

**DETERMINACIÓN DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN SISTEMAS BOVINOS  
BASADOS EN SILVOPASTOREO Y PRADERAS SIN ÁRBOLES EN BOSQUE  
SECO TROPICAL DEL DEPARTAMENTO DEL HUILA – COLOMBIA**

DAVID ESTEBAN ZULUAGA DURANGO.

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS  
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE  
MANIZALES**

**2020**

**DETERMINACIÓN DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN SISTEMAS BOVINOS  
BASADOS EN SILVOPASTOREO Y PRADERAS SIN ÁRBOLES EN BOSQUE SECO  
TROPICAL DEL DEPARTAMENTO DEL HUILA – COLOMBIA**

DAVID ESTEBAN ZULUAGA DURANGO.

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:

PhD. Jorge William Arboleda V

Asesor

MSc. Santiago Ángel Botero

Línea De Investigación:

Biosistemas integrados

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS  
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE  
MANIZALES**

**2020**

## **DEDICATORIA**

*A mis padres y hermano por su infinito amor y apoyo incondicional, los amo.*

*A mi esposa Camila que siempre esta a mi lado con una sonrisa.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi amigo Santiago Ángel Botero quien apoyo desde el inicio mi idea, brindo valiosas enseñanzas y aportes para finalizar esta investigación.

Al director de mi trabajo doctor Jorge Arboleda por sus valiosos aportes.

A los productores por permitir realizar las mediciones en sus predios.

A todas las personas que me apoyaron en el proceso de investigación, infinitas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
2.	JUSTIFICACIÓN.....	10
3.	OBJETIVOS.....	12
3.1.	Objetivo general .....	12
3.2.	Objetivos específicos .....	12
4.	MARCO TEÓRICO .....	13
4.1.	Ganadería en Colombia .....	13
4.2.	Sistemas Silvopastoriles .....	14
4.3.	Cambio Climático.....	15
4.4.	Ciclo del Carbono.....	16
4.5.	Métodos para estimar carbono almacenado.....	16
4.5.1.	Evaluación de la biomasa aérea .....	18
4.5.2.	Evaluación del carbono orgánico en suelo.....	19
5.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	20
5.1.	Localización del área de estudio y métodos estadísticos.....	20
5.2.	Tratamientos (Usos del suelo evaluados) .....	22
5.2.1.	Sistemas Silvopastoriles (SSP).....	22
5.2.2.	Sistema Sin Árboles - Tradicional (SSA) .....	22
5.3.	Metodologías de medición.....	22
5.3.1.	Componente Arbustivo .....	22
5.3.2.	Biomasa y Carbono Total del componente arbustivo .....	24
5.3.3.	Biomasa y carbono total de la pastura.....	24
5.3.4.	Almacenamiento de carbono en suelos .....	25
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
6.1.	Biomasa y carbono total del componente arbóreo.....	27
6.2.	Biomasa aérea y carbono total en gramíneas.....	29
6.3.	Carbono Orgánico en Suelo (COS) .....	30
6.4.	Carbono total en los sistemas evaluados .....	31
7.	ANÁLISIS DE RECONVERSIÓN DE PRADERA SIN ARBOLES A SISTEMAS SILVOPASTORILES EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA .....	36
7.1.	Coberturas y usos del departamento del Huila .....	36
7.2.	Análisis de posibles escenarios para la captura de carbono en usos del suelo asociados a ganadería en el departamento del Huila. ....	39
7.3.	Potencial de mitigación de emisiones de GEI de las coberturas asociadas a ganadería en el departamento. ....	40
8.	CONCLUSIONES .....	42
9.	RECOMENDACIONES .....	43
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación geográfica de los predios estudiados .....	20
Figura 2. Esquema de las parcelas para el muestreo. ....	23
Figura 3. Parcela para el muestreo de pastos. ....	25
Figura 4. Minicalicata para la muestra de suelo para determinación de densidad aparente y Carbono Orgánico COS. ....	26
Figura 5. Diagrama de caja y bigotes del contenido de carbono total en los tratamientos evaluados. ....	32
Figura 6 Mapa de cobertura boscosa del departamento del Huila. ....	37
Figura 7 Área de producción agropecuaria del departamento del Huila.....	38
Figura 8 Distribución de las emisiones de GEI en el departamento del Huila.....	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Compartimientos de almacenamiento de carbono. ....	17
Tabla 2. Localización geográfica y altitud de los predios evaluados.....	21
Tabla 3. Diámetro promedio a 30 cm del suelo en los árboles de Leucaena* de los 7 predios evaluados. ....	27
Tabla 4. Biomasa total y carbono almacenado en los arbustos de Leucaena en los 7 predios evaluados. ....	28
Tabla 5. Carbono total almacenado en la biomasa de la pastura en SSP y SSA de los predios evaluados. ....	29
Tabla 6. Contenido de Carbono Orgánico almacenado en el suelo a 50 centímetros de profundidad en SSP y sistemas sin árboles. ....	30
Tabla 7. Inventario de carbono total en los dos usos del suelo evaluados. ....	31
Tabla 8 Área destinada a producción de pastos y forrajes en el departamento del Huila.....	37
Tabla 9 Captura de carbono estimada en las coberturas asociadas a la ganadería en el departamento del Huila. ....	39

## RESUMEN

La ganadería es la principal causa directa de deforestación en el departamento del Huila; éste alto índice de deforestación tiene como resultado la liberación inmediata del carbono almacenado en los árboles como emisiones de CO<sub>2</sub>. El dióxido de carbono es uno de los tres (3) principales gases efecto invernadero (GEI) que generan el aumento de la temperatura atmosférica. Lo anterior, demuestra como la ganadería incide de manera importante en el cambio climático global. Debido a esto, se hace necesario determinar cuáles son las reservas de carbono en sistemas bovinos basados en sistemas silvopastoriles y sistemas sin árboles en predios ubicados en el bosque seco tropical del departamento del Huila, para el análisis de escenarios de resiliencia al cambio climático. Para realizar esto se evaluaron 7 predios ubicados en la zona de vida de bosque seco tropical de los municipios de Rivera, Palermo, Campoalegre, Garzón y Tarqui del departamento del Huila; los cuales tenían establecidos sistemas silvopastoriles. En cada uno de los predios se evaluaron 2 praderas (tratamientos) sistema silvopastoril (SSP) y sistema sin árboles - tradicional (SSA). Por cada tratamiento se tomaron muestras de biomasa y muestras de suelo. Para la biomasa aérea, en los sistemas silvopastoriles (asociación de 3.200 árboles/ha de *Leucaena leucocephala* y gramíneas mejoradas), se establecieron parcelas temporales rectangulares de 1.800 m<sup>2</sup>. En cada parcela se demarcaron tres subparcelas circulares de 177 m<sup>2</sup> para la evaluación del carbono en el suelo y dentro de estas tres subparcelas de 50 m<sup>2</sup> se realizó la evaluación de biomasa, donde se marcaron y registraron los diámetros a 30 cm (d<sub>30</sub>) del suelo de todos los árboles de *Leucaena* al interior de la subparcela. Para los sistemas sin árboles se realizaron muestreos destructivos de 1 m<sup>2</sup> de manera aleatoria con 4 repeticiones por parcela, para posteriormente determinar la materia seca. Para el suelo se estimó la cantidad de carbono orgánico tomando una muestra de suelo en cada pradera (SSP y SSA) en 4 profundidades con 3 repeticiones cada uno, tomando muestras disturbadas en



cada sitio para medir el contenido de materia orgánica y determinando la densidad aparente con el método del cilindro, en los mismos sitios anteriores. Posteriormente se procedió a realizar las estimaciones de la biomasa aérea y carbono almacenado empleando el método indirecto de ecuaciones alométricas. Los resultados indican que el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo en los sistemas silvopastoriles evaluados fue de 162,04 t C/ha, encontrándose diferencias significativas con los sistemas sin árboles que en promedio tienen 119,91 t C/ha. La adopción de estos sistemas silvopastoriles en el departamento podría mejorar la capacidad de capturar las emisiones de GEI generadas en 18 años más de lo que actualmente se predice. Estos resultados pueden ser usados como insumo para promover la adopción e implementación de coberturas con mayor captura de carbono como son los sistemas silvopastoriles y/o como insumo para la formulación de esquemas de pago por servicios ambientales en los sistemas de producción bovina, que permitan mitigar en parte las emisiones generadas por la ganadería del departamento del Huila.

### **Palabras claves**

Agroforestería, Biomasa aérea, Cambio Climático, Ganadería, Suelo.

## **Abstract**

Livestock is the main direct cause of deforestation in the department of Huila. High deforestation results in the immediate release of carbon stored in trees as CO<sub>2</sub> emissions. Carbon dioxide is one of the 3 main greenhouse gases that generate the increase in atmospheric temperature. It is evident that livestock influence in an important way on global climate change. Due to this it is necessary to establish what are the carbon reserves in silvopastoral systems and pastures without trees in the tropical dry forest of the department of Huila, for the analysis of climate change resilience scenarios. This was done by evaluating 7 properties located in the municipalities of Rivera, Palermo, Garzón, Tarqui and Campoalegre of the department of Huila; which had established silvopastoral systems and without trees systems - traditional. For each farm, three samples were taken of biomass and three samples of soil. For aerial biomass, in the silvopastoral systems (association of *Leucaena leucocephala* and improved pastures with a planting density of 3200 trees/ha), rectangular temporary plots of 1800 m<sup>2</sup> were established. In each plot, three circular subplots of 177 m<sup>2</sup> were delimited for the evaluation of carbon in the soil and within these three subplots of 50 m<sup>2</sup> the evaluation of biomass was carried out, where diameters were marked and recorded at 30 cm (d<sub>30</sub>) of all the trees of *Leucaena* to the interior of the subplot. For pastures without tree, destructive samplings of 1 m<sup>2</sup> were randomly done with 4 replications per plot, to later determine the dry matter. For the soil, the amount of organic carbon was estimated by taking a soil sample in each meadow (SSP and SSA) at 4 depths with 3 repetitions each, taking disturbed samples at each site to measure the content of organic matter and determining the apparent density with the cylinder method, in the same places above. Subsequently, estimates of the above-ground biomass and carbon stored were made using the indirect allometric equations method. The results

indicate that the carbon stored in the biomass area and soil in silvopastoral systems was higher (162,0 t C/ha), than in the pastures without trees (119,9 t C/ha). Adopting these silvopastoral systems in the department could improve the ability to capture the GHG emissions generated in 18 years more than is currently predicted. These results can be used as input to promote the adoption and implementation of coverage with higher carbon capture such as silvopastoral systems and / or as input for the formulation of payment schemes for environmental services in bovine production systems, which allow to mitigate in part the emissions generated by the livestock of the department of Huila.

**Keywords**

Aerial biomass, Agroforestry systems, Climate change, Livestock, Soil.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción ganadera mundial ha seguido en el mundo una acelerada expansión sobre las regiones de bosques tropicales, desmontando el bosque nativo y remplazándolo por monocultivos de praderas; aumentando la problemática ecológica y ambiental que estas conllevan (Chadid et al., 2015; FAO, 2010; M. Ibrahim et al., 2010; Sotelo et al., 2017), sin tener en cuenta la interacción que debería haber con cada uno de los componentes de los sistemas naturales.

Las emisiones directas de Gases efecto Invernadero de la agricultura se estima en 10 – 12% de las emisiones globales totales, estas emisiones provienen principalmente de la ganadería. (Smith P et al., 2014). De igual manera la actividad ganadera es responsable de un rango importante de emisiones indirectas procedentes del uso de fertilizantes para producir alimento para el ganado y cambios en el uso del suelo a pastizales, donde se estimó que las emisiones generadas de CO<sub>2</sub> ha contribuido con el aumento de la temperatura hasta en 0,03 °C (Reisinger & Clark, 2018)

El departamento del Huila pasó de tener en el año 2005, 567.147 ha de bosque, a tener a 424.771 ha en el año 2017 (IDEAM como se citó en CAM, 2020), lo que genera la liberación inmediata del carbono almacenado en biomasa área y suelo como emisiones de CO<sub>2</sub>, como resultado de la deforestación. Esta transformación antrópica del ecosistema genera la liberación de CO<sub>2</sub> además de pérdida de servicios ecosistémicos como: provisión de agua, pérdida de hábitat de especies fauna y flora, disminución de la regulación hídrica y pérdida de la regulación microclimática.

El área destinada a la producción de pastos y forrajes en el departamento es de 653.012 ha, aproximadamente el 79% son praderas tradicionales (sin arboles), 17% praderas mejoradas, 1%

pastos de corte y finalmente cultivos de forrajes y sistemas silvopastoriles con el 1 % y 0,3% respectivamente (Gobernación del Huila Secretaría de Agricultura y Minería cómo se citó en CAM, 2020). Esto evidencia que la producción bovina departamental en su mayoría es manejada bajo sistemas tradicionales que acentúan aún más la problemática generada por el cambio de cobertura.

Asimismo la deforestación generada por el cambio de cobertura asociada a la ganadería extensiva es responsable de la emisión del 29% de gases de efecto invernadero (GEI) del total de emisiones del departamento del Huila (ONF Andina, 2014). Debido a estos impactos generados por la ganadería en el Huila se hace indispensable evaluar alternativas de producción a la ganadería tradicional, que permita intensificar el uso del suelo, mitigar los efectos adversos generados al ecosistema y reducir la expansión de la frontera agropecuaria, además de mejorar los parámetros productivos y económicos de los sistemas de producción bovina. Una de las alternativas ya implementada son los Sistemas Silvopastoriles, sin embargo actualmente no existe en el departamento información que permita establecer **¿Cuáles son las reservas de carbono en la biomasa aérea y en el suelo en los sistemas bovinos basados en silvopastoreo y en sistemas sin árboles en el bosque seco tropical del departamento del Huila?** y así implementar coberturas que mitiguen los efectos generados por el cambio climático en la zona y plantear alternativas de manejo que permitan mejorar y/o mantener las condiciones iniciales de las mismas.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, los cambios del clima han causado múltiples consecuencias en todo el mundo. En los sistemas naturales los impactos observados del cambio climático han sido impactantes. En muchas regiones, las altas precipitaciones o el derretimiento de hielo y nieve están alterando el recurso hídrico en términos de cantidad y calidad. Muchas especies terrestres, marinas y dulceacuícolas han modificado sus áreas de distribución geográfica, al cambiar por ejemplo sus pautas migratorias, en respuesta al cambio climático en curso (IPCC, 2014a).

Estos impactos son consecuencia de los cambios en el clima generados por las emisiones antropógenas de GEI que continúan en aumento desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico. El dióxido de carbono es uno de los 3 principales gases que genera el aumento de la temperatura atmosférica. El 76% de las emisiones globales de GEI se le atribuyen a este, donde el 11% del total de emisiones de CO<sub>2</sub> son procedentes de la silvicultura y otros usos del suelo en cual se incluye la ganadería (IPCC, 2014a).

Es así como se evidencia que la ganadería incide de manera importante en el cambio climático global, y mayor aún en el departamento del Huila, donde es responsable de la tercera parte del total de emisiones de GEI. Debido a esto se hace necesario establecer cuál es la cantidad de carbono capturado en sistemas silvopastoriles y praderas asociadas a la ganadería en el departamento, que pueda ser usado como insumo para promover la adopción e implementación de coberturas con mayor captura de carbono y/o como insumo para la formulación de esquemas de pago por servicios ambientales – PSA en los sistemas de producción bovina en el departamento, que permitan mitigar en parte las emisiones generadas por la ganadería del departamento en todo su ciclo productivo.

Dentro del plan de desarrollo departamental del Huila, se encuentran definidos los sectores, programas y proyectos priorizados. Uno de los sectores es el de medio ambiente y cambio climático, teniendo varios programas como son gestión de la biodiversidad y el cambio climático, que pueden impactar las metas de producto establecidas en el plan como lo son el proyecto departamental para el pago de servicios ambientales, y las acciones articuladas para el desarrollo del plan del cambio climático Huila 2050 (Gobernación del Huila, 2016).

Actualmente no existe información sobre la captura de carbono en biomasa aérea y en suelo de las diferentes coberturas asociadas a la ganadería en departamento, por esto se hace necesario estimar la cantidad de carbono capturada en sistemas silvopastoriles y praderas en el departamento.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Determinar las reservas de carbono en sistemas bovinos basados en sistemas silvopastoriles y sistemas sin árboles en predios ubicados en el bosque seco tropical del departamento del Huila, para el análisis de escenarios de resiliencia al cambio climático.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Establecer el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo en sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* y en sistemas tradicionales sin árboles.
- Analizar escenarios futuros de cambio climático asociados a la ganadería de la zona, para generar recomendaciones para la implementación de modelos de producción sostenible.



## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Ganadería en Colombia

La ganadería es la actividad más importante del sector agropecuario en Colombia. El área dedicada a ganadería es nueve veces mayor que el área agrícola; constituye el 67% del valor de la producción pecuaria y 30% del valor de la producción agropecuaria (Vergara, 2010). El 70% de la producción bovina en el país es manejada bajo sistemas de producción extensiva con capacidad de carga promedio de 0,9 animales por hectárea y una producción aproximada en sistemas extensivos mejorados, de 134,9 kg de carne/animal/año, equivalentes a 121,4 kg de carne/ ha/año. Estos sistemas extensivos están caracterizados por una baja eficiencia en el uso del suelo, sumado a un gran deterioro ambiental a causa de problemas como la deforestación, las quemas, la erosión, la pérdida de la biodiversidad y la inequidad social (Mahecha, 2003).

Los sistemas de producción desarrollados en el departamento del Huila se caracterizan por ser ganaderías de tipo extensivo (monocultivo de pasto en grandes extensiones) generando impactos negativos en el medio ambiente y con índices económicos y productivos deficientes. El inventario bovino en el departamento asciende a 432.587 bovinos distribuidos en 16.400 predios (Instituto Colombiano Agropecuario, 2019), en un área estimada de 753.417 hectáreas dedicadas a la producción de pastos y forrajes, caracterizando al departamento a tener una baja capacidad de carga (0,5 animales/hectárea).

Según la información disponible y reportada por la cadena cárnica y láctea del departamento del Huila en los años 2010 y 2011 los parámetros de productividad bovina en el departamento son

bajos con respecto a los parámetros nacionales. Igualmente, los anuarios estadísticos agropecuarios del departamento reportan una producción de leche promedio de 4,9 litro/vaca/día (Gobernacion del Huila, 2019).

#### **4.2. Sistemas Silvopastoriles**

Los sistemas silvopastoriles son agroecosistemas en los que se asocia deliberadamente un componente arbóreo con uno herbáceo (pasturas naturales o mejoradas) y otro pecuario (ganado) en un mismo sitio, de manera que existan interacciones biológicas entre ambos con el objetivo de maximizar el uso de la tierra (Russo, 2015). Los árboles pueden ser de vegetación nativa o plantados para la extracción de madera, productos industriales, como frutales o como árboles multipropósito (alimentación) para la producción animal (Mahecha, 2003).

Los sistemas silvopastoriles representan importantes alternativas económicamente atractivas al productor, que además de funcionar como proveedor de forraje ofrecen servicios ambientales, en particular recuperación de áreas degradadas y captura de carbono (Amézquita *et al.*, 2010), siendo una alternativa importante, al obtener gran producción de biomasa y aumentar al máximo el fenómeno de la fotosíntesis; y, por lo tanto, la capacidad de acumular el carbono del aire en medios estables. Y ello se convierte en una alternativa práctica y real para la regulación ambiental, sin embargo la cantidad de carbono fijado en sistemas silvopastoriles depende de múltiples interacciones entre los componentes árbol, pasto, suelo y animal (Anguiano *et al.*, 2013)

Los sistemas agroforestales y entre ellos el silvopastoreo, puede permitir que los productores obtengan múltiples servicios ecológicos y sociales como lo es el pago por servicios ambientales - PSE (Sepúlveda e Ibrahim, 2009).

### **4.3. Cambio Climático**

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático - CMNUCC, (1992) se entiende por cambio climático “Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. El Grupo Intergubernamental de Cambio Climático – IPCC, (2001) lo define como “variación estadística en el estado medio del clima, que persiste durante un período prolongado y se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras”.

Las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero (GEI) se atribuye como la principal causa del Cambio Climático, éstas han aumentado desde el año 1750 con el inicio de la era preindustrial como resultado del crecimiento económico y la explosión demográfica. Como consecuencia, se alcanzaron concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso sin comparación en por lo menos los últimos 800 000 años. (IPCC, 2014b)

En 2010 la emisiones mundiales de GEI del sector agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU) donde se realizaron las mediciones de las actividades relacionadas con la ganadería

(emisiones de CH<sub>4</sub> entérico, cambios de uso del suelos de bosque a pastizales entre otros) correspondían al 24% de emisiones del total del GEI (IPCC, 2014b).

#### **4.4. Ciclo del Carbono**

El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico, donde el carbono tiene diferentes transformaciones en el tiempo. El carbono se encuentra acumulado en diferentes compartimientos de la tierra. En la atmósfera se deposita como dióxido de carbono y metano principalmente; en la hidrosfera, como dióxido de carbono disuelto en el agua; en la litósfera, en las rocas y en depósitos de carbón; en la biosfera, en los carbohidratos y en la antroposfera en diferentes formas según la construcción realizada por la sociedad. El carbono circula entre la esferas del sistema global por medio de la interacción en escalas de tiempo desde horas, hasta largos periodos geológicos (Benavides & León, 2007).

El ciclo biológico del carbono tarda menos tiempo y comprende los intercambios de dióxido de carbono entre los seres vivos y la atmósfera. Los organismos autótrofos (plantas) incorporan el carbono a las cadenas alimenticias por procesos de síntesis como la fotosíntesis, donde el carbono de la atmósfera es absorbido por las plantas en forma de dióxido de carbono.

#### **4.5. Métodos para estimar carbono almacenado**

Para estimar el carbono almacenado en diferentes usos del suelo, es necesario realizar un inventario de los componentes sumideros de carbono (biomasa, hojarasca, suelos, raíces), este monitoreo permite estimar en términos de cantidad cuanto carbono se encuentra almacenado al momento de

realizar la medición. Este tipo de muestreos debe permitir la comparación entre sitios, usos del suelo y períodos (Andrade & Ibrahim, 2003).

Debido a la variabilidad de los arreglos silvopastoriles, los muestreos estratificados son los más convenientes para realizar las mediciones, el sistema se debe dividir en estratos (planta, suelo y/o topografía), usando herramientas como mapas de coberturas, imágenes de satélites fotografías aéreas entre otros. Para realizar las estimaciones del contenido de carbono en los sistemas silvopastoriles se debe evaluar cada compartimiento: biomasa leñosa, suelo y hojarasca (Tabla 1) (Andrade & Ibrahim, 2003).

Tabla 1 Compartimientos de almacenamiento de carbono.

<b>Tipo de Depósito</b>		<b>Descripción</b>
Biomasa viva	Biomasa sobre el suelo	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, incluyendo troncos, tocones vivos, ramas, cáscaras, semillas y hojas. Para facilitar las mediciones se evalúa por separado la biomasa aérea arbórea y la biomasa aérea no arbórea.
	Biomasa subterránea	Toda la biomasa viva de raíces. Se excluyen raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque con frecuencia no se pueden distinguir empíricamente de la materia orgánica del suelo.
Materia orgánica muerta	Detritos o Madera Muerta	Comprende la madera no viva sobre el suelo, ya sea en pie o caída. La madera muerta comprende la que se encuentra en la superficie, raíces muertas y tocones de 10 cm de diámetro o más.
	Hojarasca	Comprende toda la masa no viva sobre el suelo (hojas, ramas y cáscaras de frutos) en varios estados de descomposición. Comprende las capas de detritos, fúmica y húmica. Las raíces finas vivas (de tamaño inferior al límite de diámetro sugerido para la biomasa bajo el suelo) se incluyen en el mantillo cuando no se pueden distinguir empíricamente de él. Se puede establecer previamente un diámetro mínimo para diferenciar de los detritos e.g., < 10 cm).

Suelos	Materia orgánica del suelo	Comprende el carbono orgánico en los suelos minerales y orgánicos a una profundidad específica seleccionada por el proponente del proyecto.
		Raíces finas vivas con diámetro menor de 2 mm.

Fuente: Información tomada de Yepes *et al.*, (2011)

#### 4.5.1. Evaluación de la biomasa aérea

Para estimar la biomasa arbórea existen dos métodos. El método directo o destructivo se utiliza para la construcción de ecuaciones alométricas y factores de expansión de la biomasa, este consiste en cosechar la biomasa de los árboles en un área conocida, secarla y pesarla. A continuación, el valor obtenido de biomasa seca se convierte a carbono empleando un factor de conversión de 0,5, ya que el contenido de carbono fue establecido a cerca del 50% de la biomasa. El método indirecto consiste en utilizar las ecuaciones alométricas que fueron generados a partir del método directo, en este caso, solo es necesario medir las variables requeridas en campo y remplazarlas en la ecuación seleccionada (Yepes *et al.*, 2011).

La estimación de la biomasa herbácea en los Sistemas Silvopastoriles se realiza haciendo medición de las pasturas. El método de muestreo depende básicamente de la distribución de árboles en la pastura. Los muestreos deben capturar toda la variabilidad en la biomasa herbácea, localizando puntos de muestreo a diferentes distancias de los árboles, o en diferentes franjas respecto a la línea de árboles (Andrade & Ibrahim, 2003)

#### 4.5.2. Evaluación del carbono orgánico en suelo

El carbono del suelo está presente en la forma orgánica e inorgánica. La forma orgánica equivale a la mayor reserva en interacción con la atmósfera. El carbono orgánico presente en el suelo representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización) (Rügnitz *et al.*, 2009). El cambio en el carbono orgánico del suelo debe ser medido a una profundidad de 30 cm, ya que el cambio de uso del suelo ejerce el mayor efecto en las capas superiores (Andrade & Ibrahim, 2003).

Para cuantificar el almacenamiento de carbono orgánico en suelos se deben medir dos variables: El carbono orgánico total en el suelo y la densidad aparente del mismo.

La concentración de carbono orgánico se puede determinar en varios métodos como, el método de combustión seca presenta resultados más exactos, sin embargo es más complejo y costoso. Los métodos de combustión húmeda, como el método de Walkly – Black, subestiman el contenido de carbono entre un 20 - 30%, sin embargo, representan la alternativa más usada debido a su rapidez y simpleza (Yepes *et al.*, 2011).

La densidad aparente es la propiedad física de los suelos de peso por unidad de suelo, permite establecer el peso de cierto volumen de suelo para hacer las estimaciones del carbono orgánico por unidad de área. Para determinar la densidad entre los métodos empleados se realizan el método del cilindro y el del terrón de suelo parafinado. El método del cilindro consiste en enterrar un cilindro metálico al suelo, retirar la muestra de volumen conocido y secarla en horno para determinar su peso, posteriormente el peso se divide entre el volumen de suelo (Andrade & Ibrahim, 2003).

## 5. DISEÑO METODOLÓGICO

### 5.1. Localización del área de estudio y métodos estadísticos

El estudio se realizó entre los meses de octubre y diciembre de 2017 en 7 predios ganaderos de los municipios de Rivera, Palermo, Campoalegre, Garzón, y Tarqui, que se encuentran al margen occidental de la cordillera oriental, en el denominado valle seco del Río Magdalena en el departamento del Huila (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

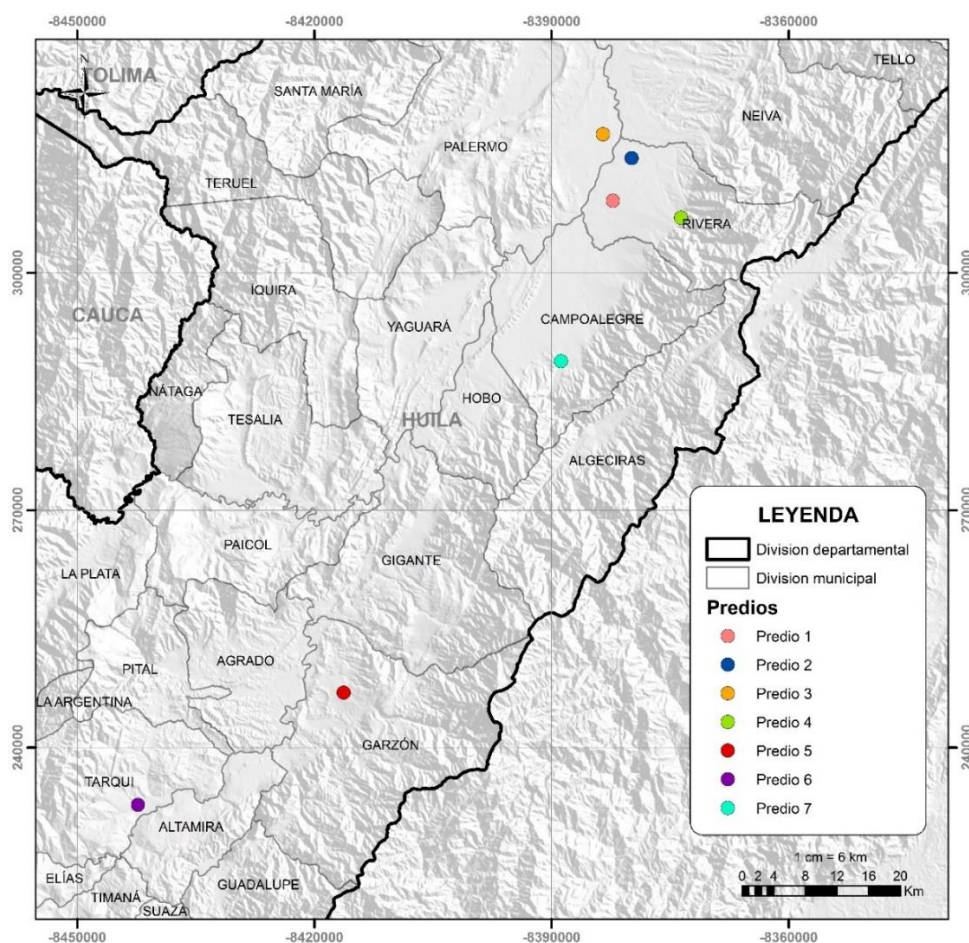


Figura 1 Ubicación geográfica de los predios estudiados



De acuerdo la clasificación de Holdridge (1982), el área de los predios evaluados está clasificada como bosque seco tropical (bs-T), en una franja altitudinal entre los 0-1000 m de altitud; temperatura superiores a los 24 0 °C y precipitaciones entre los 700 y 2000 mm anuales (Tabla 2).

Tabla 2. Localización geográfica y altitud de los predios evaluados.

Número del predio	Municipio	Vereda	Altitud	Zona de vida
1	Rivera	Rio Frio	522 m	bs-T
2	Rivera	Arenoso	483 m	bs-T
3	Palermo	El Juncal	466 m.	bs-T
4	Rivera	Alto Guadual	882 m	bs-T
5	Garzón	Majo	951 m	bs-T
6	Tarqui	Mirador	866 m	bs-T
7	Campoalegre	La angostura	614 m	bs-T

Los predios evaluados se caracterizan por tener como principal sistema el bovino de doble propósito. Cada predio contaba por los menos con dos hectáreas del sistema silvopastoril descrito y también tenían potreros que se caracterizan por la ausencia de árboles, evaluándose los dos potreros que tuvieran un manejo similar. Los dos potreros, con usos del suelo diferentes en cada predio se convierten en los dos tratamientos evaluados. Para cada tratamiento, se establecieron parcelas temporales rectangulares de 1.800 m<sup>2</sup>, donde se tomaron muestras de biomasa aérea y muestras de suelo. Los análisis estadísticos de los datos se realizaron mediante procedimientos de ANOVA y comparación de medias por la prueba de Tukey con nivel de significancia del 99% y cuando esta prueba no mostró diferencias se realizó la prueba de diferencias mínimas significativas - LSD con un nivel de significancia del 95%. Previo a los análisis estadísticos se realizaron las pruebas de normalidad y homogeneidad de la varianza.

## **5.2. Tratamientos (Usos del suelo evaluados)**

### **5.2.1. Sistemas Silvopastoriles (SSP)**

Se evaluaron Sistemas Silvopastoriles (SSP) con edades entre 7 y 10 años, compuestos por una asociación de 3.200 árboles por hectárea de la leguminosa arbórea *Leucaena leucocephala* cv Cunningham) y gramíneas del género *Brachiaria*, distribuidos en franjas de 6 metros de leguminosa seguida de 6 metros de gramínea. A la mayoría de estos árboles comúnmente se les realiza podas a 1 metro o metro y medio cada 6 o 12 meses.

### **5.2.2. Sistema Sin Árboles - Tradicional (SSA)**

Los sistemas sin árboles (SSA) evaluados fueron pasturas tradicionales con más de 8 años de establecidas, sin diferenciarse praderas con especies nativas, introducidas o naturalizadas. Los tipos de gramíneas evaluadas fueron principalmente *Brachiaria decumbens*, *Brachiaria brizantha*, encontrándose también en un predio el pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*), teniendo un manejo similar estas praderas evaluadas, con el sistema silvopastoril de cada predio.

## **5.3. Metodologías de medición**

### **5.3.1. Componente Arbustivo**

El almacenamiento de carbono en biomasa arriba del suelo se estimó realizando muestreo no destructivo mediante el establecimiento y medición de parcelas temporales de muestreo. En cada predio evaluado se establecieron 3 parcelas temporales rectangulares de 1.800 m<sup>2</sup> (60 m x 30 m)

siguiendo la orientación de las hileras de los árboles de *Leucaena*. En cada parcela se delimitaron tres subparcelas circulares de 177 m<sup>2</sup> donde se establecieron minicalicatas para la evaluación del carbono en el suelo y dentro de estas tres subparcelas de 50 m<sup>2</sup> para el muestreo de los arbustos de *Leucaena* (Figura 2) (Arias *et al.*, 2009). En cada subparcela de 50 m<sup>2</sup> se calculó el diámetro del tronco de todos los individuos a 0,3 m ( $d_{30}$ ) de altura, a partir de la medición de la circunferencia con cinta métrica. Para transformar las dimensiones de los árboles en biomasa en pie se emplearon modelos de biomasa por individuo.

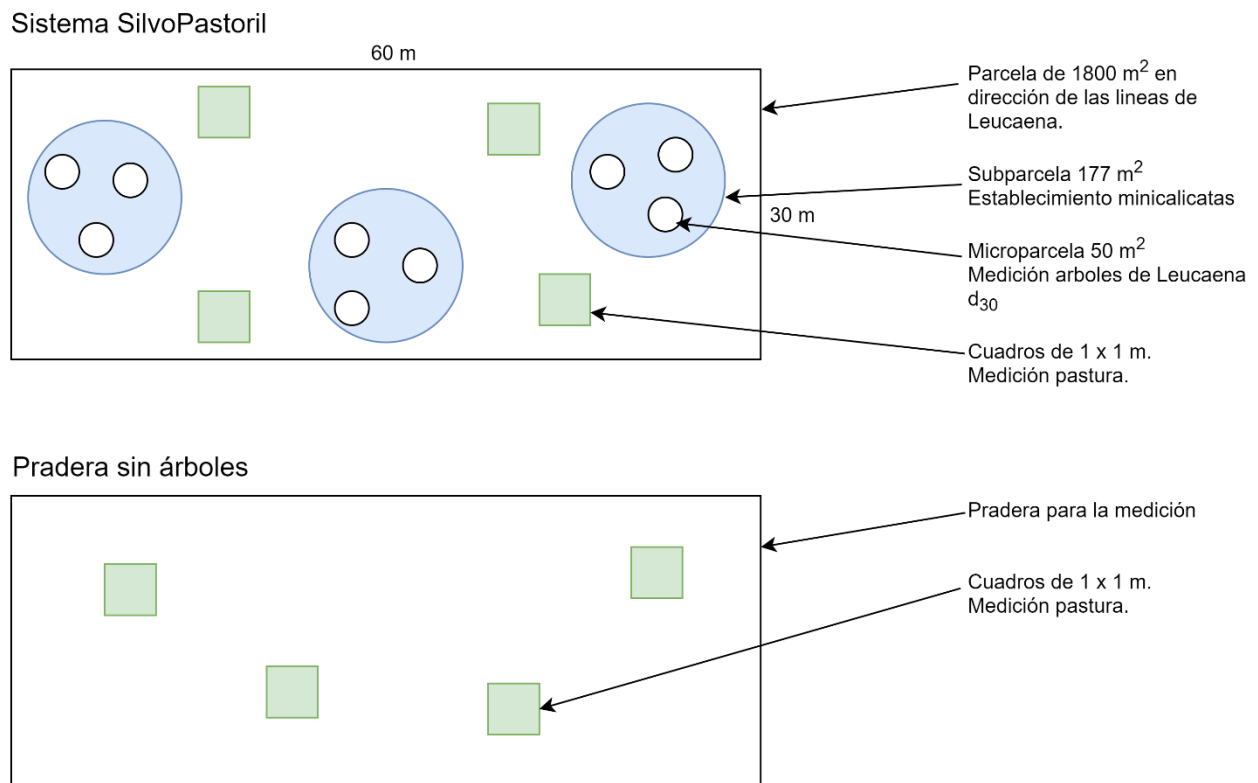


Figura 2. Esquema de las parcelas para el muestreo.

### 5.3.2. Biomasa y Carbono Total del componente arbustivo

En la estimación de la biomasa aérea y carbono total se utilizó el modelo alométrico desarrollado por Scanlan, (1991) y validado por Arias *et al.*, (2009) en SSP intensivos de Leucaena en el departamento del Valle.

$$B = e^{(5.41 + 0.77 * \ln d_{30})}$$

Donde:

B = Biomasa aérea de Leucaena leucocephala.

$\ln d_{30}$  = Diámetro a 30 centímetros de altura del suelo.

Ya estimada la biomasa total por hectárea con los modelos alométricos, se multiplicó por el factor de 0,50 el cual es valor promedio de contenido de carbono en los tejidos vegetales (Yepes *et al.*, 2011).

### 5.3.3. Biomasa y carbono total de la pastura

La biomasa de la pastura se estimó realizando muestreos destructivos de 1 m<sup>2</sup> de manera aleatoria con 4 repeticiones por parcela. La vegetación se cosechó a ras del suelo, del material que se encontró dentro de las parcelas se extrajo una muestra de aproximadamente 100 g de peso fresco (Figura 3).

Las muestras fueron depositadas en bolsas plásticas herméticas y debidamente rotuladas con el número de parcela de cosecha y de la cobertura. En el laboratorio las muestras se secaron a una

temperatura aproximada de 80°C hasta peso constante para estimar el peso seco de los componentes en cada parcela cosechada.



Figura 3. Parcela para el muestreo de pastos.

#### **5.3.4. Almacenamiento de carbono en suelos**

Las reservas de carbono orgánico en suelo (COS) se valoró siguiendo la metodología propuesta por Andrade e Ibrahim (2003), estimando el porcentaje de concentración de carbono orgánico en el suelo y la densidad aparente. Para ello se realizó una minicalicata en cada parcela temporal con cuatro profundidades (10 cm, 20 cm, 30 cm y 50 cm) y tres submuestras de COS y densidad aparente por profundidad.

La concentración de COS se estimó tomando muestras disturbadas de suelo, posteriormente fueron procesadas en el Laboratorio de Recursos Geoagroambientales de la Universidad Surcolombiana mediante el método Walkley y Black (1934). Para determinar la densidad aparente se usó el método del cilindro detallada por MacDicken, (1997), esta consiste en introducir al suelo un

cilindro con un volumen conocido, una vez obtenida la muestra fue secada en horno a 100 °C por 72 horas y posteriormente se determinó el volumen interno del cilindro (Figura 4).



Figura 4. Minicalicata para la muestra de suelo para determinación de densidad aparente y Carbono Orgánico COS.

El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo se calculó mediante la siguiente formula:

$$\text{COS} = \% \text{CO} \times da \times P_s$$

Dónde:

COS: carbono orgánico de suelos ( $\text{t ha}^{-1}$ )

%CO: Concentración de carbono orgánico en suelos (%; Walkley y Black 1938).

$da$ : densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$P_s$ : profundidad del suelo (cm)

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Biomasa y carbono total del componente arbóreo

Los troncos de los árboles de *Leucaena leucocephala* presentaron valores promedio del diámetro a los 30 cm ( $d_{30}$ ) de  $3,84 \pm 0,74$  cm, encontrándose diferencias altamente significativas ( $p < 0,001$ ) entre los predios evaluados. Se debe tener en cuenta que estos SSP tienen una densidad promedio de siembra de 3.200 árboles/ha, con una edad promedio de 8 años (Tabla 3).

Tabla 3. Diámetro promedio a 30 cm del suelo en los árboles de *Leucaena*\* de los 7 predios evaluados.

Número del Predio	$d_{30}$ (cm)*
7	$4,21 \pm 0,71$ a
1	$4,18 \pm 0,91$ a
2	$4,01 \pm 0,93$ ab
6	$3,67 \pm 0,69$ bc
5	$3,65 \pm 0,53$ bc
4	$3,65 \pm 0,72$ bc
3	$3,48 \pm 0,67$ c
PROMEDIO	$3,84 \pm 0,74$

*Promedios con diferente letra, tienen diferencias significativas a la prueba de Tukey*

\* Se tuvieron en cuenta diámetros menores a 6 cm

Arias *et al.* (2009) presentó valores promedio de  $d_{30}$  de  $3,98$  cm  $\pm 0,62$  cm en los troncos de los árboles de *Leucaena leucocephala* de 9 años con densidades de siembra de 10.000 plantas por hectárea, mientras que Arcos (2016) reportó promedios de  $2,3$  cm  $\pm 0,5$  en SSP de *Leucaena* con densidades de siembra de 13.680 árboles/ha.

Teniendo en cuenta el modelo descrito en la metodología, a partir del diámetro se estimó la biomasa arriba del suelo con rangos que oscilan entre 6,22 y 7,21 t MS/ha; y a partir del factor de conversión se calculó el carbono almacenado en el componente arbóreo en cada una de los predios obteniendo un promedio de  $3,35 \pm 0,2$  t C/ha (Tabla 4), encontrándose diferencias altamente significativas ( $p < 0,001$ ) entre los predios evaluados.

Tabla 4. Biomasa total y carbono almacenado en los arbustos de *Leucaena* en los 7 predios evaluados.

Número del Predio	Biomasa aérea t MS/ha	Carbono total t C/ha
7	7,21	3,61 a
1	7,16	3,58 a
2	6,95	3,47 a
6	6,45	3,24 b
5	6,45	3,22 b
4	6,44	3,22 b
3	6,22	3,11 b
PROMEDIO	6,70	3,35

*Promedios con diferente letra entre los predios, muestran diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,001$ ).*

Arias et al. (2009) reporta un promedio de almacenamiento de carbono de 3,81 t C/ha en SSP de *L. leucocephala* de 9 años de edad en el Valle del Cauca. En el departamento del Tolima, Arcos (2016) reportó un contenido promedio de carbono de 3,6 t C/ha en SSP de *L. leucocephala* con densidades de siembra de 13.680 plantas/ha. En Venezuela Messa H, (2009) reportó un contenido de 1,11 t C/ha, con densidades de siembra de 1.811 árboles/ha de *L. leucocephala*.

Los resultados obtenidos son inferiores a los reportados por Ruiz *et al.* (2004) de 12,54 t C/ha en SSP no intensivos de praderas mejoradas y árboles dispersos de diferentes especies con densidad



de 110 árboles/ha. La superioridad de almacenamiento de carbono se puede atribuir a un mayor desarrollo dasométrico de los árboles evaluados.

## 6.2. Biomasa aérea y carbono en gramíneas

La biomasa en las pasturas en los SSP presentó un valor promedio de 1,35 t MS/ha, el valor promedio de carbono en la biomasa aérea de las pasturas en SSP se estimó en  $0,67 \pm 0,29$  t/ha; y el contenido promedio de biomasa aérea en las praderas tradicionales (sistema sin árboles) se estimó en 1 t MS/ha, calculándose el promedio de carbono de biomasa aérea en  $0,5 \pm 0,24$  t C/ha, encontrándose diferencias significativas entre los predios ( $p=0,0183$ ) y diferencias significativas entre los dos tratamientos ( $p=0,0499$ ) (Tabla 5).

Tabla 5. Carbono total almacenado en la biomasa de la pastura en SSP y SSA de los predios evaluados.

Número del Predio	SSP t C/ha	SSA t C/ha
1	0,98	0,78
2	0,92	0,86
3	0,51	0,20
4	0,38	0,37
5	0,87	0,51
6	0,81	0,41
7	0,26	0,36
PROMEDIO	0,67 a	0,50 b

*Promedios con diferente letra entre los tratamientos, muestran diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p=0,0499$ ).*

Arcos (2016) calculó en la pastura residual en SSP de Leucaena 0,9 t C/ha, mientras que Messa (2009) estimó en 1,88 t C/ha en pastura residual de SSP de Leucaena. Ruiz *et al.* (2004) estimó en pasturas sin árboles contenidos de carbono de 1,37 t C/ha en pasturas mejoradas. Por otro lado

Amézquita *et al.* (2010) reporta contenidos de carbono de 0,8 t C/ha en pasturas sin árboles de *Brachiaria decumbens* en laderas en el Valle del Cauca.

### 6.3. Carbono Orgánico en Suelo (COS)

En la Tabla 6 se presenta el almacenamiento de Carbono en suelo estimado en SSP y en el sistema sin árboles, el promedio en SSP se estimó en 158 t COS/ha y 119 t COS/ha en praderas sin árboles, sin encontrarse diferencias significativas entre los dos tratamientos ( $p=0,0515$ ) ni entre los predios ( $p>0,5953$ )

Tabla 6. Contenido de Carbono Orgánico almacenado en el suelo a 50 centímetros de profundidad en SSP y sistemas sin árboles.

Número del Predio	SSP t COS/ha	SSA t COS/ha
1	150,11	131,97
2	178,62	114,33
3	146,47	82,14
4	235,62	115,32
5	158,16	140,04
6	117,27	153,61
7	119,84	98,47
PROMEDIO	158,01 a	119,41 a

*Promedios con la misma letra entre los tratamientos, no tienen diferencias significativas de acuerdo a la prueba LSD ( $p=0,0515$ ).*

Arias *et al.* (2009) calculó en SSP contenido carbono orgánico en suelo a 50 cm de 163 t C/ha., datos que concuerdan con los reportados en los SSP evaluados. En el departamento del Tolima Arcos (2016) estimó en SSP a 30 cm 54,6 t C/ha., valor inferior a las reportado que pueden estar relacionadas con la diferencia en las profundidades de suelo evaluadas (50 cm).

En el departamento de Córdoba Contreras Santos et al. (2019) reportó en SSP contenido de carbono orgánico en suelo a 20 cm de 65 t C/ha, valor inferior al reportado que puede estar asociado a la mayor profundidad de suelo evaluada (50 cm).

#### 6.4. Carbono total en los sistemas evaluados

En la Tabla 7 se presenta el carbono total en los 2 usos del suelo evaluados, desagregando el carbono almacenado en cada compartimiento; biomasa aérea (árboles y pastos) y el Suelo (COS).

Tabla 7. Inventario de carbono total en los dos usos del suelo evaluados.

Tratamiento	Árboles t C/ha	Pasto t C/ha	Suelos t COS/ha	Total t C/ha
SSP	3,35	0,67	158,01	162,04 a
SSA	-	0,50	119,41	119,91 b

*Promedios con diferente letra entre los tratamientos, tienen diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba LSD ( $p > 0,0359$ ).*

El contenido de Carbono total almacenado en los sistemas silvopastoriles -SSP (162,04  $\pm$ 40 t C/ha) fue estadísticamente superior al observado en los sistemas sin árboles -SSA (119,91  $\pm$ 25 t C/ha), ya que encontraron diferencias significativas entre los dos tratamientos ( $p > 0,0359$ ), basados en la prueba LSD.

Para su mejor comprensión se presenta el diagrama de caja y bigotes del contenido de carbono total en los tratamientos evaluados en la Figura 5.

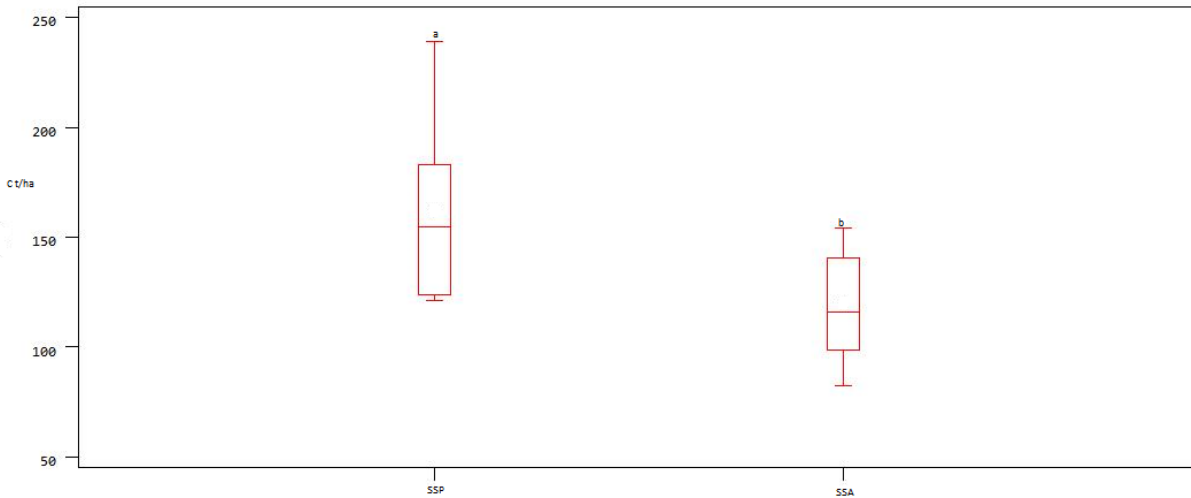


Figura 5. Diagrama de caja y bigotes del contenido de carbono total en los tratamientos evaluados.

En el departamento del Huila la Fundación Alto Magdalena- FAM estimó captura de carbono en diferentes coberturas (Café, Bosque, Cacao y pasto) en la cuenca del Río las Ceibas y concluyó que las biomásas aéreas de los pastizales presentes en la zona tienen un contenido promedio de 1,80 t C/ha, este valor es superior al reportado y la diferencia puede atribuirse a las especies de pasto evaluado

En relación con los estudios realizados en sistemas silvopastoriles basados con *Leucaena leucocephala* Arias *et al.* (2009) estimaron el contenido promedio almacenado de 158,27 t C/ha., valor similar al reportado en los SSP evaluados. Messa (2009) calcula el carbono total almacenado en 61,21 t C/ha. y Arcos (2016) estima el contenido en 62,40 t C/ha, estimaciones inferiores a las reportadas, que pueden estar relacionadas con los tipos de arreglos SSP donde reportan diámetros de árboles menores, además el suelo evaluado no corresponde a la misma tipología

A pesar de no encontrar literatura más reciente a la reportada de SSP con *Leucaena* otros autores han evaluado arreglos con otras especies. Giraldo et al. (2019) en la costa norte colombiana estimó el stock total de carbono en SSP con árboles maderables en 44,13 t C/ha. En la región de los Montes de María Giraldo, Betancur, et al. (2019) en SSP de *Eucalyptus tereticornis* + *Cajanus cajan* asociado a pasto *Brachiaria híbrido cv Mulato II*, reportan stock de carbono total de 52,53 t C/ha. En el trópico Peruano Robles Rodríguez et al. (2019) estimó reservas de carbono totales en SSP establecidos en una asociación de palma *Mauritia flexuosa* y pasto *Paspalum plicatulum* de 55,83 t C/ha. Aunque los arreglos SSP no son similares a los reportados, se evidencia el potencial de almacenamiento de C de los sistemas silvopastoriles en el trópico.

En centro y sur américa se han realizado diversos estudios para estimar las reservas de carbono almacenados en sistemas agroforestales y praderas. En Nicaragua se evaluó el almacenamiento de carbono en pastos tradicionales (*Hyparrhenia rufa*, *Paspalum notatum*, *Paspalum virgatum*) y pastos mejorados (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*), con árboles dispersos, sin ellos, y en áreas de regeneración natural, concluyendo que el carbono total (C) almacenado en los bosques (201 t C ha<sup>-1</sup>) es superior al almacenado en pastos con árboles (164-170 t C ha<sup>-1</sup>) y sin ellos (151-159 t C ha<sup>-1</sup>) (Ruiz *et al.*, 2004), resultados similares a los reportados que evidencian el potencial de almacenamiento de carbono en las praderas con árboles.

Ibrahim *et al.*, (2006) estimó el almacenamiento de carbono orgánico de la biomasa arbórea y del suelo, en distintos usos de la tierra (pasturas degradadas, pasturas mejoradas y naturadas con y sin árboles, bancos forrajeros, bosques riparios, bosques secundarios y plantaciones forestales) en Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Los autores concluyeron que el bosque secundario es el uso de

la tierra con mayores cantidades carbono almacenadas en Costa Rica y Nicaragua, mientras que en Colombia fueron los bosques que son riparios. En los tres países las pasturas degradadas fue el uso de la tierra que menos carbono total almacenó, y las pasturas mejoradas con árboles, junto a los sistemas silvopastoriles son los usos con mayor potencial.

En el trópico seco de Costa Rica Rojas, Ibrahim, & Andrade, (2009) estimó el secuestro de carbono en seis sistemas silvopastoriles basados en la combinación de *Hyparrhenia rufa* y *Brachiaria brizantha* con especies maderables nativas (*Diphyssa robinoides*, *Dalbergia retusa* y *Pithecellobium saman*). Se evaluó el carbono total en el suelo (raíces y suelo) y en la biomasa aérea (pastura y árbol). Los autores concluyeron que la mayor cantidad de carbono en raíces se encontró en árboles asociados con *B. brizantha* (1,1 t C/ha) y en pasturas con la asociación *B. brizantha* y *D. robinoides* (1,5 t C/ha). El mayor almacenamiento de carbono orgánico de suelo en los 60 cm fue encontrado en *P. saman* y *D. robinoides* asociados con *B. brizantha* (121,7 y 121,2 t C/ha, respectivamente) y el menor fue en la pastura de *B. brizantha* en monocultivo (87,7 t C/ha). El contenido de carbono orgánico en los sistemas silvopastoriles evaluados se encuentra concentrado en los primeros 20 cm. La ausencia de diferencias entre sistemas silvopastoriles y pradera sin árboles y el bajo efecto de la incorporación de los árboles sobre el carbono en el suelo puede deberse a la juventud de los sistemas estudiados.

Amézquita *et al.* (2010) evaluaron la acumulación de carbono en suelo y biomasa en sistemas de pasturas y silvopastoriles tropicales, comparándolos con bosque nativo (control positivo) y pastura degradada (control negativo), en cuatro ecosistemas: En Colombia, Bosque Tropical Húmedo y Laderas Andinas erosionadas; y en Costa Rica, Bosque Tropical Húmedo y Bosque Tropical Sub-

húmedo; y los autores obtuvieron como resultado que los niveles de acumulación de carbono son mayores en sitios de mayor altitud. Así, el ecosistema de Laderas Andinas muestra mayores niveles de acumulación, donde el bosque nativo presenta los mayores niveles de acumulación de carbono total en el sistema completo (480 t C total/ha, 386,6 t C total/ha y 322,2 t C total/ha en los dos sitios muestreados), siendo estas medias estadísticamente superiores a las de una pastura mejorada de *Brachiaria decumbens* (151,2 t C/ha y 145,1 t C/ha en los 2 sitios muestreados) y a una pastura degradada (141 t Ctotal/ha). En cuanto a carbono almacenado en suelo, los ecosistemas de baja altitud, cálidos y húmedos, los niveles de acumulación de carbono en el suelo para algunos sistemas de pasturas y silvopastoriles (*Brachiaria humidicola* en monocultivo 144 t ha<sup>-1</sup> 1 m-eq, *Brachiaria humidicola* + leguminosas nativas 138 t ha<sup>-1</sup> 1 m-eq, *Brachiaria decumbens* en monocultivo 128 t ha<sup>-1</sup> 1 m-eq y *Brachiaria decumbens* + leguminosas nativas 124 t ha<sup>-1</sup> 1 m-eq) tienen niveles comparables o mayores que los del bosque nativo (107 t ha<sup>-1</sup> 1 m-eq). Los autores concluyen que en todos los ecosistemas estudiados los sistemas mejorados de praderas y silvopastoreo muestran mayores niveles de acumulación de carbono que en el área degradada, y en sistemas de praderas y silvopastoreo, en el suelo se acumula más del 90 por ciento del carbono total, contribuyendo significativamente a la captura de carbono.

## 7. ANÁLISIS DE RECONVERSIÓN DE PRADERA SIN ARBOLES A SISTEMAS SILVOPASTORILES EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA

### 7.1. Coberturas y usos del departamento del Huila

El departamento del huila tiene una extensión aproximada de 1.871.893 ha, el 25% del área total se encuentra en cobertura de bosque ( Figura 6) (IDEAM, 2014) y se estima que almacenan cerca de 293 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Gobernacion del Huila *et al.*, 2014).

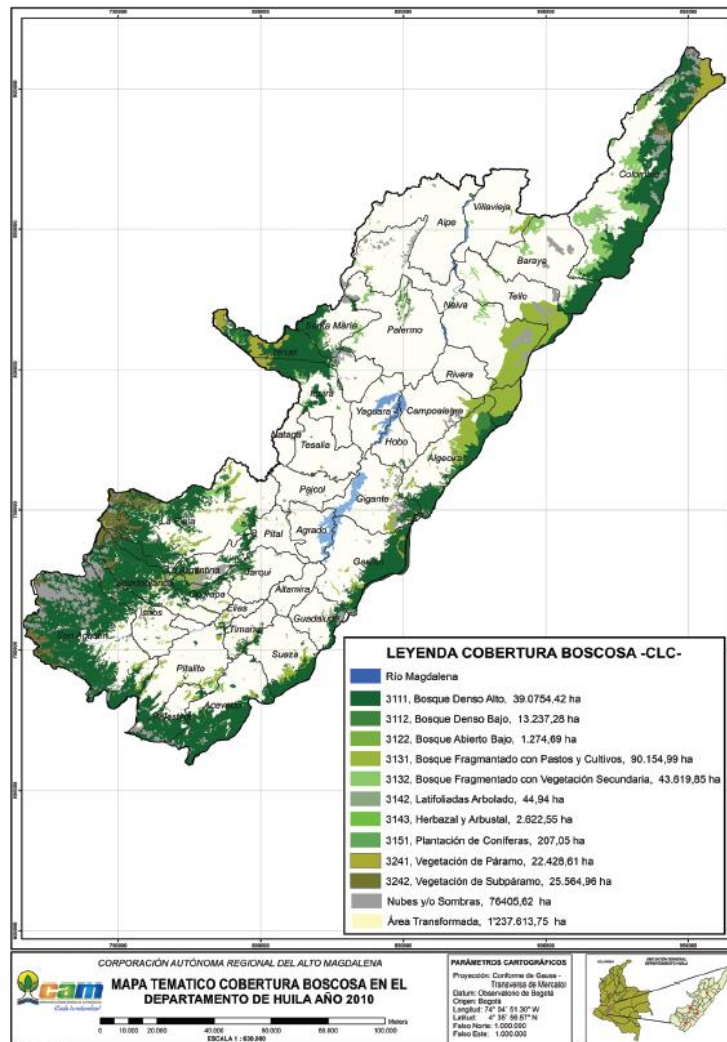




Figura 6 Mapa de cobertura boscosa del departamento del Huila. (Gobernacion del Huila *et al.*, 2014)

El área sembrada en pastos y forrajes para la producción bovina en el departamento es de 653.012 ha, el principal sistema sembrado son praderas tradicionales seguido por praderas mejoradas, los SSP son el sistema con menor área sembrada en el departamento (Tabla 8).

Tabla 8 Área destinada a producción de pastos y forrajes en el departamento del Huila

<b>Tipo de Sistema</b>	<b>Hectáreas</b>
Pradera tradicional	522.355
Pradera mejorada	113.682
Pasto de corte	8.094
Cultivos forrajeros	7.461
Silvopastoril	1.420
<b>Total</b>	<b>653.012</b>

Gobernación del Huila Secretaría de Agricultura y Minería (cómo se cito en CAM, 2020)

En la Figura 7 se muestran las áreas de producción de cultivos, pastos y mosaicos de pastos y cultivos en el departamento. El área en blanco corresponde a otras coberturas del suelo como bosque entre otros.

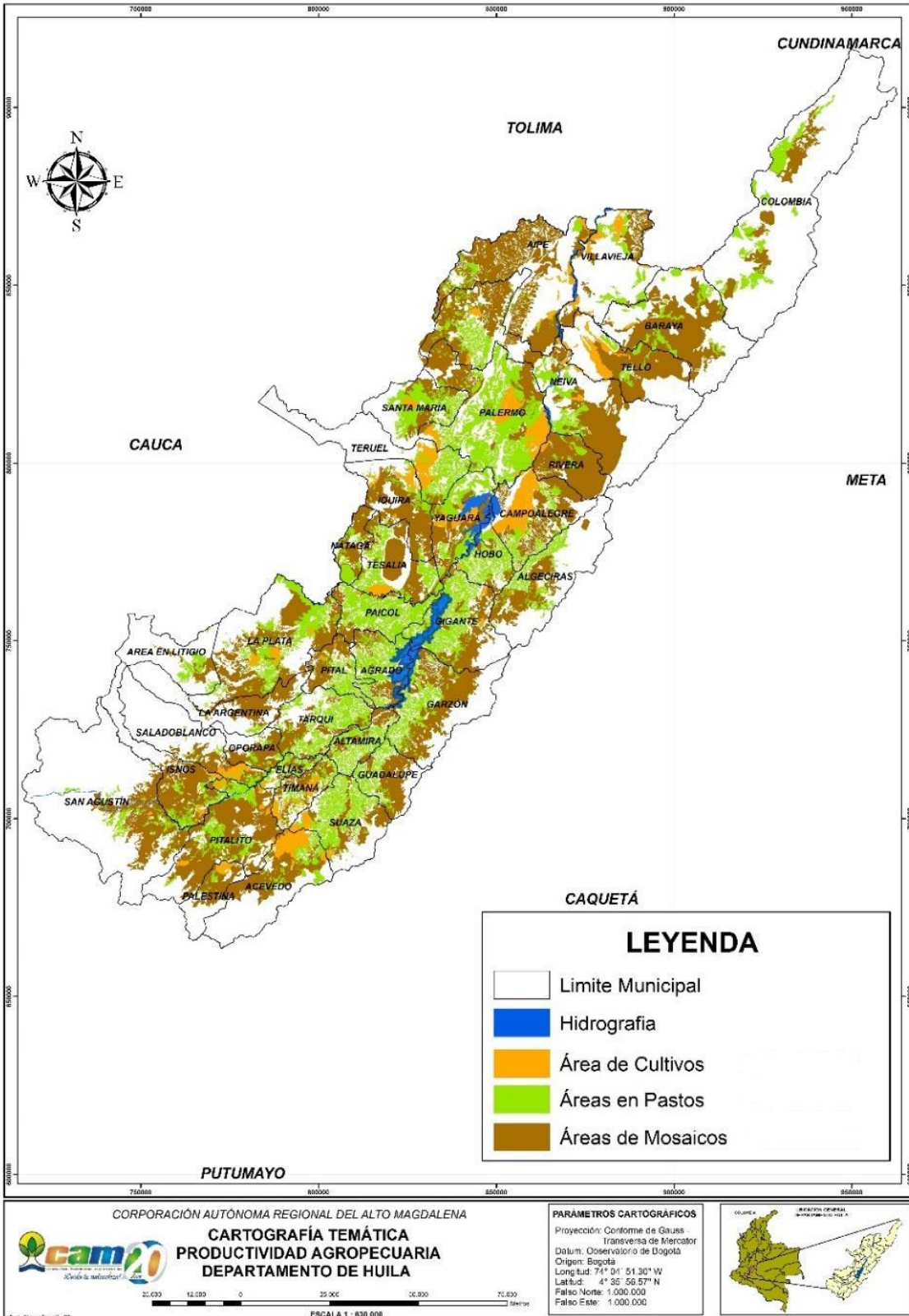


Figura 7 Área de producción agropecuaria del departamento del Huila (CAM, 2020).

## 7.2. Análisis de posibles escenarios para la captura de carbono en usos del suelo asociados a ganadería en el departamento del Huila.

Las estimaciones de captura de Carbono se realizaron con los promedios encontrados en biomasa aérea y suelo en los SSP (162 t C/ha) y SSA (120 t C/ha), asumiendo que las coberturas asociadas a ganadería en el departamento tienen las mismas condiciones de los sistemas evaluados.

Para el análisis se establecieron dos escenarios, el primero como escenario actual, estimando la captura de carbono de las coberturas actuales asociadas a la ganadería reportadas para el departamento y un segundo escenario (futuro) proyectando que todos los usos de suelo asociados a ganadería realizan reconversión a SSP.

El potencial de captura de carbono de las coberturas reportadas en departamento asociadas a la ganadería de acuerdo con las estimaciones realizadas es de 76,50 Mt/C (Tabla 9) (escenario actual). En estos cálculos no se tuvieron en cuenta el área de pasto de corte y cultivos forrajeros, coberturas que no se evaluaron en el presente estudio.

Tabla 9 Captura de carbono estimada en las coberturas asociadas a la ganadería en el departamento del Huila.

Tipo de Sistema	Área (ha)	Escenario actual (Mt/C)	Escenario futuro (Mt/C)
Pradera tradicional (SSA)	522.355	62,64	84,64
Pradera mejorada (SSA)	113.682	13,63	18,42
Silvopastoril (SSP)	1.420	0,230	0,230
<b>TOTAL</b>	<b>637.457</b>	<b>76,50</b>	<b>103,29</b>

El escenario futuro asume que las coberturas del departamento asociadas a la ganadería se establecen en SSP con las mismas condiciones que los SSP evaluados. Si se realizara la reconversión a SSP se estima que se almacenarían 103,29 Mt/C, que representaría un aumento del 35% con respecto a las diferentes coberturas implementadas en el departamento (Tabla 9).

### **7.3. Potencial de mitigación de emisiones de GEI de las coberturas asociadas a ganadería en el departamento.**

Las emisiones totales de GEI para el departamento del Huila en el año 2011 se estimaron en 5.317 Gigagramos de CO<sub>2</sub> Eq representando el 2,95% de las emisiones del país. El sector con mayores emisiones es de energía con un total de 1.834 Gg de CO<sub>2</sub> Eq, seguido por el sector uso del suelo y cambios de cobertura con 1.542,2 Gg de CO<sub>2</sub> Eq, agricultura con 1.303,6 Gg de CO<sub>2</sub> Eq, en cuarto y quinto lugar se encuentran los procesos industriales y los residuos, con 434,98 Gg de CO<sub>2</sub> Eq y 201,4 Gg de CO<sub>2</sub> Eq de las emisiones respectivamente (Figura 8) (ONF Andina, 2014).

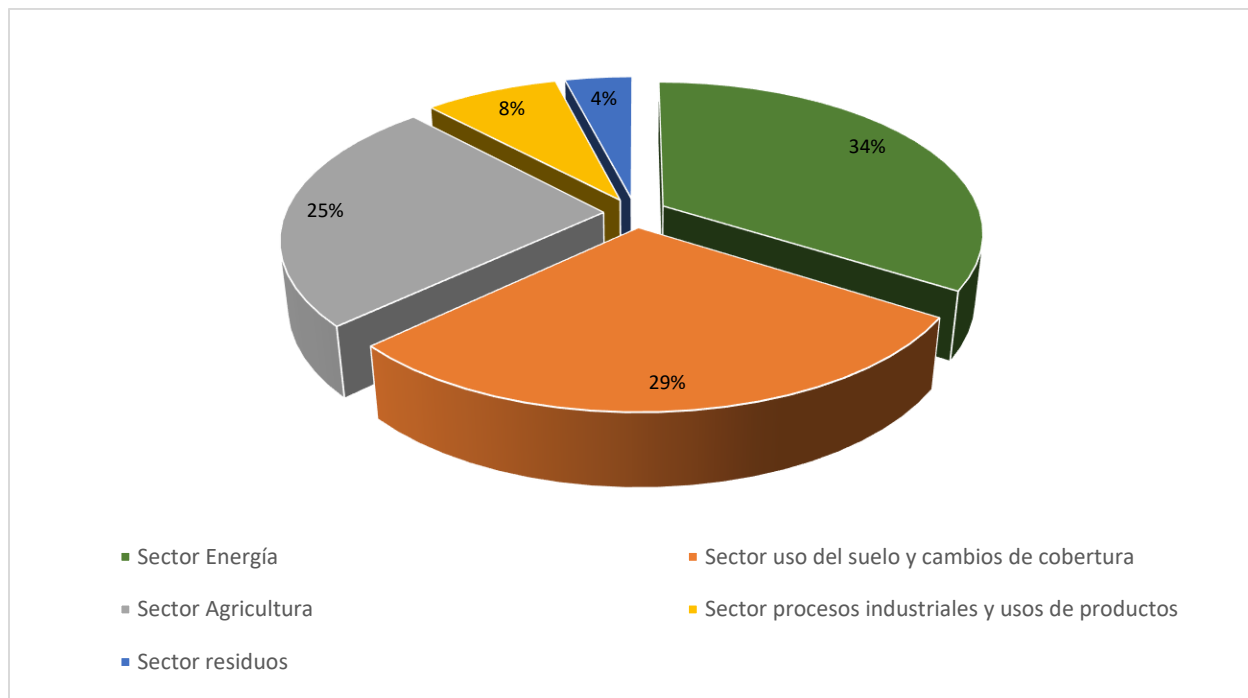


Figura 8 Distribución de las emisiones de GEI en el departamento del Huila ( ONF Andina, 2014a).

De acuerdo con las estimaciones realizadas el escenario actual tiene una captura acumulada de 287.590 Gg de CO<sub>2</sub> Eq y el escenario futuro una captura acumulada de 388.338 Gg de CO<sub>2</sub> Eq. Es decir que el escenario actual tendría la capacidad de capturar las emisiones de GEI generadas por el departamento durante 53 años, mientras que en el escenario futuro se captarían por 71 años (18 años más).

## 8. CONCLUSIONES

- El contenido promedio del carbono total almacenado (suelo y biomasa aérea) fue estadísticamente superior en los sistemas silvopastoriles - SSP, que en los sistemas sin árboles -SSA, lo cual demuestra que estos son sistemas capaces de fijar mayor contenido de CO<sub>2</sub>.
- Los SSP evaluados son una alternativa tecnológica importante para mitigar las emisiones de GEI generadas por los cambios de cobertura asociados con los sistemas de producción bovina en el departamento.
- La reconversión productiva a sistemas silvopastoriles es una alternativa relevante para incorporar en las políticas y planes de desarrollo del orden regional para contribuir con mitigación del cambio climático.
- Los resultados obtenidos son un insumo alineado a las metas establecidas por la ONU en los objetivos de desarrollo sostenible de “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” y “gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad”.

## **9. RECOMENDACIONES**

Este estudio es el primer paso para establecer un plan de manejo público, que permita reducir el riesgo por pérdida de cobertura vegetal al establecer las coberturas que pueden mitigar los efectos del cambio climático en la zona, al aumentar la densidad de siembra de árboles.

Es necesario continuar con las investigaciones que determinen los contenidos de carbono en los sistemas silvopastoriles en el trópico, que permita a futuro realizar una valoración económica por el servicio ambiental prestado como sumidero de Carbono, y desarrollar programas de Pago por Servicios ambientales con los productores bovinos en el departamento.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amézquita, M. C., Murgueitio, E., Ibrahim, M. A., & Ramírez, B. (2010). Carbon sequestration in pasture and silvopastoral systems compared with native forests in ecosystems of tropical America. *Grassland Carbon Sequestration: Management, Policy and Economics*, 11, 153–161.

[http://www.researchgate.net/publication/50991737\\_Towards\\_a\\_standardized\\_system\\_for\\_the\\_reporting\\_of\\_carbon\\_benefits\\_in\\_sustainable\\_land\\_management\\_projects/file/5046352e03b1493972.pdf#page=160](http://www.researchgate.net/publication/50991737_Towards_a_standardized_system_for_the_reporting_of_carbon_benefits_in_sustainable_land_management_projects/file/5046352e03b1493972.pdf#page=160)

Andrade, H. J., & Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería En Las Américas*, 10(39–40), 109–116.

Anguiano, J., Aguirre, J., & Palma, J. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de Cocos nucifera, *Leucaena leucocephala* Var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances En Investigacion Agropecuaria*, 17(1), 149–160. <http://www.ucol.mx/revaia/portal/pdf/2013/enero/8.pdf>

Arcos Dorado, J. C. (2016). *Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con Leucaena (Leucaena leucocephala) en la hacienda “El Chaco”, Tolima, Colombia*. Universidad Del Tolima.

Arias, L. M., Camargo, J. C., Dossman, M. A., Echeverry, M. A., Rodriguez, J. A., Molina, C. H., Molina, E. J., & Melo, I. D. (2009). Estimación de biomasa aérea y desarrollo de modelos alométricos para *Leucaena leucocephala* en sistemas silvopastoriles de alta densidad en el valle del Cauca, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, 58(58), 32–39.



<http://media.utp.edu.co/ciebreg/archivos/publicaciones-divulgativas/rna-no58.pdf>

Benavides, H., & León, G. (2007). INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. In IDEMA (Ed.), *Ideam-Meteo* (Vol. 008, Issue 32).

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>

CAM. (2020). *Plan de acción institucional 2020-2023 Huila territorio de vida, sostenibilidad y desarrollo* (p. 169). [https://cam.gov.co/images/Documentos/PAI\\_-\\_CAM\\_2020-2023\\_.pdf](https://cam.gov.co/images/Documentos/PAI_-_CAM_2020-2023_.pdf)

Chadid, M. A., Dávalos, L. M., Molina, J., & Armenteras, D. (2015). A Bayesian spatial model highlights distinct dynamics in deforestation from coca and pastures in an Andean biodiversity hotspot. *Forests*, 6(11), 3828–3846. <https://doi.org/10.3390/f6113828>

Contreras Santos, J. L., Martínez Atencia, J., Cadena Torres, J., & Fallas Guzmán, C. K. (2019). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 29–41. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. In *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el el cambio climático*. [https://doi.org/FCCC/INFORMAL/84.GE.05-62301\(S\)220705220705](https://doi.org/FCCC/INFORMAL/84.GE.05-62301(S)220705220705)

FAO. (2010). Ganadería y deforestación. *Revista Políticas Pecuarias*, 3, 1–8.

Giraldo, L., Betancur, J., & Perez, A. (2019). Carbon capture potential of different silvopastoral arrangements under stable stocking rate in the northern Coast of Colombia. *7th GGAA –*

- Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference*, 196.  
<http://www.ggaa2019.org/?q=en/proceedings>
- Giraldo, L., Montoya, T., Ángel, M., Castañeda, M., Mendoza, D., Pérez, A., & Torres, A. (2019). Carbon capture by silvopastoral arrangements under contrasting stocking rates in the northern coast of Colombia. *7th GGAA – Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference*, 115.  
<http://www.ggaa2019.org/?q=en/proceedings>
- Gobernacion del Huila. (2019). *Evaluacion Agropecuaria Huila 2019* (pp. 2–5). Secretaría de Agricultura y Minería. Observatorio de Territorios Rurales.
- Gobernacion del Huila, CAM, USAID, & E3 Asesorias. (2014). *Plan de cambio climático Huila 2050: Preparándose para el cambio climático* (p. 153).
- Holdridge, L. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*.  
[https://books.google.com.co/books?id=m3Vm2TCjM\\_MC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=m3Vm2TCjM_MC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Ibrahim, M. A., Mario, C., Cuartas, C. A., Naranjo, J. F., 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*, 45. [http://www.cipav.org.co/pdf/red de agroforesteria/Articulos/almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arborea.pdf](http://www.cipav.org.co/pdf/red_de_agroforesteria/Articulos/almacenamiento%20de%20carbono%20en%20el%20suelo%20y%20la%20biomasa%20arborea.pdf)
- Ibrahim, M., Guerra, L., Casasola, F., & Neely, C. (2010). Importance of silvopastoral systems for mitigation of climate change and harnessing of environmental benefits. *Integrated Crop Management v. 11*, 189–196. <https://doi.org/10.1021/ac052256z>
- IDEAM. (2014). Memoria técnica de la Cuantificación de la superficie de bosque natural y

deforestación a nivel nacional. Actualización Periodo 2012 – 2013. In *Ideam*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. [https://www.profor.info/sites/profor.info/files/Informe Final - Plantaciones Comerciales en Colombia\\_1.pdf%0Ahttp://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022976/MemoriaTecnicaPDI2.pdf](https://www.profor.info/sites/profor.info/files/Informe_Final_-_Plantaciones_Comerciales_en_Colombia_1.pdf%0Ahttp://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022976/MemoriaTecnicaPDI2.pdf)

Instituto Colombiano Agropecuario. (2019). *Censo Pecuario año 2019*. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>

IPCC. (2001). *Tercer Informe de Evaluación del IPCC*. <https://archive.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>

IPCC. (2014a). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis / Resumen para responsables de políticas. In *Cambio Climático 2001: Informe de síntesis*. [https://doi.org/10.1016/S1353-8020\(09\)70300-1](https://doi.org/10.1016/S1353-8020(09)70300-1)

IPCC. (2014b). Cambio climático 2014 Informe de síntesis. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <http://www.ipcc.ch>.

MacDicken, K. G. (1997). *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects* (p. 87). Winrock International Institute for Agricultural Development. [https://www.researchgate.net/publication/237434580\\_A\\_Guide\\_to\\_Monitoring\\_Carbon\\_Storage\\_in\\_Forestry\\_and\\_Agroforestry\\_Projects](https://www.researchgate.net/publication/237434580_A_Guide_to_Monitoring_Carbon_Storage_in_Forestry_and_Agroforestry_Projects)

Mahecha, L. (2003). Importancia de los sistemas silvopastoriles y principales limitantes para su implementación en la ganadería colombiana. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu*, 16, 11–18.

- Messa H. (2009). *Balance de gases de efecto invernadero en un modelo de producción de ganadería doble propósito con alternativas silvopastoriles en Yaracuy* [CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA].  
<http://201.207.189.89/handle/11554/4533>
- ONF Andina. (2014). *Cuantificación y análisis de las emisiones de GEI por sector y subsector en el departamento del Huila. Neiva.* (p. 73). [www.cam.gov.co/documentos-ph2050.html?download=567:emisiones-gei%0A](http://www.cam.gov.co/documentos-ph2050.html?download=567:emisiones-gei%0A)
- Reisinger, A., & Clark, H. (2018). How much do direct livestock emissions actually contribute to global warming? *Global Change Biology*, 24(4), 1749–1761.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.13975>
- Robles Rodríguez, R., Huamancayo Ysminio, G., & Collazos Paucar, L. (2019). Reservas de carbono en sistemas silvopastoriles en el trópico Peruano. *X Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles*, 306–308.  
[http://www.cipav.org.co/pdf/X\\_Congreso\\_Internacional\\_Silvopastoril.pdf](http://www.cipav.org.co/pdf/X_Congreso_Internacional_Silvopastoril.pdf)
- Rojas, J., Ibrahim, M. A., & Andrade, H. J. (2009). Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. *Corpoica Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 10(2), 214–223.
- Rügnitz, M., Chacón, M., & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales* (p. 79). Centro Mundial Agroflorestral (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA).  
[http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF\\_GuiaDeterminacionCarbono\\_esp.pdf](http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF_GuiaDeterminacionCarbono_esp.pdf)

- Ruiz, A., Ibrahim, M., Locatelli, B., Andrade, H. J., & Beer, J. (2004). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica de fincas ganaderas en Matiguás, Nicaragua. *Agroforestería En Las Américas*, 41, 16–21.
- Russo, R. (2015). Reflexiones sobre los sistemas silvopastoriles Reflections on silvopastoral systems. *Pastos y Forrajes*, 38(2), 157–161. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/89088>
- Smith P, M., Bustamante, H., Ahammad, H., Clark, H., Dong, E. A., Elsiddig, H., Haberl, R., Harper, J., House, M., Jafari, O., Masera, C., Mbow, N. H., Ravindranath, C. W., Rice, C., Abad, R., Romanovskaya, A., Sperling, F., & Tubiello, F. (2014). Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change* (pp. 811–922). <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416.017>
- Sotelo, M., Suárez, J. C., Álvarez, F., Castro, A., Calderón, V. H., & Arango, J. (2017). Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico Sistemas silvopastoriles : ¿ una opción viable? In *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)* (Vol. 448). CIAT. <http://hdl.handle.net/10568/89088>
- Vergara, W. (2010). La ganadería extensiva y el problema agrario. El reto de un modelo de desarrollo rural sustentable para Colombia. *Revista Ciencia Animal*, 3, 45–53. <http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ca/article/view/350>
- Walkley, A., & Black, C. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- Yepes, A. P., Navarrete, D., Duque, A. J., Phillips, J. F., Cabrera, K., Alvarez, E., García, M. C., & Ordoñez, M. F. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa -*

*carbono en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-  
IDEAM.

[http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Protocolo+para+la+estimación+nacional+y+subnacional\\_1.pdf](http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Protocolo+para+la+estimación+nacional+y+subnacional_1.pdf)