quantification of Carbon at different soil profile depths, it is possible to recognize the importance of this element, in the maintenance of the physical, chemical and microbiological soil properties, and its relevance in plant development processes and the mitigation of greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide. This will allow recognizing the factors and practices that affect the carbon emission-fixation in soil and identify levels of carbon capture, in order to determine their relationship between the quality and conservation of soils, and the resource role in the climate change processes and sustainable development.

Although the two productive models analyzed throw positive data regarding carbon capture, the productive model with coverage under an agroforestry system demonstrates a higher level of organic carbon capture capacity with 49.27 tC ha⁻¹, due to the plant association and biomass contribution. It is worth highlighting the importance of soil taxonomy and lithology in the fixation and capture processes, since they are directly related to carbon storage, determined mainly by texture, structure and bulk density.

Key Words: Carbon Fixation, Soils, Cocoa, Climate change, Productive Systems.

Introducción

Los modelos de producción agrícola que han sido implementados en el país, traen consigo la generación de graves impactos ambientales, que afectan directa e indirectamente los recursos naturales y agudizan cada vez más los aspectos relacionados con la variabilidad climática. La pérdida de la eficiencia productiva, la disminución de calidad y disponibilidad de recursos naturales, y la dependencia de insumos externos, son factores que inciden cada vez más en los sistemas productivos y su población asociada, por esto cobra gran importancia el estudio y evaluación de las afectaciones presentadas en el sector productivo, con el fin de iniciar la creación de estrategias que conlleven al mejoramiento de prácticas agrícolas y permitan implementar actividades que promuevan la aplicación de criterios de desarrollo sostenible en los sistemas productivos.

Mediante la identificación de los efectos ambientales generados por diferentes sistemas de producción, y la relación existente con los niveles de emisión y

captura de Gases de Efecto Invernadero (en adelante GEI), se brindaran alternativas productivas a los agricultores, a partir de la identificación de las principales prácticas agrícolas que afectan las relaciones ecológicas de los agrosistemas, con el fin de promover un cambio en los modelos productivos actuales, que impulsen la implementación de parámetros de producción más sostenible, que mitiguen los impactos ambientales generados y mejoren las condiciones de disponibilidad y calidad de recursos naturales existentes en los territorios.

El mejoramiento de los modelos de desarrollo agrícola a través de la aplicación de prácticas sostenibles y la dejación de parámetros convencionales identificados como insostenibles, permitirán que mediante la implementación de actividades de mitigación, se puedan replantear modelos de producción más sostenibles que promuevan la aplicación de nuevas estrategias en el contexto local, nacional y regional del cultivo de cacao, el cual es uno de los renglones de mayor crecimiento en el país, permitiendo así minimizar impactos ambientales negativos debido a la integralidad de sus prácticas de manejo y bajo requerimiento de insumos externos, mejorar la situación social de la población debido al aumento de mano de obra y cambio de perspectivas, y optimización económica que permite generar ingresos en zonas y áreas con graves problemáticas tanto productivas como sociales, brindando así alternativas de desarrollo a varios territorios del país.

La importancia del cultivo de cacao como objeto de estudio se basa en que actualmente su implementación en el país como alternativa de desarrollo agrícola e industrial va en aumento, debido a la capacidad que tiene Colombia de producir Grano de calidad determinado como cacao fino y de aroma. Según datos de Dane (2014), actualmente el país se cuenta con 164.332 Hectáreas de cacao sembradas, con una producción actual de 87.632 toneladas de grano seco por año, lo que lo ubica como unos de los cultivos promisorios y potenciales del país, con una capacidad de ampliación cerca a los 2 millones de Hectáreas. Sin embargo se requiere un gran esfuerzo que propenda por el mejoramiento de la productividad por unidad de área acompañado de la conservación de los recursos naturales, debido a las condiciones geográficas en las cuales se desarrolla.

Debido a su potencial, se evidencia y prevé un incremento de las áreas productivas impulsado por entidades de entidades nacionales e internacionales que ven en este cultivo, un polo de desarrollo del país. Teniendo en cuenta lo anterior, a partir del mejoramiento de las prácticas de establecimiento y desarrollo del cultivo de cacao y su capacidad productiva, se puede convertir en una alternativa ambiental a partir de la captura de carbono por estos sistemas productivos como medida de mitigación al cambio climático.

Este cultivo está siendo utilizado a nivel mundial, como alternativa productiva en áreas de conflictos sociales como sustitución de cultivos ilícitos, ocupación de áreas improductivas y como base para la promoción del desarrollo económico a través de modelos productivos agroindustriales, a partir de ventajas competitivas como la gran demanda actual del mercado (Rojas & Sacristan, 2013). Debido al crecimiento actual de áreas de producción de grano, y las condiciones biogeográficas del país que permite su adecuado desarrollo, se requieren promover modelos productivos que brinden alternativas que tengan en cuenta los aspectos social, económico y ambiental de la sostenibilidad.

El objetivo del estudio se basa en la cuantificación de los contenidos de carbono existentes en suelos gestionados con el cultivo de cacao donde se aplican prácticas agrícolas relacionadas con modelos productivos, a partir del análisis de prácticas agrícolas que influyen en el almacenamiento de carbono, con el fin de promover el mejoramiento de las condiciones edáficas y mitigar impactos ambientales negativos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero y la conservación – preservación del recurso suelo, como factor determinante para la sostenibilidad de la agricultura.

Con esto se pretende que a partir de una caracterización e identificación de las propiedades edáficas, se reconozca la importancia del recurso suelo frente a los procesos de cambio climático, mediante la determinación de los niveles de captura de carbono como indicador de la calidad del suelo, e incidencia en el mejoramiento del recurso.

A medida que la agricultura se ha venido desarrollando, se han degradado las diversas relaciones ecológicas existentes, debido a que se han fracturado los principios ecológicos que promueven la conservación de los recursos naturales, llegándose a concluir por expertos y estudiosos, que la agricultura moderna se encuentra en estado de “crisis” (Altieri., 2001). Esto nos permite evidenciar, que es importante iniciar la implementación de nuevas prácticas o modelos de producción que promuevan un equilibrio entre el medio ambiente y la actividad productiva, a través de un uso racional y aprovechamiento eficiente de los recursos naturales.

Según FAO (2002), la degradación de los suelos tropicales producida por las actividades antrópicas, llega a afectar entre el 45 al 65 % de tierras agrícolas, para lo cual se debe tener en cuenta que la contribución de las zonas tropicales en los contenidos de carbono son de aproximadamente de 384-403 Petagramos de C (en adelante Pg, donde 1Pg = 10¹⁵ Gigatoneladas) a un metro de profundidad, comparado con la capacidad total de 1500 Pg C. Este tipo de ecosistemas en Colombia se encuentran en alto nivel de degradación por ser donde se concentra la mayor parte de los asentamientos urbanos y áreas de producción de alimentos, por esto se resalta la importancia de los

bosques tropicales y el potencial que poseen para la captura de carbono, ya que se convierte en una gran alternativa económica, social y ambiental, al promover el mejoramiento de propiedades físico-químicas del suelo, lograr una mayor disponibilidad de nutrientes y aumentar la resiliencia contra la degradación física y la erosión, presentándose como una alternativa real tanto para promover la mitigación de impactos ambientales y evitar la degradación de ecosistemas como para generar dinámicas en la económica rural que generen beneficios a la población asociada.

Los proyectos relacionados con captura de carbono en regiones semiáridas y subhúmedas pueden llegar a ofrecer excelentes alternativas de desarrollo sostenible. Los suelos degradados, en especial los ubicados en bosques tropicales, necesitan de asistencia técnica y capital económico para recuperar la capacidad productiva y calidad de los recursos naturales. Aunque no se cuenta con información exacta acerca del área expuestas a la desertificación existen datos actuales que demuestran que entre 3,47 y 3,97 mil millones de hectáreas se encuentran en este estado (Lal, Kimble, Follet, & Cole, 1998a).

Con el fin de abordar el problema y generar conciencia sobre el mismo, se debe tener en cuenta que los procesos que causan mayor cantidad de pérdidas de carbono en suelo son la erosión, ya sea hídrica o eólica, la mineralización de la materia orgánica, y la lixiviación del carbono orgánico e inorgánico. La erosión es la principal causante del proceso de degradación de los suelos, afectando cerca de 1.000 millones de hectáreas. Las pérdidas de suelo se estima que pueden variar entre 1 y 10 tC ha⁻¹, llegando en algunas ocasiones hasta 50 tC ha⁻¹ (FAO, 2002). Por esto es importante combatir los efectos asociados a la degradación de suelos a partir del mejoramiento y adaptación de sistemas productivos sostenibles, que contemplen la implementación de prácticas que propendan por incrementar los servicios ecosistémicos que pueden prestar los Agrosistemas.

Para entender la problemática, debemos comprender la dinámica e importancia del Carbono (en adelante C) el cual es un elemento fundamental tanto para la dinámica del componente orgánico del suelo, como para la formación de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, ya que además de establecer cambios en su almacenamiento, controlan la productividad de los suelos. Los contenidos de carbono orgánico en suelo, superan de dos a tres veces los contenidos de Carbono en la biomasa aérea, siendo el total de las reservas de Carbono existentes en el suelo, cerca del 75 % en los ecosistemas terrestres. Las reservas más altas de Carbono se encuentran en los primeros 15 cm del perfil y van disminuyendo a medida que se profundiza (Avilés, Angeles, Etchevers, De los Santos, & Llanderal, 2009). Lo anterior permite dar relevancia rol del carbono tanto en el funcionamiento y mantenimiento de los ecosistemas como de su papel en la degradación de recursos naturales y su relación con los impactos del cambio climático.

Uno de los impactos asociados al elemento carbono, son las emisiones de Dióxido de Carbono (en Adelante CO₂) por parte del suelo a la atmósfera, los cuales se producen por varios factores, donde juegan un rol importante la mineralización de la materia orgánica existente por parte la actividad de la macro fauna y microorganismos en el suelo, el metabolismo de las raíces de las plantas y el desarrollo de los ciclos biogeoquímicos. El Carbono orgánico presente en el suelo resulta de la incorporación de la materia orgánica fresca y la salida de Carbono en forma de CO₂ (Martinez, Fuentes, & Acevedo, 2008). De ahí la importancia de manejar y conocer adecuadamente los procesos relacionados con este elemento y determinar su relación con los sistemas productivos, con el fin mitigar impactos ambientales al mejorar condiciones productivas a cambio de la degradación generada por su gestión inadecuada.

La presencia de carbono orgánico en el suelo es fundamental para la actividad biológica que se desarrolla en él, debido a que proporciona compuestos orgánicos de bajo peso molecular como los hidratos de carbono para brindar energía a los organismos, los cuales, descomponen residuos orgánicos mediante su participación activa en los ciclos Biogeoquímicos de varios elementos requeridos por las plantas para su nutrición y desarrollo, además de participar directamente en la estabilización de la estructura y mantenimiento de la porosidad del suelo (Martinez, Fuentes, & Acevedo, 2008). El mejoramiento de la actividad microbiológica en el suelo, provee propiedades que derivan en el mejoramiento de su fertilidad natural, lo que le brinda la capacidad de mantener coberturas constantes para producción de biomasa, acumulación de materia orgánica, promoviendo el reciclaje de nutrientes.

El aumento de la materia orgánica en el suelo, además de mejorar su estructura, evita procesos de desertificación generados por la erosión hídrica y eólica, promueve la retención de agua, y fomenta el aumento de la cobertura superficial aportada por las plantas, previniendo la erosión e incrementando la conservación del agua. El aumento de los niveles de materia orgánica en el suelo, genera un aumento en la capacidad amortiguadora y en su resiliencia frente a procesos de degradación o estrés (FAO, 2002).

Existen diversas prácticas y alternativas que aplicadas en el manejo de los suelos, pueden promover el aumento en los contenidos de materia orgánica, e incidir en el incremento de la productividad, el incremento de biomasa, y el mejoramiento de la fertilidad e irrigación. El aumento de la Materia orgánica en el suelo está asociada principalmente a la agricultura de conservación y sus prácticas asociadas tales como la labranza mínima y el uso continuo de la cobertura vegetal protectora, que garantice la producción y acumulación de residuos (Zambrano, Franquis, & Infante, 2004). Las prácticas agrícolas implementadas en los sistemas productivos, inciden directamente en el desarrollo de los procesos, ya que determinan los impactos en los que se

incurren al momento de intervenir los recursos naturales asociados. Del tipo de prácticas y mecanismos que se utilicen para desarrollar las etapas del proceso productivo, dependen la sostenibilidad de los agrosistemas y la preservación y conservación del capital natural.

Las emisiones realizadas por parte de la agricultura en comparación con el total de las emisiones netas generadas por el sector AFOLU (Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra) se mantuvieron constantes con un 62% entre el 1990- 2010. Sin embargo el porcentaje de emisiones del sector agrícola frente a otros sectores, aumentó un 44% durante los años Noventa, y alcanzó un 50% en la década de los 2000. Para el periodo 2001-2010, la agricultura fue la mayor fuente de emisiones con un 50%, seguido de la conversión de bosques con un 38%. La forestación y gestión de bosques constituyeron una compensación del 20% en las emisiones totales generadas por AFOLU, y apoyaron en cuanto a las absorciones realizadas por sumideros y otros usos de la tierra en un 100% (FAO, 2014). El mantenimiento de las coberturas y la búsqueda de sistemas productivos que incluyan este aspecto en su implementación, permitirán que la agricultura pueda cumplir con funciones de sumidero de carbono, que promuevan la reducción en la participación de este sector en las emisiones globales y permita apoyar los esfuerzos dados frente a procesos de adaptación al cambio climático y disminución en la vulnerabilidad de las poblaciones.

Para el caso Colombiano, Según datos de IDEAM (2012), la participación de la Agricultura, silvicultura y demás usos del suelo en la generación de GEI, es del 43%, de los cuales el 11.1% está relacionado directamente con tierras de cultivo donde se realizan procesos de ampliación de fronteras agropecuarias a cambio de bosques o permanencia de cultivos ya establecidos, de los cuales, un gran porcentaje se encuentran manejados bajo modelos de producción convencional.

La problemática actual de las emisiones de gases de efecto invernadero que agravan cada vez más las consecuencias del cambio climático, requieren de esfuerzos de todos los sectores productivos, en especial del sector Agrícola, a partir de reducir las emisiones generadas por éste y la preservación de los recursos naturales. A partir del aumento en la fijación y captura de carbono en este sector en conjunto con la implementación de prácticas agrícolas adecuadas, permitirán que una de las principales actividades humanas, encargada de nuestra seguridad alimentaria, vaya de la mano con los procesos mitigación de impacto ambiental, mejoramiento de condiciones productivas y económicas, y el aumento en la calidad de vida de la población asociada.

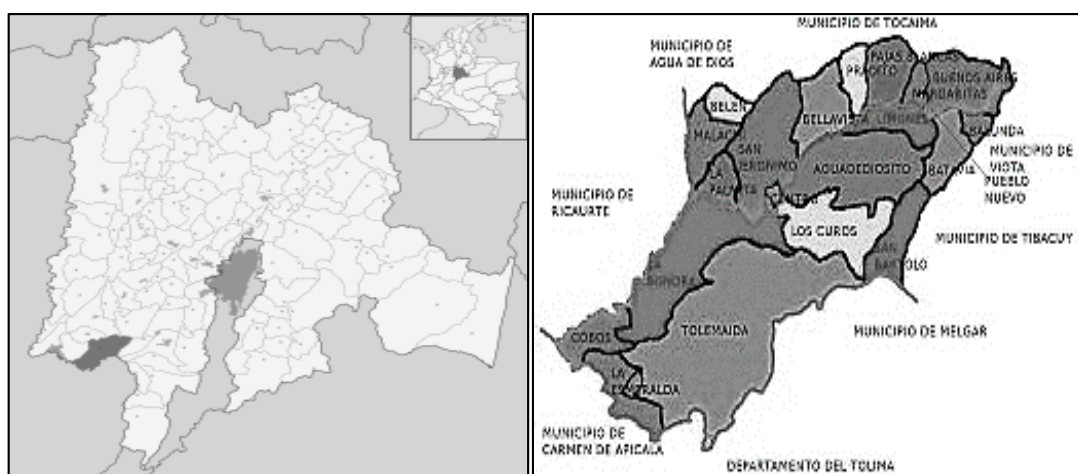
Materiales y métodos

Unidades productivas y población.

Para la determinación de las unidades de muestra, definidas como predios o unidades productivas, se realizaron visitas técnicas de campo donde se visitaron 12 predios ubicados en las veredas Margaritas, Bellavista, Pajas Blancas, Agua de diosito, Potrerito, Malachí, Los Curos, Belén y Limones del Municipio de Nilo, Departamento de Cundinamarca. Los cuales inicialmente fueron identificados y referenciados tanto por los técnicos de la secretaria de Agricultura Municipal, como por la junta directiva de la Asociación que los Agremia llamada PROASOAGRO. En estas visitas se realizó una revisión general al área productiva e infraestructura asociada, donde se verificó la existencia de criterios que definen los modelos productivos objetos del estudio, incluyendo, presencia de cultivo de cacao, Área establecida, presencia de sombrío, prácticas asociadas, especies vegetales asociadas, presencia de materia orgánica superficial, y conocimientos generales del sistema productivo.

Una vez desarrolladas las visitas, se realizó un filtro que determinó la selección de siete (7) predios que contaban con las condiciones específicas del estudio como se muestra en Tabla 1, dentro de las cuales, tres (3) corresponden al modelo de producción de cacao con sombrío asociado (CC), tres (3) a modelo de producción de cacao a libre exposición o convencional (SC), y una (1) área de protección de más de 20 años sin intervención (CT).

Imagen 1. Mapa Ubicación Departamento Cundinamarca y Municipio de Nilo



Fuente: www.nilo-cundinamarca.gov.co, 2018

Las unidades productivas de la muestra se caracterizan por tener un área total entre 1 y 3 Hectáreas en producción, donde más del 60% está dedicado al cultivo de cacao ya sea como monocultivo o Sistemas asociados, correspondiente al promedio que está destinado para el desarrollo del cultivo en los demás predios del municipio, el cual cuenta con cerca de 784 agricultores, de los cuales 480 son productores de grano, que constituyen las 326 Hectáreas contabilizadas al año 2017, el cual ha tenido un crecimiento progresivo y continua en aumento. Actualmente el municipio cuenta con 22 veredas, de las cuales el cultivo de cacao se desarrolla en 11 de ellas, determinando la vocación que tiene el municipio para el desarrollo de este producto.

Tabla 1.
Información técnica de Unidades de Muestra.

Unidad productiva	Vereda	Código.	Altura (msnm)	Georeferenciación
CANTACLARO	Margaritas	A	855	N4° 21.147' W74° 32.616'
EL RECUERDO	San Jerónimo	B	696	N4° 20.572' W74° 37.376'
BOYACA	Bellavista	C	455	N4° 20.010' W74° 35.690'
SAN JOSE	Agua de diosito	D	572	N4° 18.867' W74° 34.798'
BOSQUE	Agua de Diosito.	E	871	N4° 19.330' W74° 33.354'
SAN LUIS	Agua de diosito	F	947	N4° 19.287' W74° 33.168'
EL CONVENIO	Los Curos	G	785	N4° 18.378' W74° 33.816'

Fuente: El autor, 2018.

Los predios intervenidos corresponden a agricultores rurales que basan su economía en el cultivo del cacao principalmente, en asocio con plátano, Guanábana, aguacate y cítricos. Las densidades de siembra varían entre 850 y 1000 Plantas ha⁻¹, en marcos de plantación de 3 x 3 m y 3,5 x 3,5 m, manejando material vegetal tipo híbrido en 30% y clones en un 70%, dentro de los que sobresalen los ICS 65, ICS 90, TSH 565, IMC 67, EET 8, CCN 51 y SCC 61.

Las unidades de muestra poseen características típicas de Bs-T donde Según IAVH (1998), El bosque seco tropical se caracteriza por tener condiciones de temperaturas superiores al 24°C, alturas entre 0-1000 msnm, y una

precipitación entre los 700 – 2000 mm año⁻¹, estas condiciones son las que determinan el área de estudio, ya que cuentan con estas características en las zonas comprendidas para producción de cacao y zonas más bajas, las cuales se encuentran destinadas para el desarrollo de la ganadería y cultivos como cítricos y mango bajo prácticas convencionales.

Análisis de muestras.

En cada una de las 7 unidades productivas seleccionadas, se determinó un área de una hectárea en las que se tomaron 5 muestras de tipo disturbado, compuestas de 5 submuestras cada una, ubicadas en un eje de aproximadamente 2 metros del punto central, estas muestras se tomaron con barreno tipo holandés a dos profundidades (0-20 cm) y (20-40 cm) y cada punto muestreado fue georeferenciado con GPS submétrico; una pequeña porción de cada submuestra se tomó y homogenizó para obtener una muestra general de cada área estudiada. A su vez usándose anillos de acero una muestra de tipo no disturbada fue tomada a cada una de las profundidades y en cada uno de los sitios donde se tomó cada submuestra disturbada, el muestreo se realizó de acuerdo a las recomendaciones del manual de análisis químico de suelos, plantas y fertilizantes (EMBRAPA, 2009).

Las dos profundidades determinadas (0-20 cm y 20–40 cm) fueron definidas debido a las características del suelo, ya que por ser suelos jóvenes no existe diferenciación significativa entre los horizontes, además, se pretende estudiar el carbono orgánico, el cual principalmente se encuentra en los niveles superiores del perfil, y susceptible a las prácticas de manejo que se puedan realizar, influyendo de forma negativa o positiva en los procesos de oxidación (perdida).

A las muestras generales les fue determinado los siguientes parámetros físicos y químicos: Textura (Bouyoucos), pH en agua (relación 1:1, método potenciométrico), M.O. (Walkley y Black), P (Bray II), Al (KCl 1N), Ca, Mg, K, (acetato de amonio 1N- pH 7), B (HCl 0.05M en frío), Cu, Fe, Mn, Zn, (DTPA) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006).

Cada submuestra disturbada fue analizada usando el método de Walkley y Black para determinar el contenido de carbono orgánico oxidable y el método del cilindro para determinar la densidad aparente del suelo (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006). Con esta información se procedió a realizar el cálculo del contenido de carbono orgánico mediante la fórmula (**C.O.S = C.O * D.a. * Pm.**), Donde **COS** corresponde a carbono orgánico de suelos (Ton C ha⁻¹), **C.O**, es la concentración de carbono en suelos (%), **D.a.** es la densidad aparente del suelo (g cm⁻³) y Pm es la profundidad del suelo (cm) (Alvarado, Hernán, & Segura, 2013).

Análisis estadístico

Con los resultados de los análisis de suelos densidad aparente, carbono orgánico oxidable y stock de carbono orgánico en el suelo en las 2 profundidades evaluadas, se realizó la búsqueda de datos atípicos usando la técnica del box-plot. Después se procedió a realizar análisis de varianza ANAVA en arreglo factorial 7x2 (Sistemas de manejo x profundidades) usándose como prueba de significancia los estadígrafos de Tukey (profundidades) y de Scott-Knott (sistemas productivos) al 1% de significancia, usándose el paquete estadístico SISVAR 5.6 (Ferreira, 2011).

Modelo matemático del Diseño Estadístico:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + u_{ij}$$

y_{ij} = Representa la observación correspondiente al nivel (i) del factor A (profundidades) y al nivel (j) del factor (sistemas de manejo) B.

μ : Efecto constante denominado media global de los contenidos de carbono orgánico del suelo

τ_i : Efecto producido por el nivel i-ésimo del factor A (profundidades) A, ($\sum_i T_i = 0$)

β_j : Efecto producido por el nivel j-ésimo del factor B (sistemas del manejo) B, ($\sum_i \beta_i = 0$)

$(\tau \beta)_{ij}$: Efecto producido por la interacción entre AxB ($\sum_i (T\beta)_{ij} = \sum_j (T\beta)_{ij}$)

U_{ij} : u_{ij} variaciones independientes con distribución $N(0, \sigma)$ (errores asociados al desarrollo del trabajo experimental)

Resultados y discusión.

Caracterización de suelos del área de estudio

Teniendo en cuenta todos los puntos referenciados en campo, el rango altitudinal de la muestra está entre 455 – 947 msnm y una temperatura entre 24-29 °C al momento de la toma de muestras. Lo cual permite inferir que concuerda con el rango altitudinal y temperaturas requeridas para el sistema productivo de cacao, lo que hace posible la comparación con su capacidad productiva y analizar los procesos que determinan la fijación de carbono.

Los suelos se caracterizan por ser de profundidad media, de texturas medias a fina, bien drenados, con fertilidad moderada a alta, fuertemente ácidos,

presentando como limitación en ciertas áreas, las pendientes y deficiencias de precipitación en algunos semestres del año. Tienen la capacidad de mantener cultivos anuales y perennes de subsistencia y es sometido generalmente ganadería convencional especialmente sin cobertura. (IGAC, 2000). En la tabla 2, se brindan características específicas del tipo de suelos existentes en el área de estudio que permiten reconocer aspectos específicos del mismo.

Estos suelos requieren la aplicación de enmiendas, realizar fertilización técnica, manejar pastoreo controlado, promover rotación de cultivos y/o manejo coberturas, y promover el uso de sistemas de riego. Además para un aprovechamiento sostenible del mismo se recomienda evitar las talas y quemas de bosque, promover cultivos en franjas amortiguadoras y diversificados, promover la revegetación inducida y mantener constantemente la cobertura vegetal. (IGAC, 2000)

Tabla 2.
Caracterización de suelos del área de estudio.

Unidad Productiva	Unidad Cartográfica.	Paisaje	Clima	Relieve	Litología	S%	Taxonomía
El Recuerdo	MWKdp	Montaña	Seco	Glacys coluvial	Depósitos clásticos hidrogravimétricos	12 a 25	Entic Haplustolls (60%), Typic ustarthents (40%) Typic
Boyacá	MWVd	Montaña	Cálido	Crestones	Rocas clásticas limo arcillosas	12 a 75	Dystrustepts (50%), Lithic Ustorthents (40%) Typic udorthents (50%), Lithic Hapludolls (20%), Humic Eutrudepts (20%)
San Luis	MQVf	Montaña	Medio húmedo	Crestones	Rocas clásticas limo arcillosas y químicas carbonatadas	25 a 75	Typic udorthents (50%), Lithic Hapludolls (20%), Humic Eutrudepts (20%)
Bosque	MQVf	Montaña	Medio húmedo	Crestones	Rocas clásticas limo arcillosas y químicas carbonatadas	25 a 75	Typic udorthents (50%), Lithic Hapludolls (20%), Humic Eutrudepts (20%)
Cantaclaro	MQBd	Montaña	Medio húmedo	Lomas	Clásticas limo arcillosas y conglomeráticas	12 a 25	Dystric Eutrudepts (60%), Humic eutrudepts (40%)
San Jose.	MWJc	Montaña	cálido - seco	Abanicos aluviales.	Hidrogravimétricos	3 a 12	Typic Calciustolls (60%), Entic

Fuente: (IGAC, 2000)

El clima se determina como cálido –seco, conformado por un relieve general compuesto por crestones y abanico aluvial principalmente. Taxonómicamente se definen como suelos nuevos de los órdenes Entisoles – Mollisoles (Tabla 2). Los cuales son suelos con poca o ninguna evolución genética, y sus horizontes no presentan horizontes diagnósticos. En Cundinamarca estos suelos hacen su aparición en varios climas y paisajes, y su escaso desarrollo genético se podría deber a que se encuentran en áreas donde se depositan constantemente materiales, la alteración de materiales parentales es débil, o se encuentran en áreas inestables con degradación activa (IGAC, 2000).

El análisis físico químico del suelo de las unidades productivas muestran un pH que puede ser calificado en un rango que varía de muy fuertemente ácido a modernamente ácido (tabla 3), texturas franco arenosas (FA) a franco arcillosas (FAr), niveles de fósforo disponible, siendo muy altos para la unidad productiva El Recuerdo y muy bajos para las unidades San José y Convenio, sin embargo se destaca que los demás predios estudiados presentaron niveles considerados como altos (óptimos para el crecimiento y desarrollo de la mayoría de especies vegetales)

Tabla 3.
Caracterización física y química de las áreas estudiadas.

Unidad Productiva	Text.	%	mg Kg ⁻¹		Cmol _c Kg ⁻¹					mg Kg ⁻¹				
			MO	P	pH	Al	Ca	Mg	K	Na	Cu	Fe	Mn	Zn
El Recuerdo(B)	FAr	3.8	149.2	6.0	0.10	11.40	1.60	0.39	0.06	2.10	247.50	10.20	11.00	8.46
San Luis (F)	FAr	2.8	36.2	5.1	0.80	7.80	1.60	0.64	0.04	1.50	351.25	18.00	9.90	1.02
Boyacá (C)	FA	2.2	32.5	5.2	1.00	2.40	1.00	0.11	0.09	1.40	147.50	3.60	1.50	5.20
Cantaclaro (A)	FL	3.1	40.4	5.8	0.10	11.00	2.00	0.45	0.05	1.10	171.25	12.20	9.30	11.82
Bosque (E)	FAr	2.5	33.4	4.8	2.20	4.00	0.01	0.31	0.04	1.60	571.25	15.40	3.00	8.46
San José (D)	FA	1.8	6.1	4.9	1.20	2.60	0.10	0.10	0.19	2.00	372.50	2.60	2.00	7.36
Convenio (G)	FA	1.5	4.7	5.0	0.60	1.40	0.01	0.07	0.05	1.10	426.25	4.40	1.30	8.46

Fuente: El Autor, 2018.

Análisis de Resultados.

Para el procesamiento de la información, cada una de las unidades productivas fue identificada con letras, que permiten visualizar información propia y analizarla más fácilmente. A continuación se incluye tabla de las medias de COS (Carbono Oxidable en Suelo) obtenidas en cada uno de los tratamientos, y la denominación para cada unidad de muestra (Tabla 4).

Tabla 4.
Parámetros relacionados con el stock de carbono en las unidades productivas.

Profundidad								CV	R ²
Stock de carbono orgánico tC ha⁻¹									
Unidad productiva									
	B	A	F	E	C	G	D		
0-20	50.27aA	41.77aA	39.24aA	34.60bA	31.52bA	28.87bA	26.71bA	23.61	0.53
E.E*	+/- 4.27	+/- 4.27	+/- 4.27	+/- 4.93	+/- 4.27	+/- 4.27	+/- 4.27		
20-40	48.28aA	43.16aA	41.23aA	32.05bA	39.60aA	19.99bA	25.93bA	28.88	0.54
E.E	+/- 5.94	+/- 5.14	+/- 5.14	+/- 5.94	+/- 5.14	+/- 5.14	+/- 5.14		
0-40	49.27 a	42.36 a	40.23 a	33.33 b	35.56 b	24.43 b	26.32 b	25.27	0.49
E.E	+/- 3.21	+/- 3.43	+/- 3.21	+/- 3.70	+/- 3.21	+/- 3.21	+/- 3.21		
Densidad aparente del suelo G cm⁻³									
Unidad productiva									
	B	A	F	E	C	G	D		
0-20	1.14 aA	1.04 aA	1.34 bA	1.13 aA	1.44 bA	1.55 bA	1.46 bA	9.20	0.75
E.E	+/- 0.06	+/- 0.06	+/- 0.06	+/- 0.07	+/- 0.06	+/- 0.06	+/- 0.06		
20-40	1.21 aA	1.13 aA	1.41 bA	1.27 aA	1.45 bA	1.48 bA	1.51 bA	7.56	0.59
E.E	+/- 0.05	+/- 0.06	+/- 0.06	+/- 0.05	+/- 0.06	+/- 0.06	+/- 0.06		
Materia Orgánica del Suelo %									
Unidad productiva									
	B	A	F	E	C	G	D		
0-20	3.88 aA	3.50 aA	2.53 bA	2.67 bA	1.88 bA	1.60 bA	1.58 bA	26.95	0.68
E.E	+/- 0,34	+/- 0,34	+/- 0,34	+/- 0,39	+/- 0,34	+/- 0,34	+/- 0,34		
20-40	3.33 aB	3.00 aB	2.40 bA	2.00 bB	2.13 bB	1.23 bB	1.58 bA	27.84	0.64
E.E	+/- 0.31	+/- 0.36	+/- 0.31	+/- 0.36	+/- 0.31	+/- 0.31	+/- 0.31		

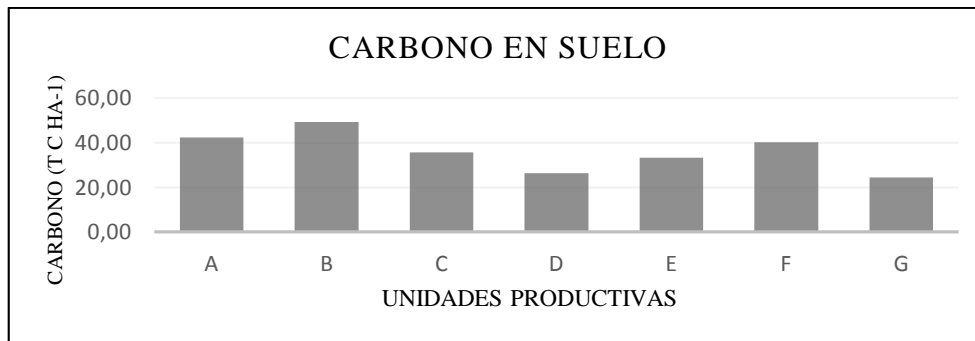
*E.E = Error estándar.

Promedios con una letra mayúscula común en las columnas no difieren estadísticamente por la prueba de Tukey a 0.05%, promedios con una letra minúscula común entre filas no difieren estadísticamente por el test de Skott-Knott a 0.05%. El Recuerdo (B)-CC, San Luis (F)-CC, Cantaclaro (A)-CC Boyacá (C) -SC, Bosque (E)-CT, San José (D)-SC, Convenio (G)-SC. (-CC: Con Cobertura), (-SC: Sin Cobertura) (-CT: Testigo).

Fuente: El autor, 2018.

Una vez analizados los datos se puede evidenciar, que el promedio de absorción de carbono en suelo de los tratamientos es de 35.92 tC ha^{-1} , lo que permite inferir que se presenta captura de carbono en los sistemas de producción de cacao bajo cualquier tratamiento, lográndose valores máximos de $50,27 \text{ tC ha}^{-1}$ en la unidad productiva B a profundidad de 0-20cm, correspondiente a sistema de producción con cobertura, y un nivel mínimo de 19.99 tC ha^{-1} para un sistema sin cobertura correspondiente en la unidad productiva G a profundidad de 20-40 cm, proveniente de área en conversión inicialmente en ganadería y luego en barbecho (ver Figura 1). Para tener una referencia de la capacidad de almacenamiento de SAF en cacao, Según Pocomucha, Alegre, & Abregú (2016), en la región de Huánuco, en Perú, el carbono almacenado en SAF de cacao, presentó resultados desde 71.93 tC ha^{-1} hasta los $216.31 \text{ tC ha}^{-1}$, logrando alcanzar un valor promedio total en los cacaotales de $131.18 \text{ tC ha}^{-1}$, donde 65.57 tC ha^{-1} corresponden al para el componente suelo.

Figura 1. Contenido medio de carbono orgánico en unidades productivas.



Fuente: El autor, 2018.

Como se puede evidenciar en la Tabla 4, los tratamientos que se encuentran bajo modelo de producción con cobertura (CC) A, B, y F con valores medios de $42,36$, $49,27$ y $40,23 \text{ tC ha}^{-1}$ respectivamente, tienen los mayores niveles de Carbono orgánico en suelo, lo que permite inferir que los sistemas de producción de cacao, bajo este modelo de producción, tienden a acumular y almacenar mayores niveles de Carbono en el suelo, a diferencia de los sistemas de producción convencional sin cobertura (SC) como lo son C, D y G con niveles medios de 35.56 , 26.32 y 24.43 tC ha^{-1} , respectivamente.

Para el caso de sistemas agroforestales en cacao realizados en Ecuador, se ha evidenciado que el contenido promedio de carbono total en el suelo, asociado con laurel (*Cordia alliodora*), fue de hasta $81,8 \text{ tC ha}^{-1}$, en comparación con los SAF en asocio con café y laurel que lograron valores máximos de $78,8 \text{ tC ha}^{-1}$ (Corral, Duicela, & Maza, 2006). Estos valores nos

brindan una idea de la capacidad que tienen los sistemas Agroforestales en general de capturar de carbono, y su papel relevante en procesos de mejoramiento de la calidad de los recursos naturales asociados a los agrosistemas y su potencial como alternativa para implementación en ecosistemas deteriorados y/o sensibles.

Estos valores pueden parecer bajos teniendo en cuenta la información brindada, Según Corral, Duicela, & Maza (2006), que arrojan datos sobre sistemas agroforestales con cacao, que tienen una capacidad de fijación de $196,7 \text{ tC ha}^{-1}$ a una edad de 6,5 años después de su establecimiento. Sin embargo, los sistemas Agroforestales Implementados en el estudio tienen un tiempo menor o igual al establecido por la investigación, sin ningún apoyo técnico en su proceso de establecimiento y provienen en su gran mayoría de suelos en recuperación o sistemas productivos convencionales que optaron por generar un cambio en sus prácticas, con enfoque de conservación de los recursos naturales y generando alternativas de desarrollo sostenible, al promover la captura de carbono como medida de mitigación de cambio climático.

Es importante analizar los datos provenientes de la unidad productiva E con cobertura en bosque (CT), con el fin de determinar la acumulación de carbono en suelos no gestionados, y donde no han sido aplicadas prácticas agrícolas por más de 20 años. Esta Unidad aunque obtuvo una media significativa con valores de captura de carbono de $33,33 \text{ tC ha}^{-1}$, no supera los valores generados por los sistemas con cobertura, debido a que la vegetación existente en esta Unidad, presentaba una mayor densidad poblacional que en la mayoría de los tratamientos, y por esto la materia orgánica allí generada se presentaba acumulada en forma de biomasa – residuos vegetales sobre la superficie del suelo-, pero ésta, no se está mineralizando e incorporando al suelo de forma adecuada, debido a la poca entrada de luz solar, a la homogeneidad del paisaje y al tipo de especies asociadas, que aunque son las que se referencian en la identificación de especies vegetales, se encuentran en una mayor cantidad por unidad de área y menor diversidad de especies . Esto permite determinar la importancia que tiene la entrada adecuada de luz solar en los procesos de mineralización de la materia orgánica, el asocio de especies vegetales, y la gestión que se realice del suelo.

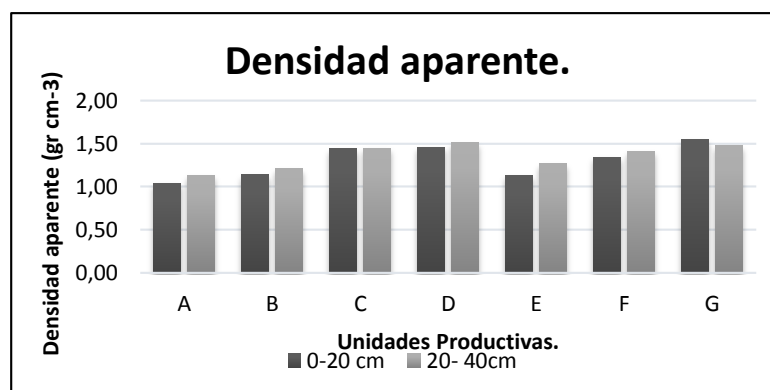
Sin embargo, esta acumulación de Materia orgánica en la superficie del suelo, no está desligada a la captura de carbono y a su relación directa con el suelo, Según Robert (2002), los residuos vegetales presentes en el suelo son considerados como una fase transitoria; los residuos superficiales de los cultivos y las coberturas presentes en multiestratos son partes importantes de los agrosistemas, ya que determinan la presencia de la materia orgánica disponible. Con esta disponibilidad de materia orgánica los suelos tienen la capacidad de capturar casi 20 Pg ha^{-1} de carbono en 25 años, casi el 10% de

las emisiones antropogénicas, lo cual, fuera de traer beneficios al suelo y a los cultivos, previene la erosión y desertificación, lo que es primordial para evitar emisiones CO₂ derivados de proceso agrícola.

Esto permite soportar la idea, que la producción y acumulación de materia orgánica por parte de los agrosistemas y/o bosques, si bien no se refleja numéricamente en la fijación del carbono por parte del suelo, si se constituye una fuente de carbono capturado, ya que, en la fase transitoria, ocurren procesos de mineralización y transformación que promueven el mejoramiento de las condiciones de calidad del suelo, que deriva en mayor producción de Biomasa, además de brindar oportunidades a organismos encargados en realizar adecuadamente el ciclo del carbono.

Se puede identificar que las densidades aparentes son generalmente mayores a medida que aumenta la profundidad, debido al peso del suelo, la influencia del material vegetal superficial y el material litológico que lo conforman, los cuales determinan la disminución de espacios vacíos del mismo, y por esto se afecta la dinámica del Carbono. Sin embargo, los perfiles de 20-40 cm aunque poseen mayores densidades aparentes, no significa que acumulen mayor cantidad de carbono, debido a la baja incidencia que tienen los residuos vegetales sobre ellos, manteniéndose los niveles de captura mayores en los niveles superiores, tal como se visualiza en la Figura 2. Esto permite reconocer, la importancia que tienen las prácticas agrícolas realizadas sobre el perfil superficial del suelo, ya que estas influyen en la acumulación de residuos vegetales y el desarrollo de la raíces de las plantas, mejorando las condiciones edáficas para acumulación de carbono a partir de biomasa e intercambio gaseoso.

Figura 2. Densidad aparente a profundidades (0-20 cm) y (20-40 cm)



Fuente: El autor, 2018

Con el fin de analizar los contenidos de carbono en las diferentes profundidades del perfil, se puede evidenciar que existe una mayor

acumulación de carbono en los primeros 20 cm de perfil, debido a su contacto directo con la materia orgánica y residuos vegetales. Sin embargo, la diferencia no es significativa entre los 2 perfiles, evidenciando que por la textura del suelo y la litología, son suelos jóvenes, con densidades aparentes similares donde no se determina una acumulación significativa en alguno de los 2 perfiles. Esto permite inferir que el suelo, con sus características específicas permite realizar captura de carbono más allá de los 40 cm, y no se limita a sus niveles de acumulación sobre el primer perfil.

Según Gama-Rodríguez et al. (2010) Sistemas agroforestales con cacao en el estado de Bahía, Brasil, tuvieron unos niveles altos de Carbono entre los 0 – 100 cm de suelo, similar a la obtenida en los bosques naturales. La distribución del carbono en el suelo en los diferentes perfiles, especialmente sobre los 30 cm, fueron uniformes en todos los sistemas estudiados con solo bosque, el segundo fue el sistema de cacao con bosque natural.

Otras investigaciones en la localidad de Caluma en Ecuador, muestran que sistemas agroforestales con Cacao tuvieron un contenido promedio de carbono en suelo de 92,8 tC ha⁻¹, donde el 99,3% se halló entre 0-30 centímetros del perfil, mientras que en la localidad llamada Pichilingue en Ecuador, el contenido promedio de carbono en el suelo fue de 55,4 tC ha⁻¹, 98,6% en el perfil de suelo 0-30 centímetros, el resto se encuentra representado en necromasa (Corral, Duicela, & Maza, 2006).

Esto resalta la importancia de la capa superficial del suelo en los procesos de captura de carbono y lo relevante del mejoramiento de las prácticas aplicadas sobre él, para que se obtengan beneficios tanto productivos como ambientales, donde se vean mejoradas tanto las condiciones de calidad del suelo, relacionadas directamente con la productividad y el desarrollo vegetativo que aumentan la biomasa, como en los procesos de adaptación al cambio climático, evitando la emisión de gases a partir de sistemas productivos sostenibles aplicando practicas adaptadas.

Influencia de Prácticas agrícolas

Siendo las prácticas agrícolas un factor determinante en el almacenamiento de carbono, se han podido identificar en campo algunas que influyen en los resultados del estudio, esta información fue tomada durante visitas realizadas en campo, información brindada por Secretaria de agricultura y medio ambiente, y contrastada con información técnica.

Según FAO (2002), ciertas prácticas agrícolas son conocidas por fomentar a la acumulación de carbono en el suelo, promover el mejoramiento de su fertilidad y generar efectos positivos sobre la productividad y el ambiente. Los aportes brindados por estas para el manejo del carbono, podrían

incrementarse a medida que se reconocen más detalles acerca de sus aplicaciones prácticas y beneficios a los agrosistemas.

Nutrición y enmiendas.

La aplicación de enmiendas promueve el aumento de los niveles de pH en los suelos, los cuales se encuentran entre 4.8 y 5.5, permitiendo que se liberen elementos nutricionales no disponibles, mejorando así el desarrollo vegetativo que fomenta a su vez la captura de carbono en biomasa. Podemos evidenciar que la calidad química del suelo, es fundamental para la captura de carbono ya que determina la liberación y movimiento de elementos químicos que son usados por las plantas como nutriente, promoviendo mejor desarrollo de biomasa y por ende, mayor acumulación de materia orgánica proveniente de residuos vegetales. Por lo cual, el uso de enmiendas tiende a favorecer procesos de captura de carbono, ya que permite el desarrollo vegetativo a partir de la química de suelos, aumentando la cantidad de residuos generados y por ende materia orgánica acumulable.

Según Zambrano, Franquis, & Infante (2004,) un plan de nutrición de suelos aumenta los niveles de rendimiento en producción, a su vez que afecta de forma positiva los niveles de carbono orgánico secuestrado. Sumado a esto, las aplicaciones de enmiendas de suelos con carbonato de calcio promueven el incremento de la biomasa aérea y edáfica, generando como resultado, el aumento de los niveles de carbono en suelos.

Un ejemplo de la importancia de las coberturas y el reciclaje de nutrientes para el sostenimiento de agrosistemas, proviene de que, para capturar una tonelada de carbono son necesarios cerca de 70 – 100 kg de nitrógeno. Conociendo los altos costos de los fertilizantes nitrogenados, y siendo estos determinantes en las emisiones de Óxido Nitroso, es recomendada la implementación de leguminosas en los arreglos para incrementar los niveles de este elemento. El nitrógeno a su vez incrementa la producción de biomasa, y por ende la generación de mayor cantidad de materia orgánica, favoreciendo la captura de carbono (Zambrano, Franquis, & Infante, 2004).

Cobertura y manejo de arvenses.

El control de Arvenses de forma manual es una práctica eficiente en sistemas productivos con cobertura superficial muerta, debido a efectos alelopáticos que se presentan y a la disminución en la entrada de luz solar que inhibe la germinación y desarrollo vegetal, ejerciendo así control cultural, reduciendo el uso de herbicidas. La presencia de coberturas y la implementación de abonos verdes pueden proporcionar grandes contribuciones al carbono del suelo según experiencias en América Latina, donde cerca de 45.000 productores que han implementado sistemas con *Mucuna* (*Mucuna pruriens*) han logrado

fijar casi 150 kg N ha⁻¹, añadiendo además entre 35-50 t ha⁻¹ de biomasa al suelo. Esto se ve representado en niveles significativos de captura de carbono (FAO, 2002).

Conclusiones.

Los sistemas de producción de cacao tienen una alta capacidad de capturar carbono en suelo a partir de la acumulación y mineralización de residuos vegetales provenientes de especies asociadas al cultivo, evidenciándose mayores niveles de captura en los modelos productivos establecidos bajo coberturas con valores de 50.27 tC ha⁻¹, ya que aumentan el aporte de materia orgánica al suelo, y por ende favorece el almacenamiento de carbono a través del perfil del suelo.

Las prácticas agrícolas tales como el uso de enmiendas al suelo para el manejo de pH y el uso de análisis de suelo para realizar procesos de nutrición eficiente, favorecen la producción de biomasa, a partir del mejoramiento de las condiciones edáficas para desarrollo vegetativo. Estas actividades promueven la modificación de propiedades físico-químicas del suelo, que favorecen la absorción de nutrientes, incrementan el crecimiento vegetal, la producción de materia orgánica y el desarrollo del ciclo de Carbono.

La densidad aparente es una propiedad fundamental para los procesos de captura de carbono, ya que esta determina los espacios porosos y la presencia de partículas de arcilla y Limo, que establecen el área de fijación y captura de Carbono. Con esto se puede evidenciar, que la acumulación de materia orgánica, no solo se relaciona con la captura de carbono, sino con el mejoramiento de las propiedades del suelo, las cuales promueven un aumento la tasa de fijación-absorción de Carbono. Además, El análisis y reconocimiento de las condiciones del suelo como el paisaje, clima, relieve, litología, taxonomía, pendiente y unidades cartográficas, son determinantes para los procesos de captura de carbono, ya que estas influyen en el comportamiento y tipo de material existente. No se debe desconocer que todos los suelos en general tienen la capacidad de fijar carbono, pero difieren en los niveles de captura debido a sus características específicas

Los ecosistemas tropicales poseen grandes capacidades de promover la captura de carbono y disminuir el cambio climático, ya que debido a sus características Biogeoclimáticas, permiten un mayor desarrollo de Biomasa que en conjunto con el suelo, son mecanismos asociados para captura de Carbono y producción de material vegetal. Estos se encuentran referenciados en el protocolo de Kioto y Mecanismo de desarrollo Limpio como alternativas para la disminución del cambio climático y el agotamiento de los recursos de producción, debido a su capacidad y nivel de degradación actual.

Bibliografía.

- Alcaldía Municipal de Nilo Cundinamarca. (22 de Septiembre de 2018). *www.nilo-cundinamarca.gov.co*. Obtenido de <http://www.nilo-cundinamarca.gov.co/tema/municipio>
- Altieri., M. A. (2001). *Agroecología: Principios y estrategias para diseñar una agricultura que conserva recursos naturales y asegura la soberanía alimentaria*. Berkeley: Universidad de California.
- Alvarado, J., Hernán, A., & Segura, M. (2013). Almacenamiento de Carbono Orgánico en suelos en sistemas de producción de Café en el municipio de Libano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal Vol. 16(1)*, 21-31.
- Avilés, V. V., Angeles, G., Etchevers, J., De los Santos, H., & Llanderal, T. (2009). Variación En Almacenes De Carbono En Suelos De Una Toposecuencia. *Agrociencia.*, 457-464.
- Corral, R., Duicela, L., & Maza, H. (2006). *Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábigo y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano*.
- Departamento Nacional de Estadística. (2014). *3er Censo Nacional Agropecuario, Decima entrega de resultados*. Bogotá D.C.: DANE.
- EMBRAPA. (2009). *Manual de análisis químicos de solos, plantas e fertilizantes* (Segunda ed.). Brasília DF, Brasil: Embrapa.
- FAO. (2002). *CAPTURA DE CARBONO EN LOS SUELOS PARA UN MEJOR MANEJO DE LA TIERRA*. Roma: FAO.
- FAO. (2014). *Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Emisiones por fuentes y absorciones por sumideros*. Roma.
- Ferreira, F. D. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciencia e Agrotecnologia (UFLA)*, 35(6), 1039-1042.
- Gama-Rodríguez, E., Nair, P., Nair, V., Gama-Rodríguez, A., V. B., & Machado, R. (2010). Carbon Storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental Management* 45., 274-283.
- IDEAM. (2015). *Inventario nacional de Gases de efecto invernadero (GEI) de Colombia 3ra comunicación*. Bogotá: IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELERIA.
- IGAC. (2000). *Estudio General de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Tomo 1, Cap. 3*. Bogotá. D.C: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC).

- IGAC. (2000). *Estudio general de suelos y Zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca. Tomo 2, Cap 5*. Bogotá D.C: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC).
- IGAC. (2000). *Estudio General de suelos y zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca. Tomo 3, Cap 6*. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC).
- Instituto Alejandro Von Humbolt. (1998). *Bosque seco tropical en Colombia*. Bogota: Programa de inventario de la biodiversidad - GEMA.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). *Métodos Analíticos de Laboratorio de Suelos* (Sexta ed.). Bogotá: Imprenta Nacional.
- Lal, R., Kimble, J., Follet, R., & Cole, C. (1998a). The Potencial of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate The Geenhouse Effect. *Ann Arbor Press.*, 128.
- Martinez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO. *Revista de la ciencias del suelo y nutrición vegetal.*, 68-96.
- Pocomucha, V., Alegre, J., & Abregú, L. (2016). Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* l.) en Huánuco. *Ecología Aplicada. Vol. 15.*, 107-114.
- Robert, M. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Roma, Italia.: FAO.
- Rojas, F., & Sacristan, E. (2013). *Guía Ambiental para el cultivo de Cacao*. Bogotá, D.C.: Ministerio de Agricultura; FEDECACAO.
- Salvo, L., & Bayer, C. (2014). Balance de Gases de Efecto Invernadero en suelos agrícolas de secano. *CANGÜÉ*, 1-14.
- Zambrano, A., Franquis, F., & Infante, A. (2004). Emisión y Captura de Carbono en los Suelos en Ecosistemas Forestales. *Revista Forestal 35.*, 11-20.