

**UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA**

**ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**Denominación del Título a obtener**

**INGENIERIO AMBIENTAL**

**TEMA:**

**SECUESTRO DE CARBONO COMO SERVICIO ECOSISTÉMICO EN DISTINTOS  
USOS DE LA TIERRA EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO NAPO, REGIÓN  
AMAZÓNICA ECUATORIANA**

Ney Gary Guallo Aguinda

**AUTOR**

PhD. Carlos Alfredo Bravo Medina

**DIRECTOR**

**PUYO-ECUADOR**

**2018**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS**

Declaro que soy el único autor de esta tesis de ingeniería y la pongo a disposición de la Universidad Estatal Amazónica, para hacer uso de la misma, en la que estime conveniente, dejando la absoluta privacidad del presente “Secuestro de carbono como servicio ecosistémico en distintos usos de la tierra en la cuenca media del río Napo, región Amazónica Ecuatoriana”.

Del contenido del presente trabajo se responsabiliza el autor.

Ney Gary Guallo Aguinda

## **CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Por medio del presente, Yo, Carlos Alfredo Bravo Medina, con número de cédula 1757015373, certifico que el egresado Ney Gary Guallo Aguinda realizó el proyecto de investigación y desarrollo titulado: “Secuestro de carbono como servicio ecosistémico en distintos usos de la tierra en la cuenca media del río Napo, región Amazónica Ecuatoriana”, previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental bajo mi supervisión.

PhD. Carlos Alfredo Bravo Medina  
**DIRECTOR DE LA TESIS**

**CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE  
PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO**

## **CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

Los miembros del tribunal de sustentación. Aprueban el informe final de la investigación sobre el Tema: Secuestro de carbono como servicio ecosistémico en distintos usos de la tierra en la cuenca media del río Napo, región Amazónica Ecuatoriana, de autoría del Sr. Ney Gary Guallo Aguinda egresado de la carrera de Ingeniería Ambiental.

Puyo, 12 de julio de 2018

Dr. Yudel García  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Ms. Sc Pedro Rios  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ms. Sc Paola Pozo  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

## **AGRADECIMIENTO**

Le doy gracias a mis padres, por todas las estimulaciones de crecimiento personal y profesional brindado en cada etapa de mi vida y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación.

A la Universidad Estatal Amazónica, por acogerme y brindarme una excelente educación, a los profesores que me acompañaron durante todo este tiempo de formación y no escatimaron sus conocimientos para transmitírmelos.

Al PhD. Carlos Alfredo Bravo Medina por su valiosa colaboración y asesoramiento en la dirección de la presente tesis, lo cual hizo posible la culminación del presente trabajo.

## **DEDICATORIA**

A mis amados padres: José Guallo Andi y Marlene Aguinda Andi, por el amor, esfuerzo y sacrificio inmensurable, quienes han logrado que hoy en día me consolide como tal; velando siempre por mi cuidado, bienestar y educación, siendo ellos mi principal motivación para cada paso y meta trazada, estoy muy orgulloso de ellos.

Esta tesis se la dedico a mi pareja Yesenia Grefa por haber estado en cada momento cuando he necesitado de sus consejos y motivaciones para seguir adelante y a mi amado hijo Dylan, que sea un claro ejemplo de perseverancia y meta cumplida. Pequeña familia son mi hogar y mis personas favoritas, con quien he reído y llorado, nunca dejen de soñar porque algún día sus sueños se harán realidad.

A mi hermano José Manuel Guallo e Isaí Guallo que de una u otra manera también me han ayudado.

A todos mis amigos quienes estuvieron a mi lado en los buenos y malos momentos, y a mis compañeros de aula con quienes compartimos alegrías y tristezas en el transcurso de nuestros estudios.

A mis profesores de la Carrera de Ingeniería Ambiental por haberme inculcado sus conocimientos como profesionales y poder ser un profesional de ética y moral para la sociedad.

A la Universidad Estatal Amazónica, por haberme abierto las puertas a sus instalaciones y al conocimiento en general, dado que para mí es un honor el haber formado parte de la familia ambiental.

## RESUMEN

Uno de los principales procesos de afectación a la biodiversidad es la transformación y conversión de ecosistemas naturales a usos de la tierra antrópicos por medio de la deforestación, cambiando el funcionamiento de dichos ecosistemas para brindar servicios al ambiente. El estudio tuvo como objetivo caracterizar el secuestro de carbono como servicio ecosistémico en tres usos de la tierra (sistema agroforestal, monocultivo, y un bosque secundario) ubicados en la cuenca media del río Napo, región Amazónica ecuatoriana. El bosque secundario presentó valores adecuados en base a los parámetros físicos, químicos y biológicos, en comparación al sistema agroforestal y monocultivo de cacao. La variable física densidad aparente ( $D_a$ ), se relaciona con 11 variables, siendo de vital importancia, en los procesos de retención de humedad, disponibilidad del agua y nutrientes. El potencial de carbono total almacenado en los diferentes usos de la tierra, presentó un mayor índice en el bosque secundario  $158,77 \text{ Mg ha}^{-1}$ , lo cual favorece a otros servicios ecosistémicos asociados a una alta presencia de materia orgánica. La retención de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, es directamente proporcional a la biomasa, presentando un mayor índice Bs: Bosque Secundario  $356,51 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  con respecto a los sistemas de cultivo. La valoración económica de la biomasa aérea fue de \$ 6960,16, en la cual se mitigan más de 464,01 toneladas métricas de  $\text{CO}_2$  equivalente  $/\text{ha}^{-1}$ . El servicio ecosistémico que brinda el bosque como la regulación del clima no puede ser menor al otorgado por un sistema de cultivo.

Palabras claves: Deforestación, Secuestro de Carbono, Servicio Ecosistémico, Uso de la tierra, Sistema Agroforestal.



## ABSTRACT

One of the main processes affecting biodiversity is the transformation and conversion of natural ecosystems to anthropogenic land uses through deforestation, changing the functioning of these ecosystems to provide services to the environment. The objective of the study was to characterize carbon sequestration as an ecosystem service in three land uses (agroforestry system, monoculture, and secondary forest) located in the middle basin of the Napo River, the Ecuadorian Amazon region. The secondary forest presented adequate values based on the physical, chemical and biological parameters, in comparison to the agroforestry system and monoculture of cocoa. The physical variable bulk density ( $D_b$ ), is related to 11 variables, being of vital importance, in the processes of moisture retention, availability of water and nutrients. The total carbon potential stored in the different land uses, presented a higher index in the secondary forest  $158.77 \text{ Mg ha}^{-1}$ , which favors other ecosystem services associated with a high presence of organic matter. The retention of  $\text{CO}_2$  to the atmosphere, is directly proportional to the biomass, presenting a higher index Bs: Secondary Forest  $356.51 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  with respect to farming systems. The economic value of the aerial biomass was \$ 6960.16, in which more than 464.01 metric tons of  $\text{CO}_2$  equivalent /  $\text{ha}^{-1}$  are mitigated. The ecosystem service provided by the forest as climate regulation can not be less than that provided by a farming system.

Key Words: Deforestation, Carbon Sequestration, Ecosistemic Service, Land Use, Agroforestry System.

## TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	I
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	III
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO.....	IV
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
DEDICATORIA.....	VII
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
TABLA DE CONTENIDO .....	X
INDICE DE TABLAS .....	XIII
INDICE DE FIGURAS .....	XIV
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCION.....	1
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO II.....	3
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
2.1 Uso de la tierra e impactos generados en el suelo .....	3
2.2 El secuestro de carbono .....	4
2.3 Captura de carbono como servicio ecosistémico .....	6
2.4 Valoración del secuestro de carbono como servicio ecosistémico .....	8
2.5 Potencial de secuestro de carbono de sistemas agroforestales.....	9

CAPÍTULO III. ....	12
MATERIALES Y METODOS.....	12
3.1 Localización.....	12
3.2 Tipo de investigación.....	12
3.3 Métodos de investigación .....	13
3.3.1 Evaluación del recurso suelo.....	13
3.3.2 Muestreo de suelo y análisis de laboratorio .....	14
3.4 Diseño de la investigación .....	16
3.5 Recursos humanos y materiales .....	16
CAPÍTULO IV. ....	18
RESULTADOS Y DISCUSION .....	18
4.1 Caracterización física, química y biológica de los usos de la tierra a nivel de subgrupos .....	18
4.2 Asociación entre variables físicas, químicas y biológicas, en los distintos usos de tierra. ....	28
4.3 Representación gráfica de las variables de mayor correlación .....	30
4.3.1 Carbono orgánico total y densidad aparente. ....	30
4.3.2 Porcentaje de nitrógeno total y densidad aparente. ....	30
4.3.3 Carbono orgánico total y % nitrógeno total. ....	31
4.3.4 Carbono orgánico total y porosidad total. ....	32
4.3.5 Carbono orgánico total y acidez intercambiable. ....	33
4.3.6 Respiración basal y carbono orgánico total.....	33
4.4 Secuestro de carbono bajo distintos usos de la tierra.....	34
4.5 Valoración del secuestro de carbono bajo distintos usos de la tierra.....	37
CAPITULO V. ....	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	40
5.1 Conclusiones .....	40

5. 2 Recomendaciones .....	41
CAPÍTULO VI .....	42
BIBLIOGRAFÍA .....	42

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.-</b> Caracterización física, química y biológica en los usos de tierra seleccionado..	19
<b>Tabla 2.-</b> Correlación entre variables físicas, químicas y biológicas. ....	29
<b>Tabla 3.-</b> Caracterización de variables para la cuantificación y valoración de carbono y calidad del suelo. ....	34
<b>Tabla 4.-</b> Carbono total almacenado y retención de CO <sub>2</sub> . ....	36
<b>Tabla 5.-</b> Valoración del secuestro de carbono e índices nutricionales, en base a tasas de mercado. ....	38
<b>Tabla 6.-</b> Valoración económica de la biomasa aérea. ....	39

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.-</b> Localización geográfica a los usos de la tierra seleccionados en el estudio.....	12
<b>Figura 2.-</b> Esquema de muestreo sistemático para el estudio de suelo, vegetación y biodiversidad en cada uso de tierra seleccionado.....	14
<b>Figura 3.-</b> Diferencias significativas del parámetro físico densidad aparente ( $D_a$ , $Mg\ m^{-3}$ ). .....	18
<b>Figura 4.-</b> Diferencias significativas del parámetro físico conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ , $cm\ h^{-1}$ ). .....	20
<b>Figura 5.-</b> Diferencias significativas del parámetro físico porosidad total ( $P_t$ , %). .....	21
<b>Figura 6.-</b> Diferencias significativas del parámetro físico porosidad de aireación ( $P_a$ , %). .....	21
<b>Figura 7.-</b> Diferencias significativas del parámetro físico porosidad de retención ( $P_r$ , %). .....	22
<b>Figura 8.-</b> Diferencias significativas del parámetro químico pH. ....	23
<b>Figura 9.-</b> Diferencias significativas del parámetro químico acidez intercambiable ( $Al^{+3} + H^{+1}$ , meq 100 mL). .....	24
<b>Figura 10.-</b> Diferencias significativas del parámetro químico aluminio intercambiable ( $Al^{+3}$ , meq 100 mL). .....	25
<b>Figura 11.-</b> Diferencias significativas del parámetro químico carbono orgánico total (COT, %). .....	25
<b>Figura 12.-</b> Diferencias significativas del parámetro biológico respiración edáfica (RE). .....	26
<b>Figura 13.-</b> Diferencias significativas del parámetro biológico respiración basal (RB). .....	27
<b>Figura 14.-</b> Diferencias significativas del parámetro biológico biomasa ( $Mg\ ha^{-1}$ ). .....	28
<b>Figura 15.-</b> Relación carbono orgánico total y densidad aparente $D_a$ ( $Mg\ m^{-3}$ ). .....	30
<b>Figura 16.-</b> Relación nitrógeno total ( $N_t$ , %) y densidad aparente $D_a$ ( $Mg\ m^{-3}$ ). .....	31
<b>Figura 17.-</b> Relación carbono orgánico total (COT, %) y nitrógeno total ( $N_t$ , %). .....	32
<b>Figura 18.-</b> Relación carbono orgánico total (COT, %) y porosidad total ( $P_t$ , %). .....	32
<b>Figura 19.-</b> Relación carbono orgánico total (COT, %) y acidez intercambiable ( $Al^{+3}+H^{+1}$ , meq 100 mL). .....	33
<b>Figura 20.-</b> Relación respiración basal (RB) y el carbono orgánico total (COT, %). .....	34

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

Uno de los problemas que se genera al ambiente es la deforestación, esta se relaciona con otras tales como la contaminación de la atmósfera, erosión, inundaciones y extinción de especies (Ruiz, 2011). En consecuencia cuando se talan los árboles, se pierde una serie de contribuciones que estos hacen al planeta, como aportar al ciclo del agua, servir de vivienda a muchas de las especies, capturar CO<sub>2</sub>, proteger la capa vegetal del suelo, asimismo del valor adherido de recrearse de un bello paisaje (García, 2016).

Esta problemática se debe en gran medida a actividades antropogénicas que se han dado en diferentes momentos de la historia, una de ellas la agricultura intensiva con la expansión de la frontera agrícola, con técnicas de monocultivo dejando de lado la rotación de cultivos que permite al suelo pedir y dar diferentes nutrientes (García, 2016). Uno de los principales procesos de afectación a la biodiversidad es la transformación y conversión de ecosistemas naturales a usos de la tierra antrópicos, cambiando el funcionamiento de dichos ecosistemas con cambios físicos, químicos y biológicos en el suelo (Peña *et al.*, 2015). En la Amazonía Ecuatoriana, extensas zonas de bosque de la cuenca del río Napo han sido convertidas en cultivos de naranjilla y palma africana, en pastizales para la ganadería en pequeña escala, o en fincas agrícolas, conllevando que las comunidades indígenas se desplacen o alteren sus sistemas tradicionales de extractivismo y manejo (MAE, 2013)

De acuerdo a MAE (2013), el proyecto Evaluación Nacional Forestal del Ministerio del Ambiente, el Ecuador tiene una tasa de deforestación de 70.000 hectáreas al año; una alta proporción de éstas para uso en actividades agropecuarias; y a nivel de subregión la Amazonía tiene una tasa de deforestación de 16.430 hectáreas al año.

El cambio climático y los bosques tienen una relación directamente proporcional, los cambios en la estructura de los bosques por degradación forestal y deforestación; causas de la creciente emisión de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero (Peña *et al.*, 2015), afectan el clima local y mundial, por cuanto éstos contribuyen en la regulación hídrica y captación de dióxido de carbono a través del proceso de fotosíntesis (Ministerio del Ambiente, 2012), mediante prácticas de manejo sostenibles se puede revertir la degradación, reduciendo el CO<sub>2</sub> de las emisiones a la atmósfera y suministrar una serie de beneficios no solo en la

mitigación del cambio climático, sino también en la desertificación, control de la erosión, la calidad del agua, la seguridad alimentaria y la fertilidad del suelo aumentando la absorción de agua en el suelo con medidas correctivas para el calentamiento global (Bravo *et al.*, 2016). Se estima que entre el 42 y 59% del C orgánico del suelo se pierde con la transformación del bosque en pastos o tierras de cultivo (Peña *et al.*, 2015); con el inicio de la eliminación de los árboles y la quema de la maleza para limpiar el terreno, se libera el carbono almacenado de la madera muerta y hojarasca; en forma de gas de efecto invernadero (GEI), generalmente como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (FAO, 2012), la liberación del contenido de carbono en cuanto a la biomasa aérea depende del uso que se de con la madera (Mogrovejo, 2017).

## **1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

El cambio de uso de la tierra de bosque a sistema agroforestal y monocultivo, impacta la biodiversidad y por tanto afectará negativamente la capacidad de secuestro de carbono como servicio ecosistémico para el ambiente.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

- ❖ Evaluar el secuestro de carbono como servicio ecosistémico bajo distintos usos de la tierra en la cuenca media del río Napo, región Amazónica ecuatoriana.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- ❖ Describir los diferentes usos de la tierra mediante parámetros físicos, químicos y biológicos.
- ❖ Caracterizar la captura de carbono en distintos componentes arbóreo, hojarasca, cultivo en los usos de tierra seleccionados.
- ❖ Determinar el potencial de carbono total almacenado como servicio ecosistémico de los diferentes usos de la tierra seleccionados como información base para la valoración y mitigación del cambio climático.



## CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1 Uso de la tierra e impactos generados en el suelo

El uso de la tierra, es el uso que realizan los seres humanos. De acuerdo a la FAO define como "*los procesos de gestión del suelo (actividades), realizadas por los seres humanos que se efectúan sobre un determinado tipo de área para producir (productos y beneficios), modificarla o mantenerla*" (FAO, 1997; FAO/UNEP, 1999). El bosque se encuentra dispuesto a una fuerte presión por causa de la progresiva demanda de productos y servicios agrarios, lo cual produce la degradación y conversión de la estructura de bosques a formas insostenibles de uso de la tierra (Bravo *et al.*, 2017).

La mayor presión que se da en los suelos es por el esparcimiento de la frontera agrícola, deforestación y degradación forestal; "*la degradación es un proceso que baja el contenido existente y potencial del suelo (nutrientes) para producir, cuali y cualitativamente, bienes y servicios*" (Brissio, 2005), expansión y actividad urbana, la extensión de las plantaciones agroindustriales, actividad minera y petrolera; el uso incorrecto de tierras agrícolas, prácticas de gestión deficientes de suelos y aguas, uso habitual de maquinaria pesada, pastoreo excesivo, rotación inadecuada de cultivos y prácticas de irrigación deficientes (PNUMA, 2002), lo cual incide en la problemática del cambio de usos de la tierra (GeoEcuador, 2008). En este contexto, la fragmentación de los bosques ocasionada por las acciones del hombre trae consigo variaciones en la condición del ambiente, pérdida en el número y composición de genotipos, alteraciones en las interacciones biológicas, especies, tipos funcionales y unidades de paisaje (Alonso *et al.*, 2017).

Dentro del suelo, las moléculas orgánicas son altamente sensibles a la degradación, afectando la capacidad natural de fijar y almacenar C. Por lo tanto, la degradación del suelo disminuye los contenidos de carbono orgánico del suelo y aumenta el CO<sub>2</sub> y otras emisiones de gases de efecto invernadero (Peña *et al.*, 2015).

En Ecuador las categorías de utilización del suelo en el sector rural son: barbecho, pastos naturales, cultivados, cultivos transitorios, permanentes, descanso, páramos, bosques, montes, y otros usos (INEC, 2013). Del total de áreas que pasaron de bosque a no-bosque durante el período 2008 (bosque) -2014 (no bosque), el 65% pastizal, el 12% mosaicos agropecuarios, 4% cacao, 3% palma africana, 3% maíz duro, 2% café y más de 10% en otros

características de cobertura (Ministerio de Ambiente, 2016). En la Amazonía se han venido experimentando altas tasas de deforestación en los últimos años y el cambio de usos de la tierra (Bravo *et al.*, 2017), con la constante afectación sobre la biodiversidad flora y fauna, el suelo, agua y la disminución o pérdida de los ecosistemas de ofrecer sus servicios ecosistémicos (Vargas *et al.*, 2014).

Las condiciones de clima extremadamente lluvioso, hace que los suelos sean susceptibles al lavado de nutrientes, expondrían la poca aptitud de la región Amazónica para actividades agropecuarias tradicionales, pero si para sistemas productivos similares al bosque o para procedimientos de conservación, estos suelos están bien drenados con alta retención de humedad y materia orgánica, pH generalmente ácido y fertilidad variable (Bravo *et al.*, 2015). A pesar de cientos de estudios de campo y al menos una docena de revisiones bibliográficas, todavía hay un considerable desacuerdo sobre la dirección y la magnitud de cambios en las existencias de C en el suelo con el cambio en el uso de la tierra (Bravo *et al.*, 2017).

El Cantón Carlos Julio Arosemena Tola, posee una superficie de 502 Km<sup>2</sup>, representa el 4% de la superficie total de la Provincia de Napo, siendo de 12.541 Km<sup>2</sup>. De la superficie total del Cantón, el 1.25% lo conforman sus ríos (6,27 Km<sup>2</sup>), el 5.35% pastizales (26,9 km<sup>2</sup>), el 3.86% cultivos (19.38 km<sup>2</sup>), el 12.03% bosques intervenidos (60,9 km<sup>2</sup>), incluye sus zonas urbanas ya que parte de estos territorios se encuentran dentro de estas zonas, y el 77,51% (389,1 km<sup>2</sup>) es bosque natural y reservas protegidas (PDYOT, 2014).

## **2.2 El secuestro de carbono**

El secuestro de carbono o captura de carbono en el suelo, es la separación del carbono de la atmósfera por medio del proceso de la fotosíntesis de las plantas y su acumulación en piscinas de larga duración de carbono con formas estables de C orgánico e inorgánico y materia orgánica, como raíces y microorganismos de larga vida en el suelo (Etcheverría *et al.*, 2017).

Uno de los métodos más comunes que se aplica para determinar carbono en el suelo es el método de Walkley y Black, aunque este método tiene algunas limitaciones, es altamente recomendado cuando se requiere conocer el contenido total de carbono (COT) (Andrade *et al.*, 2003), a diferentes profundidades, y transformar los datos tomando en consideración la densidad aparente (Da) y la pedregosidad del suelo. Las estadísticas se deducen sobre

desiguales muestras para establecer las existencias de carbono. Estos resultados pueden ser mencionados en kg/cm<sup>2</sup>, t/ha o Gt totales sobre superficies específicas y a diferentes rangos de profundidad (FAO, 2002).

La importancia de la apreciación de la biomasa forestal y del carbono acumulado; sea a causa de la reforestación o la deforestación están considerados en el artículo 3.3 y 3.4 del Protocolo de Kyoto. En el artículo 3.4 se considera las convenientes interacciones con la captura de carbono en los suelos (FAO, 2002), este se ha aumentado en los últimos años como resultado de la Convención sobre Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto (Gómez *et al.*, 2015). Las interacciones entre el carbono de la atmósfera y el carbono orgánico terrestre son importantes y pueden ser tanto positivos bajo la forma de secuestro o negativos como emisiones de CO<sub>2</sub> (Peña *et al.*, 2015). Los bosques contienen más carbono por unidad de área en consideración con otro uso de la tierra y sus suelos contienen cerca del 40% del total del carbono acumulado en la vegetación, y un 39% de todo el carbono almacenado en el suelo, con incrementos de  $0,62 \pm 0,37 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , son de jerarquía principal cuando se reflexiona sobre el manejo de los bosques, lo que determina que estos sean los depósitos terrestres más significativos de carbono del planeta (Callo *et al.*, 2001; CIFOR, 2013). Los bosques naturales juegan un papel importante como almacenes a largo plazo de carbono (Gómez *et al.*, 2015). Las principales alternativas para tener un incremento de la materia orgánica a nivel de suelo está asociado a la agricultura de conservación, labranza mínima y el uso de una cubierta vegetal continua y protectora constituida por materiales vegetales vivos o muertos sobre la superficie del suelo (FAO, 2002).

Los bosques de todo el mundo absorben el 40% de las emisiones globales de dióxido de carbono liberado por la combustión de combustibles fósiles, es decir 2,4 millones de toneladas de dióxido de carbono al año (CIFOR, 2013). Al desaparecer la deforestación y sucediera cambios en las técnicas agrícolas y forestales, favorece al contenido de absorción potencial el cual llegaría a cubrir como máximo un 25% de las disminuciones requeridas de CO<sub>2</sub> para el año 2050 (Granda, 2005). Su secuestro e incorporación, es un factor clave para la mitigación del calentamiento global, los mecanismos más observados es el intercambio gaseoso de las plantas y alternativas de uso de la tierra como sumideros potenciales (Callo *et al.*, 2001).

De acuerdo a la FAO, el carbono capturado en superficie de los trópicos equivale entre 60 – 230 t C/ha<sup>-1</sup> en bosque primarios; y entre 25 – 190 t C/ha<sup>-1</sup> en bosques secundarios. Se estima

el secuestro de 3,67 kg de CO<sub>2</sub>, en relación de cada kilogramo de carbono acopiado en la biomasa arbórea (Gómez *et al.*, 2015). Para los contiguos 25 años, valorar el potencial de secuestro de carbono en suelos bajo distintos usos de la tierra (escenarios) será necesario diferenciar dos aspectos: cuál es la presencia original de carbono en el suelo y cuáles son los cambios en los almacenamientos de carbono (Batjes, 1999).

### **2.3 Captura de carbono como servicio ecosistémico**

De acuerdo a Thrush & Dayton (2010), definen al servicio ecosistémico (ES) como “*Las funciones físicas, químicas y biológicas, entre los ecosistemas que mantienen la vida y el bienestar del ser humano*”, y “*Las situaciones y los procesos mediante los cuales los ecosistemas naturales, y las especies que los conforman, sostienen y satisfacen la vida humana*”.

La Amazonía ecuatoriana representa el 45% de la extensión del Ecuador y constituye una de las mayores reservas ecológicas para la humanidad, debido fundamentalmente a su riqueza biológica y endemismo, asimismo por su potencial de suministrar servicios ecosistémicos necesarios para mantener a las poblaciones específicas (Torres *et al.*, 2014). Con el fin de ayudar a pronosticar la función del carbono orgánico en el suelo como sumidero, bajo diferentes escenarios de cambio de uso de la tierra, se requiere establecer los mecanismos de estabilización de carbono en el suelo (López, 2016).

En base a las funciones del suelo, los suelos aportan servicios ecosistémicos que permiten la vida en la tierra tales como suministrar de alimentos fibras y combustibles, retención del carbono, purificación del agua y reducción de contaminantes del suelo, regulación del clima, ciclo de nutrientes, habitat para organismos, regulación de inundaciones, fuente de productos farmacéuticos y recursos genéticos, base para las infraestructuras humanas, suministro de materiales de construcción, y dar herencia cultural (FAO, 2015).

Los servicios ecosistémicos se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: soporte tales como la producción vegetal y el ciclo de nutrientes, regulación, considerando el papel que desempeñan los ecosistemas en la regulación de los procesos ecológicos (por ejemplo. regulación del agua y el clima), aprovisionamiento (o servicios de provisión), en referencia a los productos que pueden ser cosechados como comida, madera, forraje, provisión de agua y culturales, los cuales suponen los beneficios no materiales proporcionados por los

ecosistemas (por ejemplo, actividades recreacionales, valores espirituales y culturales) (MEA, 2005).

Sin embargo, el funcionamiento de agroecosistemas depende fuertemente de un conjunto de servicios ecosistémicos proporcionados por los recursos naturales de ecosistemas intactos, en cuanto al carbono el secuestro se clasifica como un servicio regulador debido al efecto que tiene en la regulación del clima a través de emisiones de gases de efecto invernadero (Bravo *et al.*, 2017). También contribuye en los procesos ecológicos esenciales a través de ciclos biogeoquímicos y otros procesos biológicos, a su vez en el mantenimiento de aire limpio, y mantenimiento de tierra cultivable (Camacho *et al.*, 2012).

El secuestro de carbono provee servicios ecosistémicos adicionales a la agricultura, al conservar el suelo estructura y fertilidad, optimizando la calidad del suelo aumentando la eficiencia de uso de insumos agronómicos, y mejorar la calidad del agua por filtración y desnaturalización de contaminantes (Ibrahim *et al.*, 2006). Por lo tanto, la identificación de sistemas de gestión o usos de la tierra para la captura de carbono y la mejora del suelo pueden restaurar la funcionalidad y la productividad del recurso del suelo (Bravo *et al.*, 2016).

Según López (2016), el carbono orgánico del suelo es un medida que favorece a la retención del agua en el suelo, conserva la fertilidad, reduce los procesos de erosión, evita la emisión de gases efecto invernadero, por consiguiente es un depósito de carbono que ayuda en la regulación del clima. En este sentido, los ecosistemas forestales juegan un papel crucial en la regulación del clima a través del ciclo biogeoquímico del carbono, con la captación del dióxido de carbono de la atmósfera por intermedio de la fotosíntesis y lo establecen en las hojas, las raíces, los tejidos leñosos y la materia orgánica del suelo (CIFOR, 2013). Las plantas obtienen el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico por difusión a través de minúsculos aberturas de las hojas distinguidos como estomas, y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis (Jaramillo, 2007)

El uso de la tierra interviene directamente en la prestación de servicios de los ecosistemas del suelo, como por ejemplo, regulación del clima, la producción de alimentos y madera, la biodiversidad y el ciclo de nutrientes (López, 2016).

## 2.4 Valoración del secuestro de carbono como servicio ecosistémico

El desconocimiento del beneficio ambiental y los costos económicos de la degradación de los recursos naturales, puede resultar una de los importantes orígenes de la creciente sobrexplotación y deterioro de los ecosistemas (Miranda *et al.*, 2007). Dicho ecosistema es el sustento de las actividades económicas, ya que suministran materias primas para los procesos lucrativos (González *et al.*, 2013). Uno de los temas que está en discusión es la valoración a los servicios ecosistémicos (Iwan *et al.*, 2017).

Los servicios relacionados por un ecosistema deben ser reconocidos, clasificados, y luego valorados económicamente. Aquella valoración constantemente se basa en valores antropocéntricos, es decir, el valor de los humanos. Estos valores se dividen en dos condiciones: uso y no uso. En cuanto a los valores de uso se dividen en tres categorías: opción, directo e indirecto. Para la captura de carbono, se aplica a los valores de uso indirecto, los cuales encierran valores afines a servicios de regulación como la mitigación de inundaciones o control de plagas y enfermedades (Jónsson *et al.*, 2016). Al valorar los ES se logra contribuir con la toma de medidas sobre diferentes aspectos como son el ordenamiento territorial, evaluaciones ambientales necesarias, compensaciones por carbono y pago por servicios ambientales (Pacha, 2014).

Los beneficios proporcionados por el ecosistema natural como los bienes y servicios no se incluye al proceso político para la toma de decisiones en cuanto al manejo de recursos naturales, por motivo de la falta de juicio a los valores que están correlacionados con el bienestar humano (Rodríguez *et al.*, 2016). De esta forma, la valoración económica del servicio ambiental de captura de carbono facilita una mejor toma de decisiones en cuanto a cambio de uso de la tierra y sus consecuencias (López, 2016). Estas decisiones convendría basarse en dos aspectos primordiales, considerando las diferentes categorías de los ES (1) el valor comerciable “valor de uso” y no-comerciable “valor de no uso” a los bienes y servicios de los ecosistemas, (2) y la distribución espacial de estos valores (Rodríguez *et al.*, 2016).

Los economistas eligen entre varias herramientas de valoración que tienen en su disposición para colocar un valor monetario estimado sobre los servicios identificados, y esto se ha hecho para varios ES de suelo. El método basado en los costos es el más apropiado donde se valora los servicios de soporte y regulación, debido a que son los costos de evitar daños o la sustitución de los ecosistemas, el costo incurrido debido a daños a los ES, o el costo de reemplazar ES por proporcionar servicios sustitutos (Jónsson *et al.*, 2016). El pago por

Servicios Ecosistémicos (PSA), considerado como un incentivo productivo que comienza por una depreciación más equitativa de costos y beneficios asociados a la conservación. Con ello se reconoce que los sistemas ofrecen servicios ecosistémicos que corresponden ser remediados económicamente por parte de los beneficiarios y redistribuidos a los proveedores de tales servicios (González *et al.*, 2013). Estos sistemas de pagos son necesarios que tengan una estructura, en cual supervise su trabajo, detalle las acciones y los niveles de pago, a su vez aprecien los impactos al cambio de uso de la tierra, y de ser necesario ajuste según acuerden las actividades y pagos (Mayrand *et al.*, 2004).

Muchas técnicas para la valoración de los servicios ecosistémicos se han desarrollado y aplicado. Dichas técnicas reconocen la asignación de un precio a los servicios ecosistémicos sin un mercado, como la protección contra los peligros naturales, la regulación del clima y el agua (Rodríguez *et al.*, 2016). Los servicios reguladores del capital natural del suelo que han sido valorados incluyen: control biológico de plagas y enfermedades; regulación del clima y del gas; control hidrológico; filtrado de nutrientes y contaminantes además al reciclaje de desechos y la desintoxicación (Jónsson *et al.*, 2016).

El valor económico comercializado y no comercializado con respecto a los bosques de ocho países mediterráneos presentó un 25 y 96%, relacionado a actividades recreativas, la captura de carbono y la protección de cuencas (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

De acuerdo a Miranda *et al.*, (2007), el valor del secuestro de carbono se estima de forma directa, a partir de los precios de mercado disponibles por tonelada de carbono (C). Estos mercados son globales y altamente competitivos, debido a su competencia hace que los proveedores del servicio compriman los costos de transacción y disminuyan el peligro asociado con la confiabilidad de los créditos de carbono. El mercado global de carbono está influenciado Protocolo de Kyoto (González *et al.*, 2013), y la necesidad de tomar acciones debido a las actividades humanas que influyen el proceso de calentamiento climático global a la concentración de gases de efecto invernadero y las influencias negativas sobre la salud, la seguridad alimentaria, el agua y otros recursos naturales (Eguren, 2004).

## **2.5 Potencial de secuestro de carbono de sistemas agroforestales**

Estos sistemas agroforestales (SAF) involucran a especies leñosas perennes como los árboles y arbustos los cuales interactúan con los cultivos, herbáceas forrajeras y animales, en un esquema complejo (Casanova *et al.*, 2011). Bajo un sistema tecno-productivo ofrece ventajas

en comparación de otros sistemas de uso, como la productividad biofísica, la elevación de beneficios globales y evidencias socioeconómicas (Callo *et al.*, 2001). Bajo este contexto se deben desarrollar y probar, en diferentes contextos socioeconómicos, métodos para el manejo de incentivos financieros en el acogimiento y mejoramiento de los SAF para favorecer el uso de la tierra (Beer *et al.*, 2003). Los sistemas agroforestales se muestran como una adecuada alternativa para el desarrollo sostenible en el sector agropecuario, y como sustanciales sumideros de carbono, demostrando sus ventajas en términos de captura (Miranda *et al.*, 2007). A su vez, optimizan actividades productivas, constituyendo una estrategia viable para detener el avance de la frontera agrícola (Torres, 2005).

Los principales servicios al ambiente que proveen los sistemas agroforestales: 1) mantenimiento del agua al beneficiar la infiltración y reducir la escorrentía superficial que podría favorecer a su contaminación; 2) mantenimiento de la fertilidad del suelo mediante el aporte de material orgánico; 3) captura de carbono, destacando el potencial de los sistemas silvopastoriles; y 4) conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados (Beer *et al.*, 2003). Los sistemas forestales y agroforestales almacenan carbono en varios componentes: hojarasca, biomasa sobre el suelo, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo (Andrade *et al.*, 2003). Estos sistemas representan importantes almacenes de carbono (C) en los suelos y biomasa leñosa (Beer *et al.*, 2003); sin embargo, no han sido apreciados en este sentido, debido a la ausencia de información cuantificada sobre su potencial de acumulación y adherencia de carbono (Miranda *et al.*, 2007). Los servicios ambientales que proporcionan los SAF como la captura del carbono, está captando la atención de planificadores, investigadores y políticos debido a que originan prácticas sostenibles de bajos insumos que reducen la modificación de los suelos y plantas, pero sus beneficios se logran a mediano y largo plazo, y no son perceptibles para los productores y/o beneficiarios, por ello estos sistemas pueden ser limitadas severamente (Ibrahim *et al.* 2006).

Se cree que los SAF pueden tener un mayor potencial para secuestrar C que los pastos o cultivos de campo (Ibrahim *et al.*, 2006), se estima que un barbecho puede rescatar de 50 a 80% la proporción de carbono de un bosque (Callo *et al.*, 2001). El potencial de depósito de carbono de los sistemas agroforestales oscila entre 12 a 228 t·ha<sup>-1</sup>, obteniendo mayor potencial en las zonas tropicales (húmedo) y tienen la capacidad de recolectar hasta 25 t·ha<sup>-1</sup> en los primeros 20 cm de profundidad del suelo y 70 t·ha<sup>-1</sup> en la vegetación. Con este cambio se pueden almacenar entre 1,1 y 2,2 Gt para los contiguos 50 años en todo el mundo,



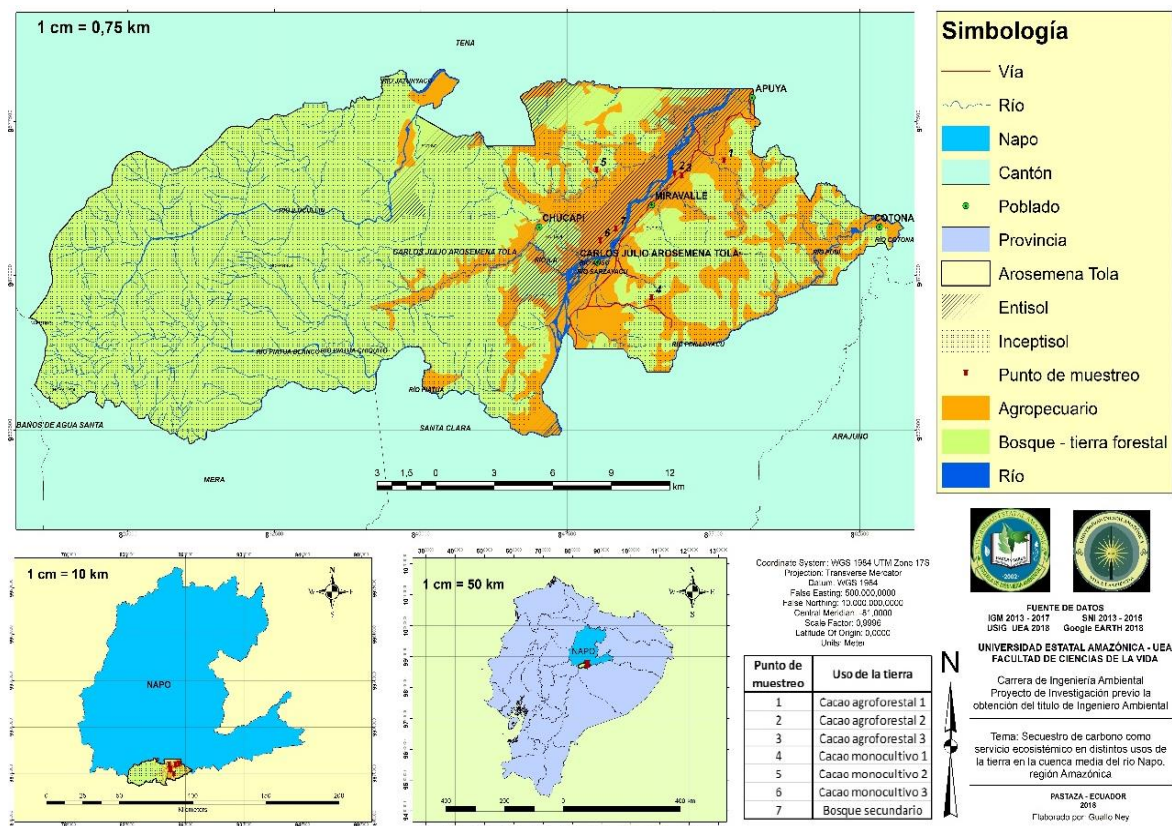
con una tasa de 0,2 a 3,1 t·ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, a lo que puede ayudar a la disminución del CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Casanova *et al.*, 2011). El conjunto de carbono es afectado por las especies de árbol y arbustos, la distribución y densidad, y la tolerancia de las especies herbáceas a la sombra. Por ejemplo, en las pendientes de los Andes Ecuatorianos, el total de C a nivel de suelo aumentó de 7,9% bajo pastura de *Setaria sphacelatasin* sombra, 11,4% bajo *S sphacelata* con sombra de *Inga spp.* Los suelos bajo *Inga* conservaron 20 t C ha<sup>-1</sup> más en los 15 cm superiores que la pastura abierta (Beer *et al.*, 2003).

El beneficio económico de los productores de adoptar este sistema, es más de un 10%, cuando más del 20% de las pasturas de monocultivos es cambiado por sistemas silvopastoriles y en bosque secundario. Con un ingreso potencial neto por el carbono almacenado de 70 ha<sup>-1</sup> estimado en \$253 año<sup>-1</sup> con un precio de C de \$7 t<sup>-1</sup>. (Beer *et al.*, 2003). Diversos estudios estipulan el hecho de que los SAF, no están diseñados especialmente para la captura carbono, además ofrece una oportunidad para acrecentar las reservas de C en la biosfera terrestre (Casanova *et al.*, 2011). Desarrollar al máximo el secuestro de carbono con monocultivos de alta densidad arbórea puede afectar de forma negativa a la conservación de la biodiversidad y podría excluir la fuente de aditamentos alimenticios, medicinas, fibras, etc, las cuales son usadas por familias rurales (Beer *et al.*, 2003).

# CAPÍTULO III. MATERIALES Y METODOS

## 3.1 Localización

El estudio se realizó en los usos de tierra cultivo agroforestal, monocultivo y bosque secundario, ubicados en el Cantón Carlos Julio Arosemena Tola el cual pertenece a la cuenca media del río Anzu, localizado al Sur de la Provincia de Napo, región Amazónica ecuatoriana a una altura entre 500 a 600 msnm. El área de estudio ha sido clasificada como bosque húmedo tropical, con una precipitación promedio de 4400 mm y una temperatura promedio anual de 25°C (Uvidia *et al.*, 2015).



**Figura 1.-** Localización geográfica a los usos de la tierra seleccionados en el estudio.

## 3.2 Tipo de investigación

De acuerdo a las líneas base el proyecto se enmarca en la Gestión y conservación Ambiental. Con dos tipos de investigación entre ellas descriptiva por motivo que se evaluará y describirá distintas variables como: Carbono orgánico total (COT), Densidad aparente (Da) y se

comparará en función del uso de la tierra, y exploratoria en razón que se obtendrá información base en cuanto al secuestro de carbono como servicio ecosistémico, valoración y mitigación al cambio climático.

### **3.3 Métodos de investigación**

El estudio siguió un método de investigación experimental en dos fases, la primera que conlleva a muestreos en campo a los tres usos de la tierra seleccionados como son el cultivo agroforestal, monocultivo y para la validación de datos confiables un bosque secundario. A partir de las muestras en campo se procedió con los análisis de laboratorio para la determinación de variables físicas y químicas. Para la determinación de Biomasa aérea, se realizó una matriz de datos en base a los valores en campo, los datos importantes de la matriz es el diámetro a la altura del pecho DAP y la densidad de los árboles, para expresarlos en una ecuación alométrica y obtener un valor de la biomasa en  $\text{Mg ha}^{-1}$ , no se detallan valores en el sistema de monocultivo por motivo de la inexistencia de árboles, con respecto al carbono almacenado en la biomasa es habitual multiplicar la biomasa y la fracción de carbono 0,5 y expresarlos en  $\text{Mg C ha}^{-1}$ .

#### **3.3.1 Evaluación del recurso suelo**

Se seleccionaron tres usos de la tierra más representativos codificados como:

- CAF: Cacao Agroforestal
- CMC: Cacao Monocultivo.
- BS: Bosque Secundario

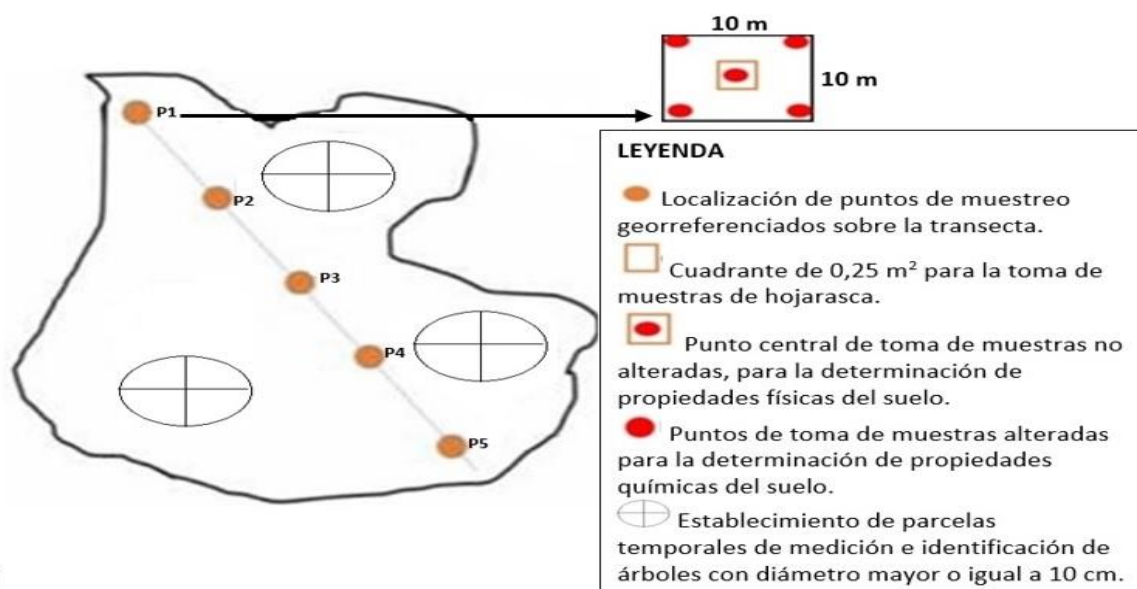
#### **Muestreo de campo:**

Para la obtención de las muestras de suelo, hojarasca y vegetación se realizó un muestreo de campo con la siguiente secuencia:

- a) Establecimiento de un transecto que cubra toda la variabilidad topográfica, vegetación y suelo en cada uso de tierra seleccionado.
- b) Localización sobre el transecto de cinco puntos de muestreo, de manera equidistante y en función del tamaño de la parcela (Figura 2).
- c) Establecimiento de una sub parcela de  $100 \text{ m}^2$  en cada punto (P1, P2, P3, P4 y P5), en la cual se recolectó cinco submuestras de suelo a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm). Los cuales conforman la muestra compuesta por punto y se usó para la evaluación de parámetros químicos.

d) En la parte central de la sub parcela se colocó un cuadrante (0.25 m<sup>2</sup>), donde se recogió biomasa (alteradas), y muestras no alteradas a tres profundidades (0-10,10-20 y 20-30 cm) para la evaluación de parámetros físicos. Se consideró alteradas a la hojarasca y no alteradas al suelo recogido a tres profundidades.

e) En los usos de la tierra con árboles CAF y BS, se estableció tres parcelas temporales mediante una circunferencia con un radio de 15 a 30 m correspondiente a 706 y 2827 m<sup>2</sup> respectivamente, donde se identificaron los árboles con diámetros mayores o iguales a 10 cm a la altura de 1.30 DAP.



**Fuente.-** Carlos Bravo Proyecto Prometeo UEA.

**Figura 2.-** Esquema de muestreo sistemático para el estudio de suelo, vegetación y biodiversidad en cada uso de tierra seleccionado.

### 3.3.2 Muestreo de suelo y análisis de laboratorio

#### Procesamiento de muestras de suelo

Para la determinación de las variables físicas se usaron muestras de suelo con cilindros de 5 cm de altura x 5 cm de diámetro recolectados con un toma muestra tipo Uhland, y posteriormente se colocó en estufa a 105 °C por 24 horas para obtener el peso seco (Pla, 2010), en las cuales se midió la densidad aparente ( $D_a$ ) usando el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) mediante el método de carga variable, distribución de tamaño de poros (Pt: porosidad total), porosidad de aireación (Pa: macro poros), porosidad de retención (Pr: micro poros). Respecto a las muestras alteradas se

determinó el carbono orgánico total (COT) por digestión húmeda, nitrógeno total (Nt) mediante el método de kjeldahl. El pH se midió por potenciometría, las bases cambiables (Ca, Mg, K, Al) y contenido de fósforo.

### **Carbono orgánico del suelo.**

El potencial de secuestro de carbono de los distintos usos de la tierra se midió mediante las variables densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), el valor del carbono y la profundidad de cada intervalo de muestreo, se cuantificó el porcentaje COT en el compartimiento suelo.

### **Carbono de la Biomasa aérea**

Para estimar el stock de carbono de la biomasa aérea se utilizó una ecuación alométrica, aplicada a las mediciones de los árboles y generada para las condiciones de Bosque húmedo tropical:

$$\text{BSS}_{\text{árbol}} = (p * \exp(-1.499 + (2.148 * \ln(D)) + (0.207 * \ln(D)^2) - (0.0281 * \ln(D)^3)) * 0.001$$

Donde:

**BSS**<sub>árbol</sub> = Biomasa aérea sobre el suelo

**P**: Densidad de Madera ( $\text{g/cm}^3$ ).

**D**: Diámetro a la altura del pecho (cm).

### **Carbono de la vegetación no arbórea (Hojarasca, Verde).**

En los mismos puntos para la toma de muestras de los parámetros físicos se estableció un marco cuadrado de  $0.25 \text{ m}^2$  ( $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ) y se recolectó todo el material localizado dentro del mismo. Posteriormente el material recolectado fue pesado y colocado en bolsas para su secado en la estufa hasta obtenerse un peso constante. Con los valores de peso seco se calculó el total Mg de materia seca por hectárea y posteriormente obtener la cantidad de carbono por hectárea ( $\text{Mg C /ha}^{-1}$ ), mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\text{CBN muestra} = \text{MS} * \text{CF}$$

Donde:

**$\Delta\text{CBN muestra}$** : Cantidad de carbono en la biomasa de la muestra de vegetación no arbórea ( $\text{Mg C/0,25 m}^2$ ) y llevar a su correspondiente en hectárea Ha.

**MS**: Materia seca (Mg).

**CF:** Es la fracción de carbono (Mg C /Mg MS) determinada mediante el valor propuesto por el IPCC de 0,5.

### **3.4 Diseño de la investigación**

Para la toma de muestras de suelo en campo se aplicó la metodología de muestreo sistemático para el estudio de suelo, vegetación y biodiversidad en cada uso de tierra seleccionado (Figura 2). Para la determinación de los parámetros físicos, químicos y biológicos, se siguió la metodología sugerida a nivel de laboratorio de suelo y se cuantificó las variables físicas, químicas y biológicas como son Da: Densidad aparente;  $K_{sat}$ : Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención;  $Al^{+3} + H^{+1}$ : Acidez intercambiable;  $Al^{+3}$ : Aluminio intercambiable; COT: Carbono orgánico total; Nt: Nitrógeno total; P: Fósforo disponible;  $k^{+1}$ : Potasio intercambiable;  $Ca^{+2}$ : Calcio intercambiable;  $Mg^{+2}$ : Magnesio intercambiable; RE: Respiración edáfica y RB: Respiración basal. Dichas variables fueron ponderadas a una profundidad de 0-30 cm y analizadas por el software IBM SPSS Statistics. Las pruebas estadísticas que se analizaron fue ANOVA (Análisis de varianza) a  $P < 0,05$  significativo, para la prueba de las medias de dos o más variables son iguales. A su vez para tener información más detallada sobre las diferencias entre medias específicas, se utilizó el método de comparaciones múltiples de Tukey al 0,05%, mostrando a nivel de grupos (a, b, c, d) en las gráficas de diferencias significativas. Para la representación de las relaciones entre variables se aplicó el método del Coeficiente de correlación de Pearson. La determinación de la biomasa aérea se utilizó una ecuación alométrica, aplicada a las mediciones del diámetro a la altura del pecho de los árboles. Todas las variables fueron tabuladas en matrices Excel y son de importancia para cumplir con los objetivos de la investigación.

### **3.5 Recursos humanos y materiales**

#### **Materiales para el trabajo de campo:**

- ❖ Libreta
- ❖ Esfero
- ❖ Mochila
- ❖ Machete
- ❖ Poncho de agua o sombrilla

### **Materiales para el muestreo:**

- ❖ GPS
- ❖ Pala
- ❖ Funda plástica quintalera (muestra compuesta)
- ❖ Fundas plásticas (hojarasca)
- ❖ Funda hermética plástica (Suelo)
- ❖ Metro
- ❖ Flexómetro
- ❖ Cilindros de 5 cm de altura x 5 cm
- ❖ Toma muestra tipo Uhland
- ❖ Cuadrata (0,5 m x 0,5 m)

### **Materiales de laboratorio:**

- ❖ Balanza analítica
- ❖ Funda de papel
- ❖ Estufa

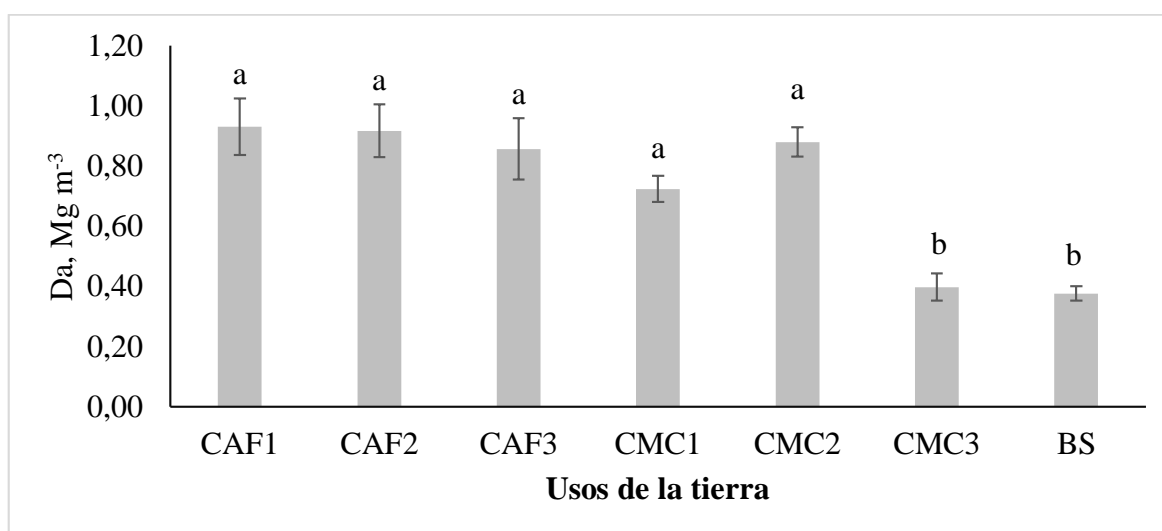
### **Reactivos**

- ❖ Dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 1 N
- ❖ Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ )
- ❖ Solución de sal de Morh 0.5 N ( $H_2SO_4 + FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ).

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 Caracterización física, química y biológica de los usos de la tierra a nivel de subgrupos

Los parámetros físicos del suelo en general, evaluados a través de los índices estructurales (Da, Ksat, Pt, Pa, Pr) mostró rangos categorizados adecuados para todos los usos de la tierra considerados en la Tabla 1. La densidad aparente (Da) es el peso por unidad de suelo y permite hacer evaluaciones de carbono orgánico entre unidad de área (Andrade *et al.*, 2003). Este parámetro registró valores que oscilaron de 0,38 a 0,93 Mg m<sup>-3</sup> representando condiciones óptimas al compararse con el límite crítico de 1,30 Mg m<sup>-3</sup> para este tipo de textura (Arcilloso), con diferencias significativas y con un coeficiente de variación ó dispersión de datos moderado. Se obtuvieron dos grupos, el primero representado por CAF1, CAF2, CAF3, CMC1, CMC2 con mayores densidades que el grupo integrado por el CMC3 y BS donde los valores oscilaron de 0,4 a 0,38 Mg m<sup>-3</sup> (Figura 3). Al aumento de la densidad aparente Da, incrementa la compactación y se afecta las condiciones de retención de humedad, el cual limita el desarrollo de las raíces (Salamanca *et al.*, 2005). Sin embargo, independientemente del uso de la tierra los valores son considerados bajos por lo que esta variable no representa ninguna limitación para el crecimiento y penetración de las raíces.



**Figura 3.-** Diferencias significativas del parámetro físico densidad aparente (Da, Mg m<sup>-3</sup>).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey (P <0.05).

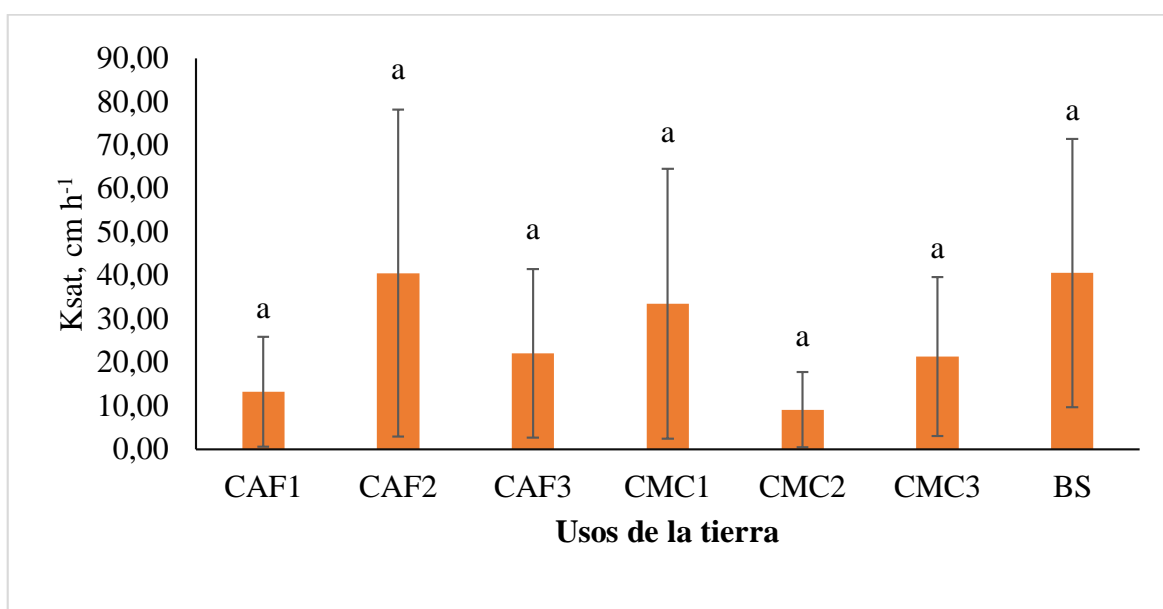


**Tabla 1.-** Caracterización física, química y biológica en los usos de tierra seleccionado.

Variables	Usos de la tierra						
	CAF1	CAF2	CAF3	CMC1	CMC2	CMC3	BS
Da, Mg ha <sup>-1</sup>	0,93 ± 0,09	0,92 ± 0,09	0,86 ± 0,10	0,72 ± 0,04	0,88 ± 0,05	0,4 ± 0,05	0,38 ± 0,02
K <sub>sat</sub> , cm h <sup>-1</sup>	13,17 ± 12,66	40,52 ± 37,69	22,11 ± 19,42	33,44 ± 31,10	9,09 ± 8,66	21,31 ± 18,34	40,56 ± 30,91
Pt, %	66,91 ± 3,80	28,58 ± 2,33	67,89 ± 2,96	71,49 ± 2,07	73,09 ± 2,28	84,86 ± 3,54	84,48 ± 0,71
Pa, %	9,09 ± 1,37	10,01 ± 2,19	12,05 ± 1,73	12,04 ± 0,67	8,86 ± 1,21	10,95 ± 1,43	15,40 ± 3,50
Pr, %	57,82 ± 4,20	55,98 ± 2,90	55,83 ± 1,99	59,45 ± 2,24	64,23 ± 2,00	73,91 ± 4,46	69,08 ± 4,03
pH	5,70 ± 0,40	5,26 ± 0,21	5,25 ± 0,11	5,60 ± 0,29	5,43 ± 0,14	5,10 ± 0,14	5,05 ± 0,17
Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup> , meq 100 mL	3,35 ± 0,21	2,24 ± 0,51	2,77 ± 0,67	6,55 ± 0,84	3,43 ± 1,86	1,24 ± 0,26	1,40 ± 0,25
Al <sup>3+</sup> , meq 100 mL	0,95 ± 0,09	0,67 ± 0,20	0,70 ± 0,29	0,93 ± 0,33	0,80 ± 0,15	0,59 ± 0,18	0,57 ± 0,20
% COT	1,51 ± 0,51	1,71 ± 0,25	1,91 ± 0,46	2,29 ± 0,18	2,15 ± 0,41	6,00 ± 0,81	5,21 ± 0,34
% NT	0,18 ± 0,01	0,19 ± 0,03	0,21 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,23 ± 0,03	0,62 ± 0,07	0,58 ± 0,05
P, mg kg <sup>-1</sup>	2,30 ± 0,56	5,08 ± 1,13	4,80 ± 0,83	2,97 ± 0,54	4,73 ± 1,64	2,17 ± 0,66	1,34 ± 0,27
K <sup>+</sup> , meq 100 ml	0,12 ± 0,02	0,10 ± 0,02	0,13 ± 0,03	0,18 ± 0,05	0,30 ± 0,09	0,10 ± 0,05	0,08 ± 0,02
Ca <sup>2+</sup> , meq 100 mL	9,89 ± 6,56	2,73 ± 0,67	3,61 ± 0,55	8,60 ± 2,96	3,04 ± 1,17	1,56 ± 0,11	2,02 ± 0,36
Mg <sup>2+</sup> , meq 100 mL	2,39 ± 1,42	0,76 ± 0,19	0,89 ± 0,14	1,82 ± 0,41	0,98 ± 0,30	0,47 ± 0,03	0,53 ± 0,07
RE mg CO <sub>2</sub> kg s dia <sup>-1</sup>	214,05 ± 38,82	216,27 ± 31,41	155,12 ± 51,91	187,92 ± 41,12	230,73 ± 64,75	296,33 ± 67,63	289,10 ± 62,07
RB mg CO <sub>2</sub> kg s dia <sup>-1</sup>	400,34 ± 86,59	400,34 ± 49,23	497,62 ± 91,50	486,39 ± 56,90	314,28 ± 124,20	162,75 ± 83,03	175,85 ± 68,22
Biomasa Mg ha <sup>-1</sup>	4,08 ± 2,06	5,74 ± 2,84	4,78 ± 2,23	4,18 ± 2,24	4,16 ± 1,22	4,66 ± 1,31	5,89 ± 2,85

Da: Densidad aparente; K<sub>sat</sub>: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; Al<sup>3+</sup> + H<sup>+</sup>: Acidez intercambiable; Al<sup>3+</sup>: Aluminio intercambiable; COT: Carbono orgánico total; Nt: Nitrógeno total; P: Fósforo disponible; k<sup>+</sup>: Potasio intercambiable; Ca<sup>2+</sup>: Calcio intercambiable; Mg<sup>2+</sup>: Magnesio intercambiable; RE: Respiración edáfica; RB: Respiración basal; CAF1,2,3: Cacao agroforestal 1,2,3; CMC1,2,3: Cacao monocultivo 1,2,3; BS: Bosque secundario.

La conductividad hidráulica, es la capacidad del agua para moverse a través de un medio permeable, esta característica es la mejor forma de medir la capacidad de infiltración del suelo (Donado, 2004). Los valores del parámetro conductividad hidráulica saturada  $K_{sat}$ , variaron de 9,09 a 40,52, obteniéndose una mayor velocidad de penetración de agua en el uso de la tierra bosque secundario. Mediante la prueba de significación esta variable no presenta diferencias constituido en un solo grupo a, y un coeficiente de variación (CV) alta (Figura 4). Este comportamiento está relacionado con la condición textural y estructural que favorece la penetración y el movimiento de agua en el perfil del suelo (Bravo *et al.*, 2017).

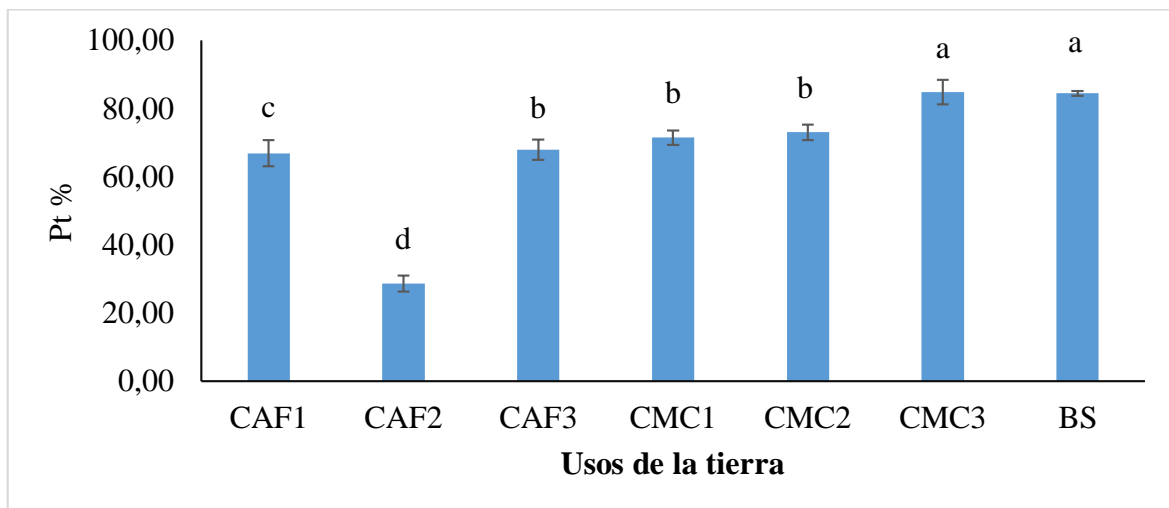


**Figura 4.-** Diferencias significativas del parámetro físico conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ , cm h<sup>-1</sup>).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

La porosidad total osciló de 28,58 a 84,86%, registrando menor porcentaje con cacao manejado como sistema agroforestal (CAF2). Estos valores son adecuados para los criterios de la calidad del suelo, se muestran diferencias significativas representadas por cuatro grupos a, b, c, d (Figura 5), y una dispersión de datos baja. La estructura del suelo comprende la forma, grado y tamaño de los agregados. Dicha estructura afecta a la porosidad por consiguiente al crecimiento de las raíces, la capacidad de retención y disponibilidad del agua (Martínez *et al.*, 2008). Valores mayores al 50% de la porosidad total, conlleva a problemas

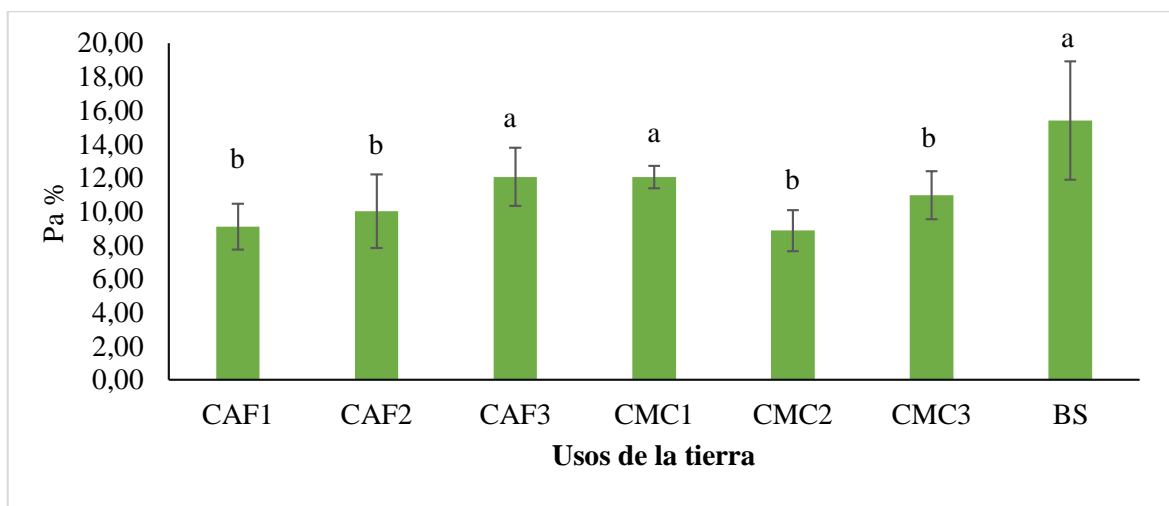
con el suministro de agua, drenaje y transporte de nutrientes hacia las plantas (Volverás *et al.*, 2016)



**Figura 5.-** Diferencias significativas del parámetro físico porosidad total (Pt, %).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

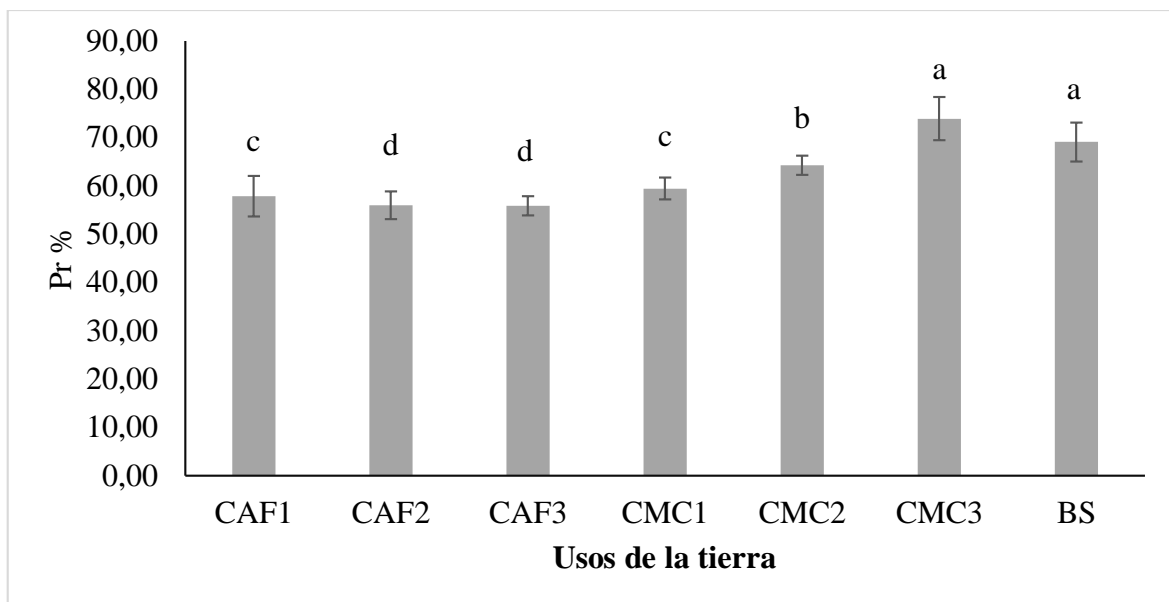
La porosidad de aireación (Pa), presentó valores que oscilaron de 9,09% (CAF1) a 15,40% (BS), presentando condiciones no adecuadas en algunos usos como el CAF1 y CMC2, por debajo del límite considerado como crítico (10%, Pla 2010). Las diferencias significativas se presentan en dos grupos a y b (Figura 6). Los poros de aireación (macro poros) ayudan activamente al flujo de agua y al movimiento de aire en el suelo, suministrando condiciones apropiadas para la actividad biológica del suelo (Bravo *et al.*, 2008).



**Figura 6.-** Diferencias significativas del parámetro físico porosidad de aireación (Pa, %).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

La porosidad de retención (Pr), presenta valores adecuados, lo cual significa que estos suelos muestran una alta capacidad de retención de humedad, indistintamente del uso de la tierra (Bravo *et al.*, 2017). Para esta variable los valores promedios oscilaron de 55,83% CAF3 a 73,91% CMC3, asumiendo condiciones convenientes para los usos de la tierra. Las diferencias significativas fueron representadas en cuatro grupos a, b, c, d (Figura 7).

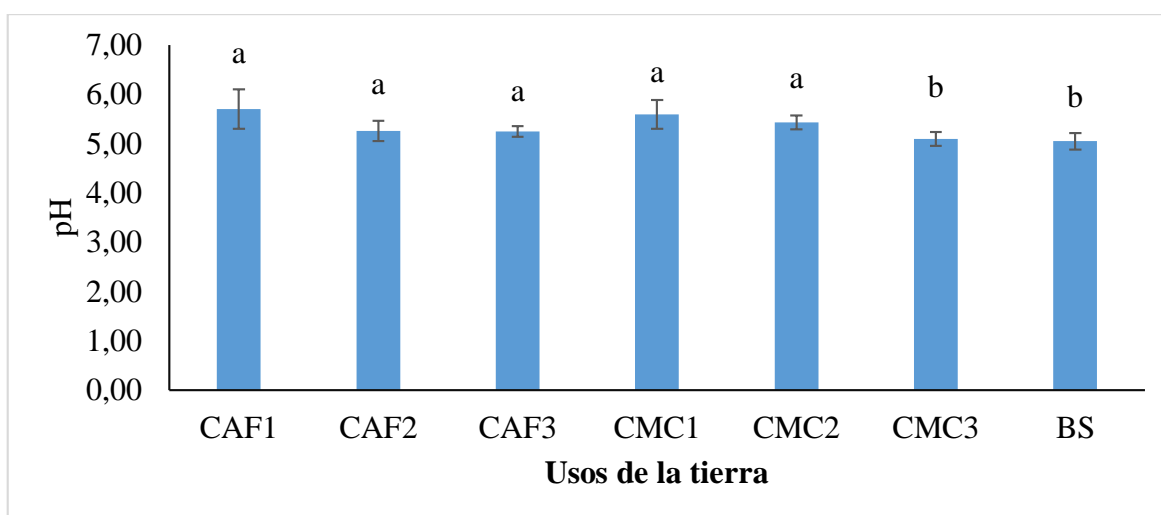


**Figura 7.-** Diferencias significativas del parámetro físico porosidad de retención (Pr, %).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

La variación de estos parámetros incide directamente en el comportamiento hídrico y biogeoquímico, en el movimiento de agua y aireación del suelo, lo cual resulta de gran relevancia en escenarios Amazónicos debido a sus características climáticas como la alta pluviosidad (Bravo *et al.*, 2015). Los índices estructurales estudiados, (Da, Ksat, Pt, Pa, Pr), ayuda a caracterizar diferentes procesos en el suelo como la compactación, aireación, infiltración, que pueden verse afectados por el cambio de uso de la tierra de bosque secundario (BS) a cultivo de cacao como sistema agroforestal (CAF) y cacao monocultivo (CMC). Además, el rol del recurso suelo como regulador del ecosistema y su contribución a la mitigación del cambio climático global (Bravo *et al.*, 2017).

Los parámetros químicos en los distintos usos de tierra fue variada (Tabla 1), evaluada a través de los variables pH,  $\text{Al}^{+3} + \text{H}^{+1}$ : Acidez intercambiable;  $\text{Al}^{+3}$ : Aluminio intercambiable; COT: Carbono orgánico total; Nt: Nitrógeno total; P: Fósforo disponible;  $\text{K}^{+1}$ : Potasio intercambiable;  $\text{Ca}^{+2}$ : Calcio intercambiable;  $\text{Mg}^{+2}$ : Magnesio intercambiable. El pH influye en la fertilidad del suelo, se relaciona con la disponibilidad de nutrientes, la presencia de microorganismos y de elementos tóxicos (aluminio y manganeso) (Bravo *et al.*, 2015), los suelos en la zonas de estudio presentan valores de pH categorizado de ácido a moderadamente ácido, en cuanto a las diferencias significativas se presentan en dos grupos a y b (Figura 8).

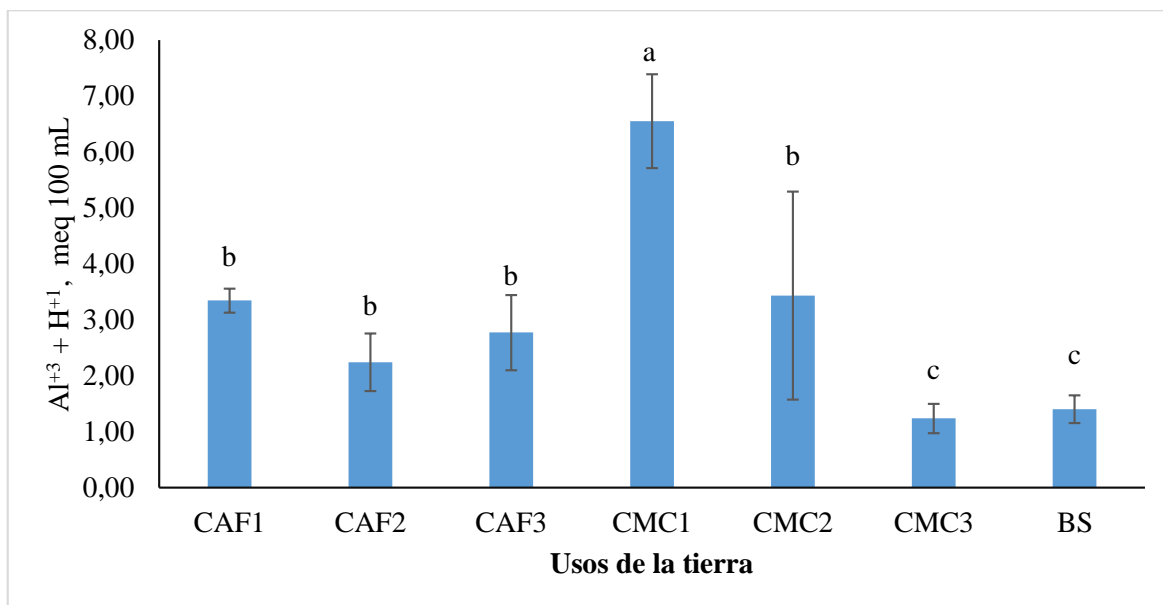


**Figura 8.-** Diferencias significativas del parámetro químico pH.

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

El 40 % del uso de tierra para cultivos del mundo son suelos ácidos con pH menor a 5,5 (Rosas *et al.*, 2017). Esto se debe, a una alta proporción de los sitios de intercambio está siendo saturada por  $\text{Al}^{+3}$ , lo que conlleva a inconvenientes de toxicidad y disminución de la disponibilidad de nutrientes, los cuales afectan a la adsorción de  $\text{K}^{+1}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ . A pesar de que los cultivos de cacao (*Theobroma cacao* L., Malvaceae) es procedente de la Amazonía, allí influyen suelos ácidos que limitan la disponibilidad y absorción de N,  $\text{K}^{+1}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y P, nutrientes propios de dicha especie (Casierra *et al.*, 2007). Algunos estudios realizados a la producción del cacao manifiestan que dicha productividad se incrementa cuando se disminuye la concentración de  $\text{Al}^{+3}$ , a su vez se aumenta el pH de 4,0 a 5,3 y se fertiliza el suelo (Rosas *et al.*, 2017). Las procedencias primordiales de la acidez en regiones

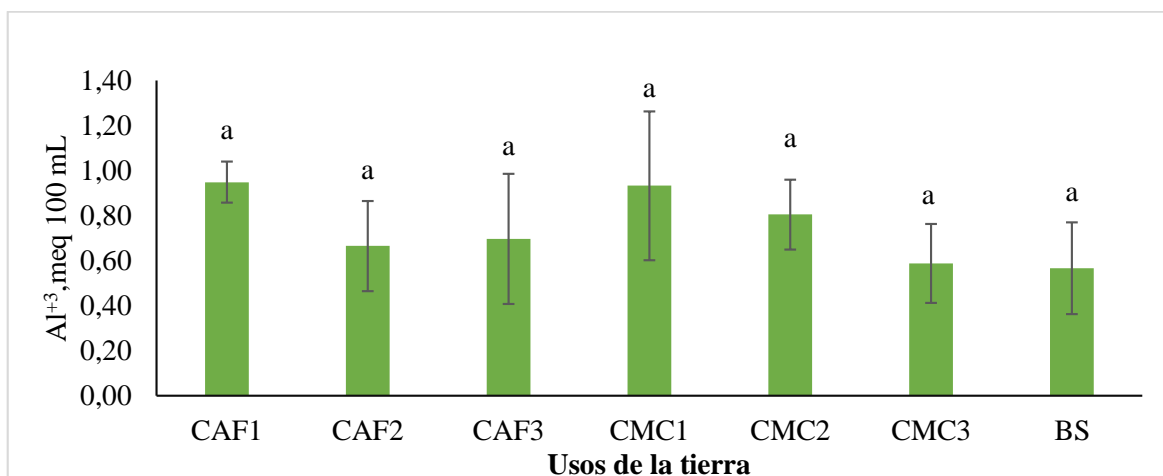
tropicales como la Amazonía ecuatoriana, van desde la génesis hasta el manejo del suelo. La meteorización de ciertas rocas primarias en largas fases geológicas y los procesos de pérdida de bases por lixiviación (Calva *et al.*, 2017). El valor del nutriente acidez intercambiable  $Al^{+3} + H^{+1}$ , presentó rangos que oscilaron de 6,55 (meq 100 mL) CMC1 a 1,4 (meq 100 mL) BS, categorizado de medio a toxico en los diferentes usos de la tierra. Se mostraron diferencias significativas presentándose en tres grupos a, b, c (Figura 9).



**Figura 9.-** Diferencias significativas del parámetro químico acidez intercambiable ( $Al^{+3} + H^{+1}$ , meq 100 mL).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

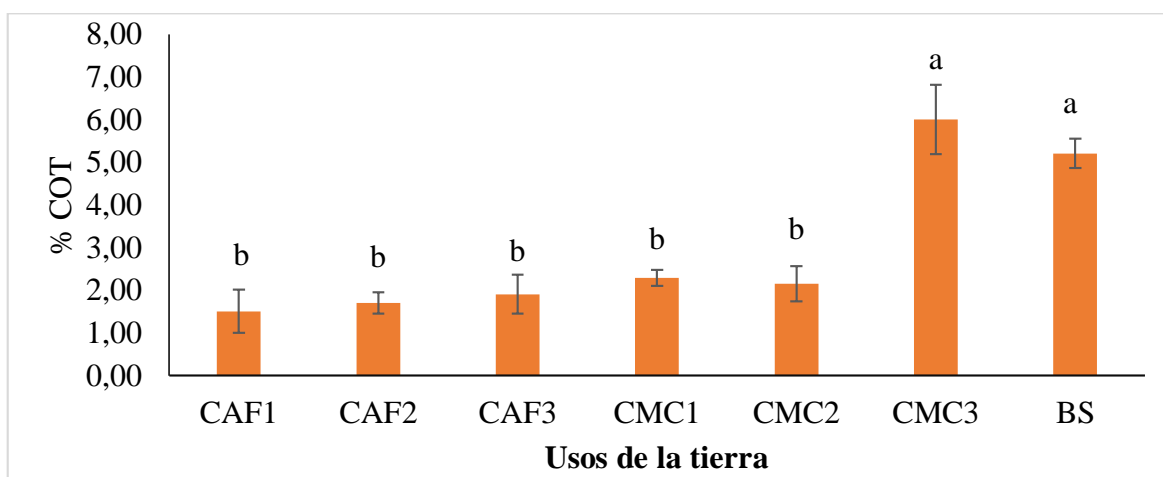
Los suelos viejos o suelos que no son desarrollados por material volcánico, son ácidos, de baja fertilidad y con contenido de aluminio intercambiable ( $Al^{+3}$ ) y están situados en las zonas de mayor precipitación del país como la zona oriental del Ecuador (Calva *et al.*, 2017), este nutriente presentó un valor medio de 0,95 (meq 100 mL) CAF1 a 0,57 (meq 100 mL) BS, los diferentes usos de la tierra estudiados no registran grados de toxicidad. Reflejando condiciones adecuadas para los cultivos de cacao. Dichos valores se representaron en un grupo a (Figura 10).



**Figura 10.-** Diferencias significativas del parámetro químico aluminio intercambiable ( $Al^{+3}$ , meq 100 mL).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

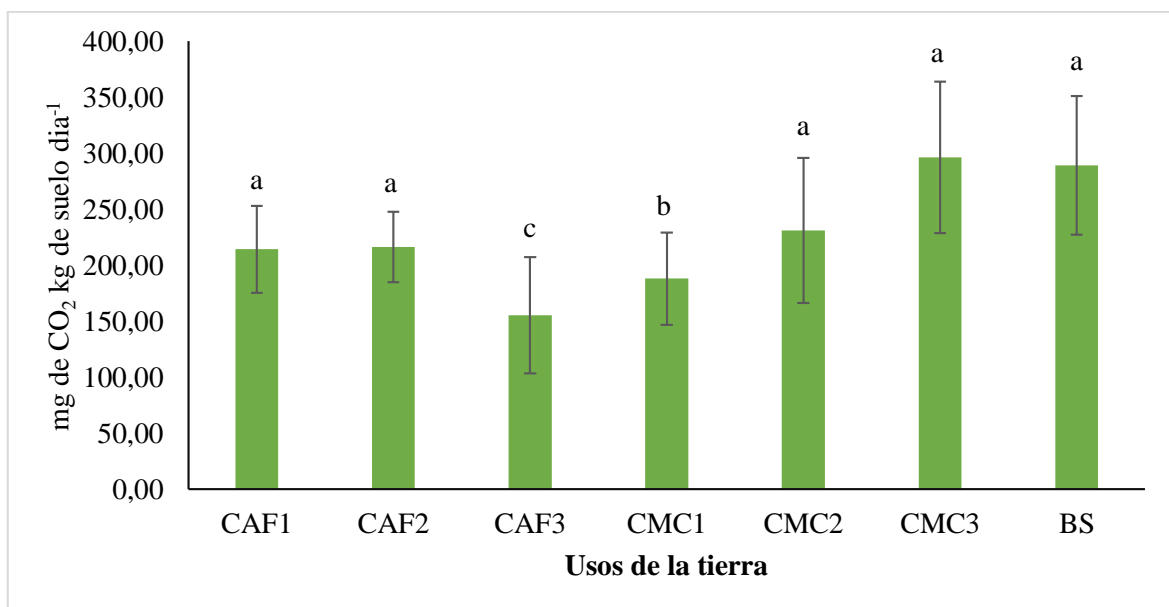
Al respecto el contenido de nitrógeno total varió de 0,18% CAF1, 0,62% CMC3 a 0,58%BS, categorizados como un valor de nutriente bajo y medio. Los valores de COT se hayan entre 1 a 10% con rangos de 1,51 CAF1 a 5,21 BS, probablemente estos resultados están relacionados a las características de la Amazonía cuyo uso potencial es principalmente de Bosque, lo cual durante años ha proporcionado gran cantidad de biomasa, entre hojarasca y raíces los cuales contribuyen fuertemente a los ciclos biogeoquímicos mejorando los contenidos de algunos nutriente en especial el carbono y nitrógeno (Bravo *et al.*, 2015; Jadan *et al.*, 2012).



**Figura 11.-** Diferencias significativas del parámetro químico carbono orgánico total (COT, %).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

La respiración del suelo se especifica como la producción total de dióxido de carbono, por unidad de área y de tiempo (Murcia *et al.*, 2008). Los parámetros biológicos RE: Respiración edáfica; RB: Respiración basal y Biomasa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), mostraron condiciones adecuadas. Cuando se hace mención a la respiración del suelo se debe tomar en consideración dos variables la primera es producida por la respiración de las raíces vivas RE, y la segunda es realizada por los microorganismos del suelo RB especialmente los heterótrofos. En gran variedad de ecosistemas esta variable se ha medido con el fin de apreciar la dinámica de la raíces como la actividad microbiana, el reciclaje de nutrientes, los flujos de carbono y energía (Ramírez *et al.*, 2008). El dinamismo microbiano del suelo puede verse influenciado con el contenido de humedad, esto conlleva a un aumento en la respiración del suelo (Yáñez *et al.*, 2017), este componente controla la respiración de suelo, dado que inhabilita la difusión del  $\text{CO}_2$  (Vásquez *et al.* 2013). Los valores de respiración edáfica se hayan entre los rangos de 155,12 CAF3 ( $\text{CO}_2$ ) a 289,10 BS ( $\text{CO}_2$ ), se detallan diferencias significativas de  $P < 0,05$  representado en tres grupos a, b, c (Figura 12).

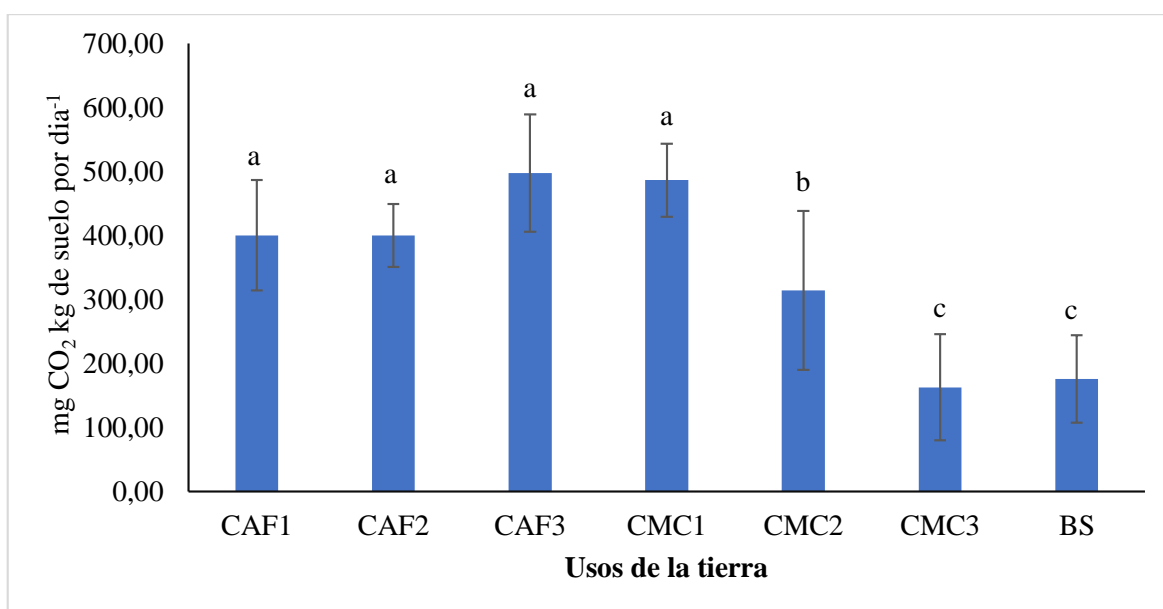


**Figura 12.-** Diferencias significativas del parámetro biológico respiración edáfica (RE).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).



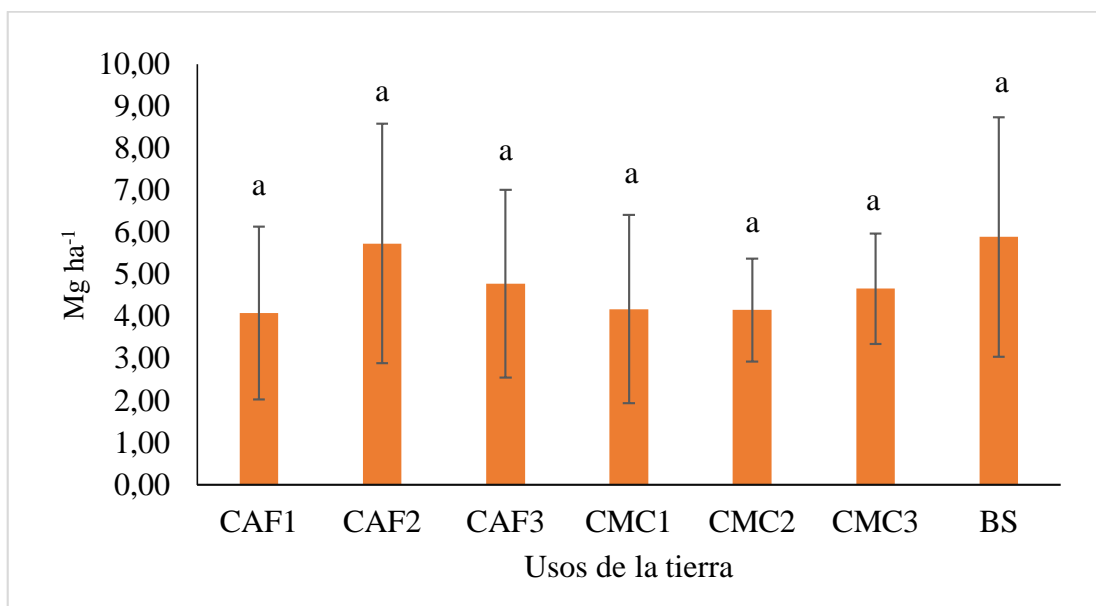
La respiración basal (RB) en el suelo concierne a la producción de CO<sub>2</sub> por la asimilación de los microorganismos que viven intrínsecamente en la matriz del suelo. Dicha variable presentó rangos que oscilaron de 175,85 (CO<sub>2</sub>) BS a 497,62 (CO<sub>2</sub>), al igual que la respiración edáfica se agruparon en tres a, b, c (Figura 13). La respiración basal detalla valores más as en cuanto a la respiración edáfica, esto se debe por la alta presencia de materia orgánica presente en los suelos. Bajos índices de materia orgánica manifiestan una actividad microbiana disminuida, lo que deriva en una menor emisión del CO<sub>2</sub> (Yáñez *et al.*, 2017). Los cambios de uso de tierra de bosque a sistemas de producción tienen un impacto significativo en el intercambio de CO<sub>2</sub> (Vásquez *et al.* 2013).



**Figura 13.-** Diferencias significativas del parámetro biológico respiración basal (RB).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

La biomasa no arbórea hojarasca es el material vegetal que se acumula en el suelo y cumple un papel fundamental en los ecosistemas, al acumularse sirve de alimento y habitat para varios organismos que son parte de la red trófica, los incrementos de esta variable se da por el clima y los procesos biológicos (Ibrahim *et al.*, 2006), a su vez es importante para el traspaso de nutrientes desde el suelo a la planta (Jaramillo, 2007). Esta variable varía de 4,08 (Mg ha<sup>-1</sup>) CAF1, 5,74 CAF2 (Mg ha<sup>-1</sup>) en los sistemas de cultivo a 5,87 (Mg ha<sup>-1</sup>) en el bosque secundario. No se representan letras diferentes de  $P < 0,05$  agrupándose en un solo grupo a (Figura 14).



**Figura 14.-** Diferencias significativas del parámetro biológico biomasa (Mg ha<sup>-1</sup>).

**Nota.-** Letras desiguales difieren significativamente a través de la prueba de comparación de medias de acuerdo con el ajuste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

#### **4.2 Asociación entre variables físicas, químicas y biológicas, en los distintos usos de tierra.**

Las relaciones entre variables (Tabla 2), fueron 64 correlaciones. El grado de asociación se representó mediante el método del Coeficiente de correlación de Pearson, asumiendo valores de 0 a 1, con tres variantes Baja de 0 a 0,30, Mediano de 0,31 a 0,70 y Alta  $> 0,70$ . El porcentaje de variación describe cuando el valor es negativo (-): Aumenta el valor de una variable disminuye el otro; y cuando es positivo (+): Aumenta el valor de una variable aumenta el otro. Las correlaciones altas fueron 13, entre ellas la relación de la densidad aparente (Da) con la porosidad de retención (Pr) -0,809, % carbono orgánico total (COT) -0,929 y el % de nitrógeno total -0,955. La porosidad de retención con las variables % carbono orgánico total (COT) 0,813, % de nitrógeno total 0,832 y la respiración basal -0,747. El carbono orgánico total con el nitrógeno total 0,983 y la respiración basal -0,705. La respiración edáfica y la respiración basal -0,725. Con respecto al grado de asociación mediano hubo 51 correlaciones.

**Tabla 2.-** Correlación entre variables físicas, químicas y biológicas.

Variables	Da	Ksat	Pt	Pa	Pr	pH	Al <sup>+3</sup> +H <sup>+1</sup>	Al <sup>+3</sup>	COT	NT	P	K <sup>+1</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	RE CO <sub>2</sub>	RB CO <sub>2</sub>	Biomasa Mg ha <sup>-1</sup>
Da, Mg ha <sup>-1</sup>	1,000																
Ksat, cm h <sup>-1</sup>	-0,191	1,000															
Pt, %	<b>-,665**</b>	-0,157	1,000														
Pa, %	<b>-,596**</b>	<b>,581**</b>	0,324	1,000													
Pr, %	<b>-,809**</b>	-0,213	<b>,680**</b>	0,086	1,000												
pH	<b>,457**</b>	0,087	-0,113	-0,192	<b>-,437**</b>	1,000											
Al <sup>+3</sup> +H <sup>+1</sup> , meq 100 mL	<b>,371*</b>	-0,078	-0,056	-0,144	<b>-,391*</b>	<b>,452**</b>	1,000										
Al <sup>+3</sup> , meq 100 mL	0,325	-0,223	-0,050	-0,285	-0,233	<b>,452**</b>	<b>,537**</b>	1,000									
% COT	<b>-,929**</b>	0,104	<b>,614**</b>	<b>,460**</b>	<b>,813**</b>	<b>-,522**</b>	<b>-,510**</b>	<b>-,364*</b>	1,000								
% NT	<b>-,955**</b>	0,096	<b>,631**</b>	<b>,484**</b>	<b>,832**</b>	<b>-,545**</b>	<b>-,484**</b>	<b>-,377*</b>	<b>,983**</b>	1,000							
P, mg kg <sup>-1</sup>	<b>,627**</b>	-0,176	<b>-,573**</b>	<b>-,352*</b>	<b>-,475**</b>	-0,041	0,151	-0,024	<b>-,566**</b>	<b>-,595**</b>	1,000						
K <sup>+1</sup> , meq 100 ml	0,305	-0,173	0,085	-0,308	-0,057	<b>,375*</b>	0,295	0,245	-0,283	<b>-,336*</b>	0,319	1,000					
Ca <sup>+2</sup> , meq 100 mL	0,327	-0,002	-0,025	-0,125	<b>-,349*</b>	<b>,867**</b>	<b>,515**</b>	<b>,433**</b>	<b>-,453*</b>	<b>-,427*</b>	-0,188	0,094	1,000				
Mg <sup>+2</sup> , meq 100 mL	<b>0,383*</b>	-0,125	-0,038	-0,205	<b>-,339*</b>	<b>,833**</b>	<b>,482**</b>	<b>,386*</b>	<b>-,503**</b>	<b>,471**</b>	-0,141	0,101	<b>,964**</b>	1,000			
RE mg CO <sub>2</sub> kg s dia <sup>-1</sup>	<b>-,569**</b>	0,175	0,324	0,255	<b>,595**</b>	-0,182	<b>-,509**</b>	-0,190	<b>,641**</b>	<b>,599**</b>	<b>,451**</b>	-0,112	-0,199	-0,243	1,000		
RB mg CO <sub>2</sub> kg s dia <sup>-1</sup>	<b>,606**</b>	0,017	<b>-,424*</b>	-0,134	<b>-,747**</b>	<b>,351*</b>	<b>,560**</b>	0,311	<b>-,705*</b>	<b>-,703*</b>	<b>,393*</b>	0,234	0,313	0,322	<b>-,725*</b>	1,000	
Biomasa Mg ha <sup>-1</sup>	-0,120	0,062	-0,103	0,159	0,037	-0,025	-0,295	-0,286	0,180	0,163	0,005	-0,051	-0,024	-0,068	0,207	-0,187	1,000

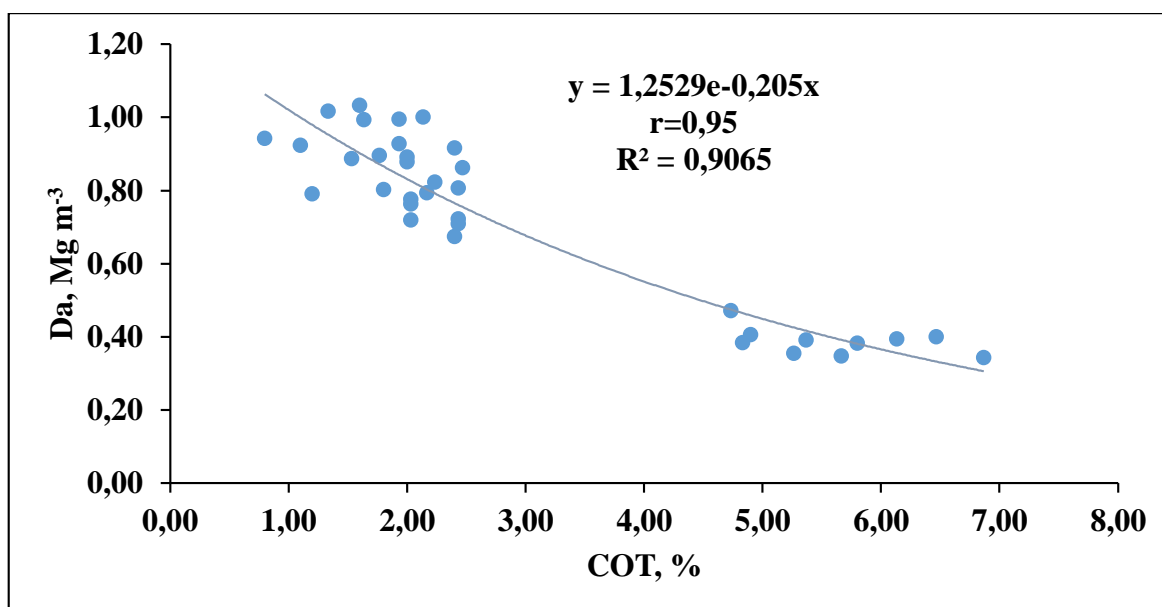
Da: Densidad aparente; K<sub>sat</sub>: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; Al<sup>+3</sup> + H<sup>+1</sup>: Acidez intercambiable; Al<sup>+3</sup>: Aluminio intercambiable; COT: Carbono orgánico total; Nt: Nitrógeno total; P: Fósforo disponible; k<sup>+1</sup>: Potasio intercambiable; Ca<sup>+2</sup>: Calcio intercambiable; Mg<sup>+2</sup>: Magnesio intercambiable; RE: Respiración edáfica; RB: Respiración basal.

Para la representación de la relación entre variables se aplicó el método del Coeficiente de correlación de Pearson.

### 4.3 Representación gráfica de las variables de mayor correlación

#### 4.3.1 Carbono orgánico total y densidad aparente.

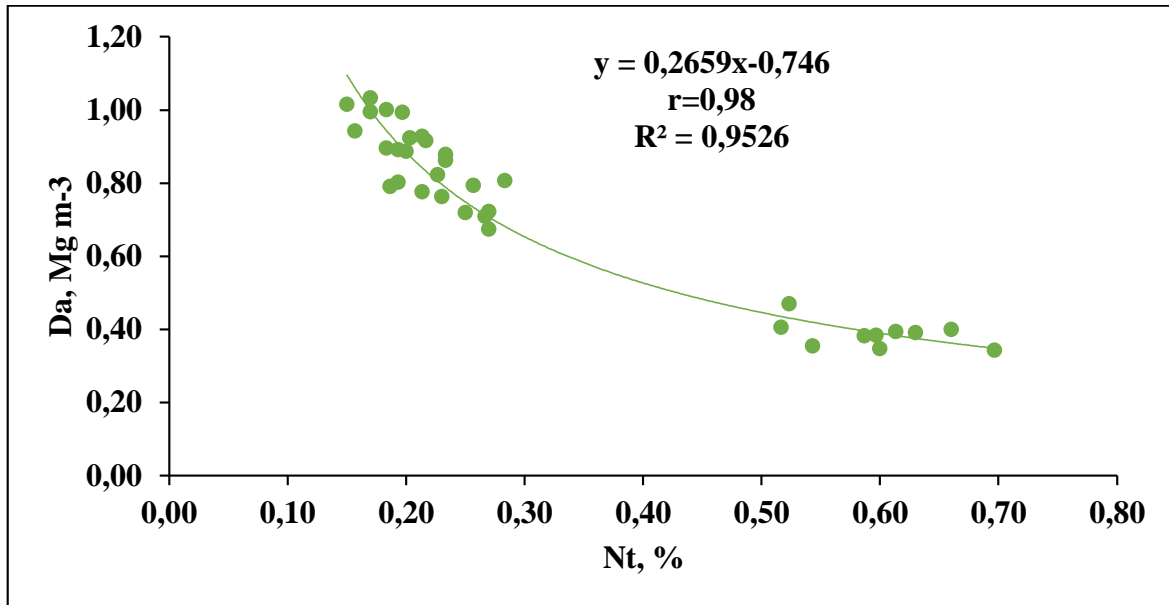
La correlación entre el carbono orgánico total y densidad aparente  $D_a$ , presentó un grado de asociación negativa  $-0,929$  alta, con un grado de ajuste de  $0,906$ , asumiendo que cuando aumenta el carbono orgánico total disminuye la densidad aparente (Figura 15). Cuando los contenidos de materia orgánica aumenta, hay una mejora en la retención de humedad y reduce la densidad, esto se debe a la disponibilidad de agua y aire (Casanova *et al.*, 2011). Varios estudios determinan la correlación negativa entre el COS, pH y densidad aparente, dicha variable es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado especialmente por la materia orgánica del suelo. A medida que aumenta el espacio poroso y la cantidad de materia orgánica, disminuye la  $D_a$  y viceversa (Salamanca *et al.*, 2005).



**Figura 15.-** Relación carbono orgánico total y densidad aparente  $D_a$  ( $Mg\ m^{-3}$ ).

#### 4.3.2 Porcentaje de nitrógeno total y densidad aparente.

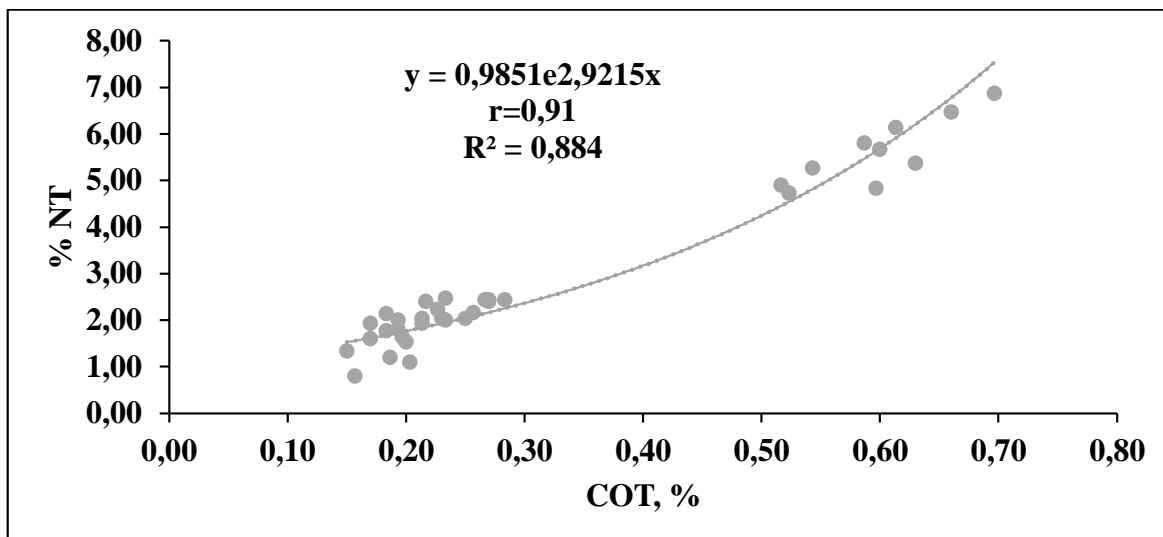
La relación entre estas variables densidad aparente  $D_a$  y el porcentaje de nitrógeno total, mostró una similitud en cuando a la correlación con el carbono orgánico total, presenta un grado de asociación negativa  $-0,0955$  (Figura 16). Los suelos que presentan una degradación como la porosidad, materia orgánica, estabilidad de agregados, fósforo y nitrógeno los cuales están directamente vinculados con la densidad aparente  $D_a$  (Muñoz *et al.*, 2013).



**Figura 16.-** Relación nitrógeno total (Nt, %) y densidad aparente Da (Mg m<sup>-3</sup>).

#### 4.3.3 Carbono orgánico total y % nitrógeno total.

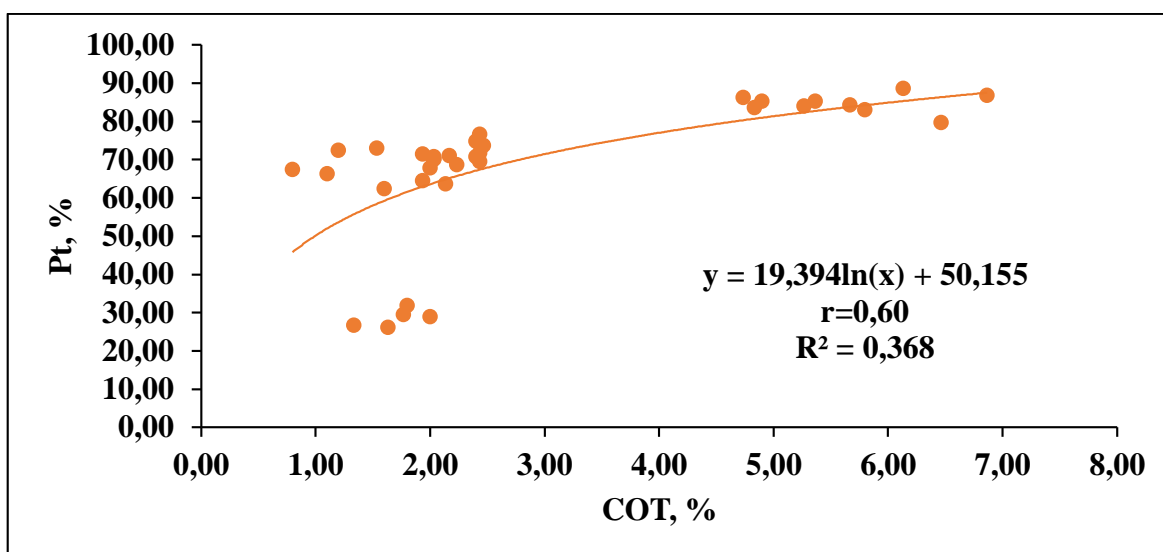
Una reserva esencial de nitrógeno es la materia orgánica del suelo, aproximadamente el 98 % del total de nitrógeno del suelo, se encuentra en compuestos orgánicos, estas formas orgánicas encierran proteínas, aminoácidos y azúcares aminados, presentando en los 20 centímetros entre 1.000 y 10.000 kg de N por hectárea. (Calva *et al.*, 2017). La materia orgánica afecta la reacción del suelo, por motivo de varios grupos activos que proporcionan acidez al contenido de nitrógeno presente en los residuos orgánicos contribuidos al suelo (Martínez *et al.*, 2008). Esta correlación denotó de forma positiva 0,98 atribuyendo que al aumento de carbono orgánico total existe un aumento del contenido de nitrógeno (Figura 17). Existen estudios que asumen que el contenido de carbono orgánico en el suelo se correlaciona positivamente con nitrógeno total Nt, potasio disponible P y relación C/N (Ibrahim *et al.*, 2006).



**Figura 17.-** Relación carbono orgánico total (COT, %) y nitrógeno total (Nt, %).

#### 4.3.4 Carbono orgánico total y porosidad total.

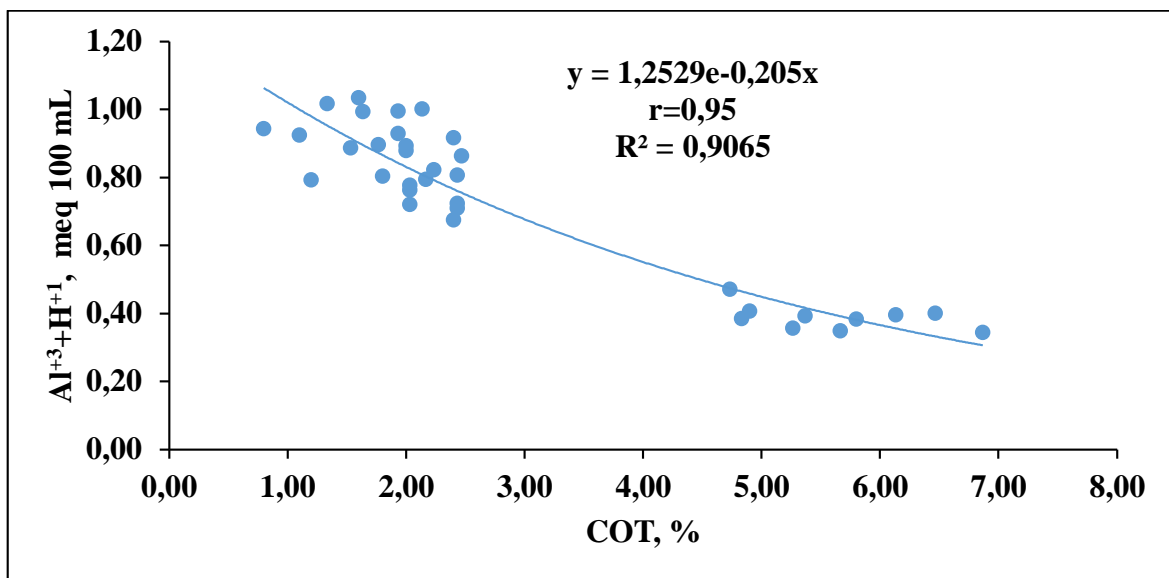
La materia orgánica, indica el volumen ocupado por la porosidad, pero no aporta información de la morfología y tamaño de los poros, los cuales forman la estructura y agregados del suelo (González *et al.*, 2012). Esta variable favorece a aumentar perceptiblemente la porosidad, es por tanto que los suelos disueltos tienen mayor porosidad (Muñoz *et al.*, 2013). De acuerdo a la tabla 2, se presentan correlaciones positivo alto y mediano para las variables, Pa: Porosidad de aireación 0,460; 0,484 y Pr: Porosidad de retención 0,813; 0,832, en cuanto a la relación con el % COT y % Nt (Figura 18).



**Figura 18.-** Relación carbono orgánico total (COT, %) y porosidad total (Pt, %).

#### 4.3.5 Carbono orgánico total y acidez intercambiable.

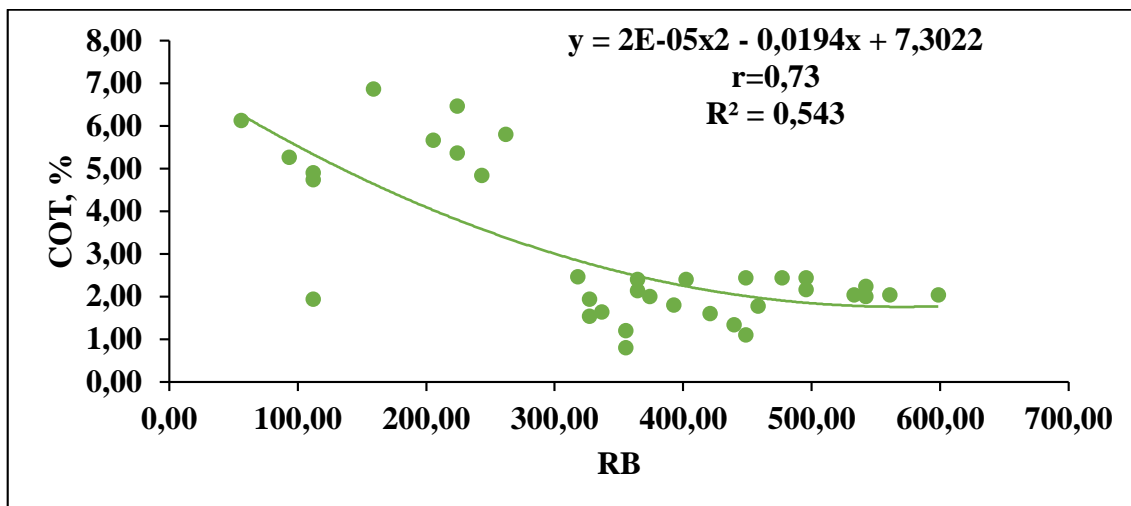
Las relaciones entre las variables carbono orgánico total COT y nitrógeno total Nt, con respecto a la acidez intercambiable y aluminio intercambiable, se presentan un grado de asociación negativa media (Figura 19). Asumiendo cuando una de estas variables tanto COT y Nt, aumentan la acidez intercambiable disminuye, como se presentó en tabla 2 de correlaciones. Estas correlaciones de deben a que el ion de aluminio  $Al^{+3}$  presenta una parte mínima de la acidez total en muchos de los suelos orgánicos, por motivo a que estos suelos son altos en hidrogeno  $H^{+1}$ , pero contienen escaso  $Al^{+3}$ , el cual es procedente del silicato (Calva *et al.*, 2017).



**Figura 19.-** Relación carbono orgánico total (COT, %) y acidez intercambiable ( $Al^{+3}+H^{+1}$ , meq 100 mL).

#### 4.3.6 Respiración basal y carbono orgánico total.

La relación entre la variable RB: Respiración basal, es semejante entre las variables nitrógeno total Nt -0,703 y carbono orgánico total COT -0,705, mostrando un grado de asociación negativa alta (Figura 20). Mientras aumenta la respiración basal atribuida por la asimilación de  $CO_2$  por los microorganismos, se disminuye la concentración de carbono en el suelo. La porosidad aumenta el movimiento del aire asumiendo condiciones idóneas a la actividad de los organismos, esto a su vez se relaciona con el contenido de materia orgánica que ocupa dichos poros.



**Figura 20.-** Relación respiración basal (RB) y el carbono orgánico total (COT, %).

#### 4.4 Secuestro de carbono bajo distintos usos de la tierra

##### 4.4.1 Carbono Total Almacenado y retención de CO<sub>2</sub>

Para la cuantificación de las variables, se dedujeron a partir de los parámetros, densidad aparente  $D_a$  y carbono orgánico total COT para estimar el peso total en cada área de estudio, y ponderarlos a kilogramos kg o Metagramos Mg (Tabla 3).

**Tabla 3.-** Caracterización de variables para la cuantificación y valoración de carbono y calidad del suelo.

Variables	Usos de la tierra						
	CAF1	CAF2	CAF3	CMC1	CMC2	CMC3	BS
<b>Mg C ha<sup>-1</sup></b>	42,38 ± 15,77 (b)	46,57 ± 4,70 (b)	48,69 ± 12,40 8 (b)	49,7 ± 3,62 (b)	55,66 ± 10,04 8 (a)	70,82 ± 4,49 (a)	58,68 ± 2,97 (a)
<b>kg Nt ha<sup>-1</sup></b>	16,95 ± 6,31 (b)	18,63 ± 1,88 (b)	19,48 ± 4,96 (b)	19,88 ± 1,45 (b)	22,66 ± 4,02 (a)	28,33 ± 1,80 (a)	23,43 ± 1,19 (a)
<b>Kg P ha<sup>-1</sup></b>	6,45 ± 1,85 (b)	13,94 ± 3,36 (a)	12,51 ± 3,58 (a)	6,42 ± 1,05 (b)	12,41 ± 4,22 (a)	2,6 ± 0,89 (b)	1,51 ± 0,33 (b)
<b>Kg K ha<sup>-1</sup></b>	128,61 ± 21,58 (b)	109,71 ± 17,37 (b)	126,4 ± 24,42 (b)	153,49 ± 33,45 (b)	303,53 ± 86,87 (a)	48,53 ± 20,66 ©	34,89 ± 11,44 (d)

Carbono orgánico total (Mg C ha<sup>-1</sup>); Nitrógeno total (kg Nt ha<sup>-1</sup>); Cantidad de fósforo (Kg P ha<sup>-1</sup>); Cantidad de potasio (Kg K ha<sup>-1</sup>).



La variable carbono orgánico total ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ), presentó rangos que oscilaron de 42,38% CAF1 (b) a 58,68% BS (a), con diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) descritas en dos grupos a y b. En cuanto a la variación de nitrógeno ( $\text{kg Nt ha}^{-1}$ ), los datos estuvieron entre 10 y 30%, un menor valor se obtuvo con (CAF1) 16,95 (b) ( $\text{kg Nt ha}^{-1}$ ) con respecto al uso de bosque secundario 23,43 (a) ( $\text{kg Nt ha}^{-1}$ ). La cantidad de fósforo menor se haya en el bosque secundario 1,51 (b) ( $\text{Kg P ha}^{-1}$ ) y un mayor valor en el sistema agroforestal 2 13,94 (a) ( $\text{Kg P ha}^{-1}$ ). El nutriente potasio presenta un grado de asociación de  $P < 0,05$  diferente a las demás variables, con cuatro grupos a, b, c, d de diferencias significativas.

Evaluar las reservas de biomasa (Biomasa aérea,  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en los bosque es un método eficaz para estimar la cantidad de carbono almacenado es dichas estructuras vivas en diferentes períodos, y así valorar su contribución al ciclo del carbono (Vásquez *et al.*, 2012). Estudios reflejan que la biomasa arbórea contiene  $380 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono almacenado, pero la extracción de la madera de un ecosistema boscoso, para llevarlos cambios de manejo de suelo reduce a 100 y  $156 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biomasa aérea (Burton *et al.*, 2013). Los ecosistemas amazónicos sufren una gran presión antrópica, al ser la extracción de madera un mecanismo fundamental en la economía de las comunidades locales y, también en la economía de la nación (Mogrovejo, 2017).

Para la retención de  $\text{CO}_2$  en el suelo ( $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ) este valor se atribuye al multiplicar por la fracción de  $\text{CO}_2$  equivalente 3,67. La capacidad de retención de  $\text{CO}_2$ , está relacionado directamente con el uso de la tierra como se detalla en la tabla 4, se presenta valores bajos en el sistema de cultivo agroforestal, 19,66 ( $\text{Mg CO}_2/\text{ha}^{-1}$ ) CAF1, 35,25 ( $\text{Mg CO}_2/\text{ha}^{-1}$ ) CAF3 y 49,58 ( $\text{Mg CO}_2/\text{ha}^{-1}$ ) CAF2 con respecto al bosque secundario  $356,51 \text{ (Mg CO}_2/\text{ha}^{-1})$  BS. También se relaciona con la variación en el clima y el incremento del  $\text{CO}_2$  atmosférico (Ibrahim *et al.*, 2006). A su vez el aumento de carbono ( $\text{Mg C}$ ) no solo depende de las circunstancias ambientales, pero se ve potentemente afectado por el manejo del suelo (Martínez *et al.*, 2008). El cambio de uso de la tierra puede causar cambios en el stock de C.

**Tabla 4.-** Carbono total almacenado y retención de CO<sub>2</sub>.

<b>USO DE LA TIERRA</b>	<b>Mg ha Biomasa aérea</b>	<b>Mg C ha Biomasa aérea</b>	<b>Mg CO<sub>2</sub>/ha</b>	<b>C Mg Hojarasca</b>	<b>Mg C Suelo 0-30 cm</b>	<b>C. Total Almacenado Mg ha</b>
<b>CAF1</b>	10,72	5,36	19,66	2,04	42,38	49,78
<b>CAF2</b>	27,02	13,51	49,58	2,87	46,57	62,94
<b>CAF3</b>	20,85	10,42	38,25	2,39	48,69	61,50
<b>CMC1</b>	0,00	0,00	0,00	2,09	49,70	51,78
<b>CMC2</b>	0,00	0,00	0,00	2,08	56,66	58,73
<b>CMC3</b>	0,00	0,00	0,00	2,33	70,82	73,15
<b>BS</b>	194,28	97,14	356,51	2,95	58,68	158,77

CAF: Cacao agroforestal; CMC: Cacao monocultivo; BS: Bosque secundario.

Estudios realizados por otros investigadores reportan una disminución en el stock de carbono en el suelo entre 8 a 42% cuando hay conversión de bosques a sistemas de cultivo (Bravo *et al.*, 2017). El 75% del carbono orgánico del suelo se confina entre los 20 y 80 cm (Miranda *et al.*, 2007). Este componente es sustancial al ciclo global del carbono, presentando un 69,8 % del C orgánico de la biosfera (FAO, 2002).

El suelo puede actuar como fuente o depósito de carbono dependiendo de su uso y manejo (Martínez *et al.*, 2008). El carbono total almacenado depende de dos variables esenciales a) la concentración de carbono orgánico en suelo COT y b) la densidad aparente Da (Andrade *et al.*, 2003). Dicha variable expresada en Mg ha<sup>-1</sup>, tiene un mayor índice en el bosque secundario 158,77, con respecto a los sistemas de cultivo de cacao agroforestal y monocultivo. En la actividad forestal los bosque son calificados como una eventualidad de oprimir las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI), a su vez su potencial para aumentar la retención de carbono y así que contribuya con la mitigación del cambio climático (Ajete *et al.*, 2012). Terminar con la deforestación tiene una gran importancia para reducir y secuestrar emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, a su vez es una actividad que tienen variadas ventajas para el desarrollo sostenible (Pedroni *et al.*, 2003). En base a este antecedente es importante detener la deforestación, ya que implica la pérdida o disminución de varios servicios que proporciona el ecosistema o a su vez proponer cambios de uso de la tierra como los sistemas agroforestales.

#### 4.5 Valoración del secuestro de carbono bajo distintos usos de la tierra

El valor económico para este estudio fue estimado a un precio de mercado de 125\$ por Mg, debido a que las concentraciones de carbono en el suelo no tuvieron variaciones en los datos se refleja el valor económico de \$ 5297,21 Mg CAF1 a \$ 7334,93 Mg BS (Tabla 5). EL nitrógeno es considerado de los más propios nutrientes, debido a que juega un importante rol en la obtención de altos beneficios (Calva *et al.*, 2017). Varios estudios se han ejecutado con el objetivo de valorar la mejor dosis de fertilización nitrogenada, con el objetivo de economizar costos en la aplicación de fertilizantes en la agricultura (Volverás *et al.*, 2016). El valor económico del nitrógeno total ( $\text{kg Nt ha}^{-1}$ ) es de 1,08 el kg, este valor varía de 18 a 30\$ en los usos de la tierra estudiados. Establecer la dosis de fertilización fosforada que origina el máximo beneficio económico. La reserva de fósforo en el suelo previo a la siembra es el componente definitivo para precisar la dosis de fertilizante fosfatado en el cultivo (Zamune *et al.*, 2018). Para el fósforo ponderó un precio de mercado de \$ 0,95 por Kg, presentando una contribución económica baja. Con respecto al potasio a pesar de tener un valor de mercado bajo 1,16 x kg, los suelos presentan valores altos de 153,49 CMC3 a 34,89 BS, por ello su aporte económico aumenta. En contexto general los sistemas de cultivo cacao agroforestal y cacao monocultivo tiene una contribución económica total  $\text{ha}^{-1}$  de \$ 47949,67.

El carbono secuestrado halla valor en un mercado, a partir del apareamiento de los Proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), los cuales, en la totalidad de los casos, son criticados por convertirse en una exoneración de la responsabilidad de cada nación con el problema del cambio global (Miranda *et al.*, 2007).

La valoración del servicio ecosistémico de regulación del clima varia de 2 a 268 \$  $\text{ha} / \text{ha}^{-1} / \text{año}^{-1}$ . El costo del secuestro de carbono en varios contextos basado en el precio de mercado varía desde \$ 20 a \$ 268 /  $\text{ha}^{-1} / \text{año}^{-1}$  (Jónsson *et al.*, 2016). De acuerdo al Banco Mundial el precio del carbono presenta una variabilidad significativa, alcanzando valores máximos de \$130  $\text{t}/\text{CO}_2$  y valores bajos de \$1  $\text{t}/\text{CO}_2$ . A su vez, el 85% de las emisiones a nivel mundial son mercantilizadas a un precio medio de \$10  $\text{t}/\text{CO}_2$  (Banco Mundial, 2016). El pago de servicios ambientales por fijación y acopio de carbono simboliza una opción para dar valor adherido a la producción, lo que podría tener una gran importancia para los productores (González *et al.*, 2013)

**Tabla 5.-** Valoración del secuestro de carbono e índices nutricionales, en base a tasas de mercado.

Usos de la tierra	COT Mg Ha <sup>-1</sup>	Precio de Mercado \$ x Mg	Valor Económico \$	Nitrógeno Inorgánico Nt kg ha <sup>-1</sup>	Precio de Mercado \$ x Kg	Valor Económico \$	Cantidad Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) kg ha <sup>-1</sup>	Precio de Mercado \$ x Kg	Valor Económico \$	Cantidad Potasio (K <sub>2</sub> O) kg ha <sup>-1</sup>	Precio de Mercado \$ xKg	Valor Económico \$ ha <sup>-1</sup>	Valor Económico Total \$ ha <sup>-1</sup>
<b>CAF1</b>	42,38	125,00	5297,21	16,95	1,08	18,31	6,45	0,95	6,13	128,61	1,16	149,19	5470,84
<b>CAF2</b>	46,57	125,00	5820,73	18,63	1,08	20,12	13,94	0,95	13,25	109,71	1,16	127,26	5981,35
<b>CAF3</b>	48,69	125,00	6086,21	19,48	1,08	21,03	12,51	0,95	11,88	126,40	1,16	146,63	6265,75
<b>CMC1</b>	49,70	125,00	6211,89	19,88	1,08	21,47	6,42	0,95	6,10	153,49	1,16	178,05	6417,50
<b>CMC2</b>	56,66	125,00	7082,04	22,66	1,08	24,48	12,41	0,95	11,79	303,53	1,16	352,10	7470,40
<b>CMC3</b>	70,82	125,00	8852,28	28,33	1,08	30,59	2,60	0,95	2,47	48,53	1,16	56,29	8941,63
<b>BS</b>	58,68	125,00	7334,93	23,47	1,08	25,35	1,51	0,95	1,44	34,89	1,16	40,47	7402,18

CAF: Cacao agroforestal; CMC: Cacao monocultivo; BS: Bosque secundario; Carbono orgánico total (Mg C ha<sup>-1</sup>); Nitrógeno total (kg Nt ha<sup>-1</sup>); Cantidad de fósforo (Kg P ha<sup>-1</sup>); Cantidad de potasio (Kg K ha<sup>-1</sup>). Precio de mercado \$ por Meta gramos (Mg).

La valoración a la estimación de CO<sub>2</sub> equivalente, tanto como reservorio, secuestro de carbono y emisión a la atmósfera, relacionada a los gases de efecto invernadero (GEI) está valorada en un precio de mercado de 15\$ x Mg, semejante a lo descrito por el Banco Mundial \$10 t/CO<sub>2</sub>; Mg/CO<sub>2</sub> (Banco Mundial, 2016). Se presentó un valor económico alto al uso de la tierra Bosque secundario con una contribución de \$ 5347,67. Desde una perspectiva general la contribución económica en los usos de la tierra fue de \$ 6960,16, en la cual se mitigan más de 464,01 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente /ha<sup>-1</sup> (Tabla 6). En base a estos valores, se puede deducir la recuperación y mantenimiento del bosque secundario y los sistemas de cultivo, por ello se debe controlar con planes de reforestación que se compensarían con el pago del servicio ambiental del secuestro de carbono.

**Tabla 6.-** Valoración económica de la biomasa aérea.

Usos de la tierra	Mg CO <sub>2</sub> equi Mg Ha <sup>-1</sup>	Precio de Mercado \$ x Mg	Valor Económico \$
Bosque Secundario	356,51	15,00	5347,67
Cacao Agroforestal 2	49,58	15,00	743,74
Cacao Agroforestal 3	38,25	15,00	573,80
Cacao Agroforestal 1	19,66	15,00	294,94

## **CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Se logró describir los diferentes usos de la tierra en base a parámetros físicos, químicos y biológicos, presentando valores adecuados el bosque secundario mientras que el sistema agroforestal y monocultivo de cacao presenta valores bajos en varios parámetros.

Se identificó que el parámetro físico densidad aparente  $D_a$ , se relaciona con 11 variables, siendo de vital importancia, en los procesos de retención de humedad, disponibilidad del agua y nutrientes como el nitrógeno, porosidad y estabilidad de agregados.

Se caracterizó la captura de carbono en los distintos componentes arbóreo (biomasa aérea, Mg ha), hojarasca (C Mg hojarasca), cultivo (CAF, CMC) y BS en los usos de tierra seleccionados. La capacidad de retención de  $CO_2$  de los suelos está relacionada de forma directa con el uso de la tierra, y la posibilidad de oprimir las concentraciones de los gases de efecto invernadero, y así contribuir con la mitigación del cambio climático.

Se determinó el potencial de carbono total almacenado como servicio ecosistémico a los diferentes usos de la tierra, presentando un mayor índice en el bosque secundario  $158,77 \text{ Mg ha}^{-1}$ , lo cual favorece a otros servicios ecosistémicos asociados a una alta presencia de materia orgánica como la fertilidad, el ciclo de nutrientes (soporte), la producción de alimentos y madera (aprovisionamiento).

La valoración económica de la biomasa aérea fue de \$ 6960,16, en la cual se mitigan más de 464,01 toneladas métricas de  $CO_2$  equivalente  $/ha^{-1}$ . La valoración a la estimación de  $CO_2$  equivalente, puede referirse tanto como reservorio (positivo), y emisión (negativo) a la atmósfera, relacionada a los gases de efecto invernadero (GEI).

Es importante detener la deforestación, ya que implica la pérdida o disminución de varios servicios que proporciona el ecosistema o a su vez proponer cambios de uso de la tierra como los sistemas agroforestales.

## **5. 2 Recomendaciones**

De acuerdo a los resultados obtenidos, se plantea las siguientes recomendaciones:

Es factible que se realice una caracterización de manera integral en base a parámetros físicos, químicos, y biológicos previo a implementar un sistema de producción como es el cacao en la zona para así evitar impactos ambientales como la degradación de los suelos.

Debido a la creciente disminución de la cobertura boscosa en el área de estudio, se recomienda trabajar en temas de capacitación ambiental donde los participantes de las zonas puedan ver la situación actual y los cambios que se están dando a nivel del uso de la tierra.

Para investigaciones del secuestro de carbono en el suelo, se deben realizar tomando como referencia el bosque primario o secundario (depende del área de estudio) el cual ayudará a tener datos confiables del porcentaje de variación entre un sistema boscoso y su actual uso de la tierra.

## CAPÍTULO VI BIBLIOGRAFÍA

- Alonso-F, Ana Milena, Finegan, Bryan, Brenes, Christian, Günter, Sven, & Palomeque, Ximena. (2017). Evaluación de la conectividad estructural y funcional en el corredor de conservación Podocarpus-Yacuambi, Ecuador. *Caldasia*, 39(1), 140-156. <https://dx.doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.64324>
- Hernán J. Andrade & Muhammad Ibrahim. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* Vol. 10 N° 39-40.
- Banco Mundial. (2016). Estado y tendencias del precio del carbono 2016.
- Batjes, N.H. (1999). Management options for reducing CO<sub>2</sub> - concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. ISRIC. Wageningen, The Netherlands. 114 pp.
- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J.-M., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). *Servicios ambientales de los sistemas agroforestales* (Vol. 10).
- Bravo, C. (2015). Manejo del recurso suelo bajo agroecosistemas ganaderos. En: Retos y posibilidades para una ganadería sostenible en la provincia de Pastaza de la Amazonía Ecuatoriana. Universidad Estatal Amazónica. Puyo-Pastaza. 15-45 pp.
- Bravo, C. Diócleides, B. Vargas, J. Alemán, R. Torres, B & Marín, H. (2015). Caracterización socio-ambiental de unidades de producción agropecuaria en la Región Amazónica Ecuatoriana: Caso Pastaza y Napo. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología* Volumen 4 N°1- (Pag 3-31). Obtenido de Universidad Estatal Amazónica:  
[https://www.uea.edu.ec/revista/images/ARTICULOS6/ARTICULO\\_1\\_VOL\\_4%20N\\_1.pdf](https://www.uea.edu.ec/revista/images/ARTICULOS6/ARTICULO_1_VOL_4%20N_1.pdf)
- Bravo, C; Torres, B; Changoluisa, D; Marin, H, Alemán, R and Torres, R. (2016). Environmental impact of livestock systems in the Ecuadorian amazon. Evento Mol2Net. MODEC 2016.[doi:10.3390/MOL2NET-02-M](https://doi.org/10.3390/MOL2NET-02-M).
- Bravo, C. Ramírez, A. Marín, H. Torres, B. Alemán, R. Torres, R. Navarrete, H & Changoluisa, D. (2017). Factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la Región Amazónica Ecuatoriana. Volumen 18 N° 11. Obtenido de REDVET: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n111117/111705.pdf>
- Bravo-Medina, Carlos, Marín, Haideé, Marrero-Labrador, Pablo, Ruiz, María E, Torres-Navarrete, Bolier, Navarrete-Alvarado, Henry, Durazno-Alvarado, Galo, & Changoluisa-Vargas, Daisy. (2017). Evaluación de la sustentabilidad mediante indicadores en unidades de producción de la provincia de Napo, Amazonía Ecuatoriana. *Bioagro*, 29(1), 23-36.



- Bravo, C. Torres, B. Alemán, R. Changoluisa, D. Marín, H. Reyes, H & Navarrete, H. (2017). Estructura del suelo y secuestro de carbono como servicios ecosistémicos bajo diferentes usos de la tierra en la región amazónica ecuatoriana. Sciforum; MOL2NET, Serie de conferencias internacionales sobre ciencias multidisciplinarias.
- Brissio, P. A. (2005). Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera. (Tesis Licenciatura). Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <http://www.tesis.bioetica.org/pab.htm>
- Burton J.I., Ares A., Olson D.H. y Puettmann K.J. (2013). Management trade-off between aboveground carbon storage and understory plant species richness in temperate forests *Ecological Applications* 23:1297-1310.
- Calva, C & Espinosa, J. (2017). Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. *Siembra* 4 (1) (2017) 110–120.
- Callo, C. krishnamurthy, L & Alegre, J. (2001). Cuantificación de carbono secuestrado por algunos saf's y testigos, en tre pisos ecológicos en la amazonía del Perú. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre del 2001 Valdivia-Chile.
- Camacho.V, & Ruíz.A. (2012). Marco coceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. Vol.1 Núm. 4 Año 2 Páginas 3 a 15. Obtenido de Revista Bio Ciencias :<http://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/download/19/17>
- Casanova, F. Petit, J & Solorio, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(1): 5-118.
- Casierra, F., & Aguilar, O. (2007). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246-257.
- CIFOR (2013). Bosques y mitigación del cambio climático. Lo que deberían saber los formuladores de políticas.
- Donado, L. (2004). Modelo de Conductividad Hidraulica en Suelos. Modelo de Conductividad Hidraulica en Suelos. Bogota D.C., Colombia.
- Eguren. (2004). El Mercado de Carbono en América Latina y El Caribe: Balance y Perspectivas. Disponible en línea en: <http://ftp.fao.org/docrep/nonfao/LEAD/X6367s/x6367s00.pdf>. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 83. Marzo [Santiago de Chile].
- Etcheverría.P, & Barahona.V. (2017). Una base más estable el secuestro de carbono en los suelos como alternativa de adaptación al cambio climático. Obtenido de Inia:

[http://www.inia.cl/wp-content/uploads/2017/06/INIA-secuestro-de-carbono-91-MundoAgro\\_Jun2017.pdf](http://www.inia.cl/wp-content/uploads/2017/06/INIA-secuestro-de-carbono-91-MundoAgro_Jun2017.pdf)

- Evaluación de Ecosistemas del Milenio. (2005). Ecosistema y bienestar humano: Síntesis. Island Press. Washington DC
- FAO. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo del suelo. Obtenido de Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. ISBN 92-5-304690-2: <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>
- FAO. (2012). Los bosques y el cambio climático. 15 de 06 de 2012. <http://www.fao.org/forestry/climatechange/53459/es/>
- FAO. (2015). Las funciones del suelo. Recuperado el 01 de 06 de 2018, de Fao.org: <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/294325/>
- García, M. (2016). La deforestación: una práctica que agota nuestra biodiversidad. *Producción + Limpia*, 11(2), 161-168. <https://dx.doi.org/10.22507/pml.v11n2a13>
- GeoEcuador. (2008). Informe sobre el estado del medio ambiente. Obtenido de flacsoandes: <http://www.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/41444.pdf>
- Gómez-García, Esteban, & Pérez-Rodríguez, Fernando. (2015). Evolución de la biomasa y del carbono acumulado por *Quercus robur* en Galicia (España). *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 255-264. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200011>
- González, D & Figueroa, J. (2013). Valoración del Servicio Ecosistémico Secuestro de Carbono, como una vía para contribuir con el Desarrollo Sostenible de un país. Caso: Venezuela. . LACCEI; Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.
- González-Barrios, José Luis; González-Cervantes, Guillermo; Chávez-Ramírez, Eduardo. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 1.
- Granda, P. (2005). Sumidero de carbono en los Andes Ecuatorianos. Obtenido de Acción Ecológica. Impactos de las plantaciones forestales del proyecto Holandes FACE-PROFAFOR sobre comunidades indígenas y campesinas: [https://wrm.org.uy/es/files/2013/04/Sumideros\\_de\\_carbono\\_en\\_los\\_Andes\\_ecuatorianos.pdf](https://wrm.org.uy/es/files/2013/04/Sumideros_de_carbono_en_los_Andes_ecuatorianos.pdf)
- Ibrahim, M. Chacón, M. Cuartas, C. Naranjo, J. Ponce, G. Vega. P. Casasola, F & Rojas, J. (2006). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* N° 45.
- INEC. (2013). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC. Obtenido de Ecuador en cifras:

[http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac%202013/InformeEjecutivoESPAC2013.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac%202013/InformeEjecutivoESPAC2013.pdf)

- Iwan, A., Guerrero, E.M., Romanelli, A. & Bocanegra, E. (2017). Valoración económica de los servicios ecosistémicos de una Laguna del sudeste bonaerense (Argentina). *Investigaciones Geográficas*, (68), 173-189. <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.68.10>
- Jadán O., Torres B and Sven G. (2012). Influencia del uso de la tierra sobre el almacenamiento de carbono en sistemas productivos y bosque primario en Napo, Reserva de Biosfera Sumaco, Ecuador. *Revista Amazónica: Ciencia y Tecnología* 1(3): 173-185.
- Jaramillo. (2007). El ciclo global del carbono. Instituto nacional de ecología y cambio climático.
- Jónsson, J & Brynhildur D. (2016). Clasificación y valoración de los servicios ecosistémicos del suelo. ELSEVIER, *Sistemas agrícolas*.
- López. (2016). Servicios Ecosistémicos del suelo. Pag 10. Obtenido de Agrocalidad-Revista científica Ecuatoriana: <http://www.agrocalidad.gob.ec/revistaecuadorescalidad/index.php/revista/article/view/49/90>
- MAE. (2013). Sistema nacional de control forestal. Obtenido de Ministerio del Ambiente, a través de la Subsecretaría de Patrimonio Natural (SPN): <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/CONTROL-FORESTAL.pdf>
- Martínez H, Eduardo, Fuentes E, Juan Pablo, & Acevedo H, Edmundo. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Mayrand, K. & Paquin, M. (2004). Pago por Servicios Ambientales: Estudio y Evaluación de Esquemas Vigentes. Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). Montreal. Unífera. Centre International Centre.
- Ministerio del Ambiente, (2012). Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental, Quito-Ecuador.
- Ministerio de Ambiente. Bosques para el Buen Vivir - Plan de Acción REDD+ Ecuador (2016-2025). Quito, 2016, 223.
- Miranda, Taymer, Machado, R, Machado, Hilda, & Duquesne, P. (2007). Carbono secuestrado en ecosistemas agropecuarios cubanos y su valoración económica.: Estudio de caso. *Pastos y Forrajes*, 30(4) Recuperado en 31 de mayo de 2018, de

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942007000400007&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942007000400007&lng=es&tlng=es).

- Mogrovejo, P. (2017). Bosques y cambio climático en Ecuador: el regente forestal como actor clave en la mitigación del cambio climático. Obtenido de Universidad Andina Simón Bolívar. Programa de Maestría en Cambio Climático y Negociación Ambiental: <http://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5862/1/T2432-MCCNA-Mogrovejo-Bosques.pdf>
- Muñoz Iniestra, Daniel Jesús; Ferreira Ramírez, Marisol; Escalante Arriaga, Ingrid Berenice; López García, José. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, vol. 31, núm. 3, pp. 201-210 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Murcia, R. & Reyes, P. (2008). Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del bosque alto andino en la cuenca del río pamplonita, Colombia. *Caldasia* 30(2):337-353.
- Pacha. (2014). Valoración de los servicios ecosistémicos como herramienta para la toma de decisiones: Bases conceptuales y lecciones aprendidas en la Amazonía. *Iniciativa Amazonía Viva*, <https://www.naturalcapitalproject.org/wp-content/uploads/2017/05/Valoracio%CC%81n-de-los-servicios-ecosiste%CC%81micos-como-herramienta-para-la-toma-de-decisiones.pdf>.
- PDYOT. (2014). "Plan de desarrollo y ordenamiento territorial (pdyot) del cantón Carlos Julio Arosemena Tola. Obtenido de Sistema nacional de información: [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdiagnostico/1560184810001\\_PD YOT%20-%202014%20-%20DIAGN%C3%93STICO\\_11-03-2015\\_19-11-52.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1560184810001_PD YOT%20-%202014%20-%20DIAGN%C3%93STICO_11-03-2015_19-11-52.pdf)
- Pedroni, L.; Parra, A.; Elsam, R.; Penayo, K.; Rodas, O. (2003). Marco conceptual y diseño de un estudio de carbono para el área protegida de San Rafael. Asunción, Guyra Paraguay: PY. CATIE.
- Peña Venegas, Clara Patricia, Mendoza Olmos, Edmundo Rafael, Rodríguez León, Carlos Hernando, Cardona Vanegas, Gladys Inés, Betancurt Parra, Bernardo Eusebio, & Garzón Gómez, Maolenmarx Tatiana. (2015). Carbon fixing capacity of amazonian soils in relation to its degradation conditions. *Revista EIA*, (spe2), 47-53. Retrieved May 23, 2018, from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372015000300004&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000300004&lng=en&tlng=en).
- PNUMA. (2002). *Perspectivas del medio ambiente mundial "Pasado, presente y futuro"*. Obtenido de unep: [https://web.unep.org/geo/sites/unep.org.geo/files/documents/prelims\\_es.pdf](https://web.unep.org/geo/sites/unep.org.geo/files/documents/prelims_es.pdf)

- Quiñe. (2009). “Cuantificación de biomasa y reserva de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) En dos pisos altitudinales. Universidad nacional de san Martín - Tarapoto. Perú.
- Ramírez, A & Moreno, F. (2008). Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). Revista facultad nacional de agronomía Medellín 61(1):4381-4393.
- Rodríguez García, Laura, Curetti, Giorgio, Garegnani, Giulia, Grilli, Gianluca, Pastorella, Fabio, & Paletto, Alessandro. (2016). La valoración de los servicios ecosistémicos en los ecosistemas forestales: un caso de estudio en Los Alpes Italianos. Bosque (Valdivia), 37(1), 41-52. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000100005>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonía colombiana. Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 18(3), 529-541
- Ruiz, Jorge, Cárdenas, Wilmar, & Baquero, Claudia. (2011). Deforestación y dinámica del bosque secundario en la Amazonía colombiana 1986-2000. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 35(137), 531-545. Retrieved May 23, 2018, from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-39082011000400010&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000400010&lng=en&tlng=es).
- Salamanca et al. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. Cenicafé 56(4):381-397.
- Torres, B.; F. Starnfeld; J. C. Vargas; G. Ramm; R. Chapalbay; M. Ríos; A. Gómez; Y. Torricelli; I. Jurrius; A. Tapia; J. Shiguango; A. Torres; C. Velasco, A. Murgueytio and S.D. Cordoba-Bahle. (2014). Gobernanza participativa en la Amazonía del Ecuador: recursos naturales y desarrollo sostenible. Universidad Estatal Amazónica, Ministerio del Ambiente del Ecuador, Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Napo y Cooperación Alemana al Desarrollo. Puyo, Ecuador. P.12
- Uvidia, H., J.L. Ramírez, I. Leonard, J.C. Vargas, D. Verdecia y M. Andino. 2015. Inventario de la sucesión secundaria en la provincia de Pastaza, Ecuador. Revista Electrónica de Veterinaria 16(11): 1-8.
- Vásquez, A & Arellano, H. (2012). Estructura, Biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de córdoba. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 923-961.
- Vásquez, J. R., F. Macías y J. C. Menjivar. (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el departamento del Magdalena, Colombia. Bioagro 25 (3): 175-180

- Volverás, B. Amézquita, E. Campo, J. (2016). Indicadores de calidad física de suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*. 17(3):361-377.
- Yáñez, M. Cantú, I. González, H. Marmolejo, J. Jurado, E & Gómez, M. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Vol. 8 (42) .
- Zamune, Ester Cristina, Lloveras, Jaume, & Echeverría, Hernán Eduardo. (2016). Dosis óptima económica de fósforo en el cultivo de papa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del suelo*, 34(1), 57-65. Recuperado en 08 de junio de 2018, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672016000100006&lng=es&tlng=](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672016000100006&lng=es&tlng=)