

**HUELLA DE CARBONO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DEL CENTRO
UNIVERSITARIO REGIONAL DEL NORTE (CURDN) DE LA UNIVERSIDAD DEL
TOLIMA, ARMERO-GUAYABAL, TOLIMA, COLOMBIA.**

**LANNI NICOL SUÁREZ SANTOS
STEFANNY PATIÑO FORERO**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Forestal**

Director

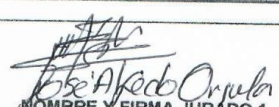
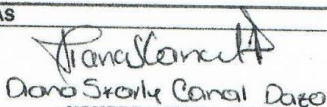
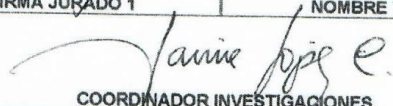
**HERNÁN JAIR ANDRADE CASTAÑEDA
PhD. Agroforestería Tropical**

Co-director

**MILENA ANDREA SEGURA MADRIGAL
Magister en Socioeconomía Ambiental**

**UNIVERSIDAD DEL TOLIMA
FACULTAD DE INGENIERÍA FORESTAL
INGENIERÍA FORESTAL
IBAGUÉ - TOLIMA**

2018

COMITÉ DE INVESTIGACIONES ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO (Acuerdo Consejo de Facultad Ingeniería Forestal 355 de 2013)				
TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO Huella de carbono de los sistemas de producción del Centro Universitario Regional del Norte CURN de la Universidad del Tolima, Amero Guayabal				
NOMBRE DEL (LOS) ESTUDIANTE(S): Nicol Suarez Santos				
DIRECTOR Hernán Jair Andrade C. y Milena Andrea Segura M.				
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 1: José A. Orjuela, Magister				
CALIFICACIÓN JURADO 1	Informe Escrito (65%)	4.81	Sustentación (35%)	4.9
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 2 Diana S. Canal Daza, Magister				
CALIFICACIÓN JURADO 2	Informe Escrito (65%)	4.92	Sustentación (35%)	4.8
CALIFICACIÓN PONDERADA	Jurado 1	4.84	Jurado 2	4.9
CALIFICACIÓN FINAL	4.5	Reprobado		Aprobado
Sobresaliente		Meritorio	X	Laureado
RANGOS DE EQUIVALENCIA: Calificación menor de tres cero (3.0) Calificación entre tres cero (3.0) y tres nueve (3.9) Calificación entre cuatro cero (4.0) y cuatro cuatro (4.4) Calificación entre cuatro cinco (4.5) y cuatro nueve (4.9) Calificación de cinco cero (5.0)				
		REPROBADO APROBADO SOBRESALIENTE MERITORIO LAUREADO		
OBSERVACIONES				
FIRMAS				
 NOMBRE Y FIRMA JURADO 1		 NOMBRE Y FIRMA JURADO 2		
 COORDINADOR INVESTIGACIONES				
CIUDAD: Ibagué		FECHA DE SUSTENTACIÓN: Febrero 15/2018		

COMITÉ DE INVESTIGACIONES ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO (Acuerdo Consejo de Facultad Ingeniería Forestal 355 de 2013)				
TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO Huella de carbono de los sistemas de producción del Centro Universitario Regional del Norte CURN de la Universidad del Tolima, Amero Guayabal				
NOMBRE DEL (LOS) ESTUDIANTE(S): Stefanny Patiño Forero				
DIRECTOR Hernán Jair Andrade C. y Milena Andrea Segura M.				
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 1: José A. Orjuela, Magister				
CALIFICACIÓN JURADO 1	Informe Escrito (65%)	4.81	Sustentación (35%)	4.7
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 2 Diana S. Canal Daza, Magister				
CALIFICACIÓN JURADO 2	Informe Escrito (65%)	4.92	Sustentación (35%)	4.9
CALIFICACIÓN PONDERADA	Jurado 1	4.8	Jurado 2	4.9
CALIFICACIÓN FINAL	4.9	Reprobado	Aprobado	
Sobresaliente		Meritorio	X	Laureado
RANGOS DE EQUIVALENCIA: Calificación menor de tres cero (3.0) Calificación entre tres cero (3.0) y tres nueve (3.9) Calificación entre cuatro cero (4.0) y cuatro cuatro (4.4) Calificación entre cuatro cinco (4.5) y cuatro nueve (4.9) Calificación de cinco cero (5.0)				
OBSERVACIONES				
REPROBADO				
APROBADO				
SOBRESALIENTE				
MERITORIO				
LAUREADO				

FIRMAS	
 NOMBRE Y FIRMA JURADO 1	 NOMBRE Y FIRMA JURADO 2
 COORDINADOR INVESTIGACIONES	
CIUDAD: Ibagué	FECHA DE SUSTENTACIÓN: Febrero 15/2018

DEDICATORIA

A Dios, mi guía quien me dio la fortaleza, entrega y tolerancia para emprender este reto profesional el cual logre culminar con éxito.

A mis padres, Diego Suárez y Sandra Santos, por su paciencia y el amor único y más leal que todos los días me expresan; cada día durante este proceso solo recibía por parte de ellos palabras alentadoras de fuerza mental y resistencia para la culminación de este proyecto.

A todos mis familiares, amigos y compañero de aventuras que siempre estuvieron presentes con palabras de ánimo a lo largo de este proceso.

Lanni Nicol Suárez Santos

A Dios, por permitirme culminar con éxito esta etapa profesional, cumpliendo cada una de las metas propuestas hasta ahora.

A mis padres, que son el pilar fundamental de lo que soy, por ser el mayor apoyo incondicional, siendo el principal motivo por el cual seguir y luchar cada día, por estar en los momentos de triunfos y en los momentos difíciles enseñándome a valorarles cada día más.

Stefanny Patiño Forero

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Tolima y al Comité Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto de investigación, a través de la convocatoria (390220516).

Al Ingeniero Hernán Jair Andrade, como director, por su paciencia y comprensión en la etapa más difícil de las revisiones del proyecto, por la facilidad que nos brindó de acercarnos a él y preguntarle un millón de veces cosas lo que no entendíamos o lo que simplemente nos tenía confundidas.

A la Ingeniera Milena Segura Madrigal, como co-directora, por su exigencia y disciplina en el momento de organizar y procesar todos datos de la investigación.

Al Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), por permitir realizar el trabajo de campo en las instalaciones, a Luis Ferney Peñuela coordinador Pecuario e Iber González coordinador agrícola, por toda la colaboración y facilidad de la información para nuestro interés. Por último, al señor Ervey Basto Morales por ser nuestro guía y acompañante en cada uno de los recorridos que hicimos en los lotes de la granja.

Al Ingeniero Boris Villanueva, por la asesoría en la identificación de muestras para el debido registró en la colección del Herbario-Toli. Al Ingeniero Julián Leal Villamil por ayudarnos en la construcción del mapa de la zona de muestreo.

Al Grupo de Investigación Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales “PROECUT” por darnos la oportunidad de realizar nuestro trabajo de grado y formarnos como jóvenes investigadores. A todos los que pertenecen al grupo queremos darles las gracias por sus buenas energías y sus atenciones, especialmente a la señorita Diana Canal por su colaboración en trámites institucionales y orientación en el documento final. Gracias por la confianza y mucha paciencia que nos tuvieron.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	16
2.2 AFECTACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GANADERÍA Y AGRICULTURA	16
2.3 EL EFECTO INVERNADERO	17
2.3.1 Clasificación de gases de efecto invernadero.	17
2.4 HUELLA DE CARBONO (HC).....	18
2.4.1 Metodologías para la estimación de la huella de carbono.....	20
2.4.2 Mercado mundial de carbono.....	20
2.5 EMISIÓN Y REDUCCIÓN DE GEI EN COLOMBIA	21
2.6 ACTIVIDADES QUE DETERMINAN LA HUELLA DE CARBONO.....	21
2.6.1 Emisión de GEI.	21
2.6.2 Clasificación de los sistemas de uso del suelo.	23
2.7 FIJACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES	25
2.7.1 Biomasa.	25
2.7.2 Biomasa arriba del suelo.....	26
2.7.3 Biomasa abajo del suelo.	26
2.7.4 Hojarasca	26
2.7.5 Carbono orgánico del suelo.	26
3. METODOLOGÍA	28

3.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	28
3.2	IDENTIFICACIÓN DE LOS USOS DE LA TIERRA DEL CURDN	29
3.3	ESTIMACIÓN HUELLA DE CARBONO	29
3.3.1	Sistemas de producción evaluados.....	29
3.3.2	Almacenamiento y fijación de carbono en biomasa total.....	30
3.3.3	Estimación de las emisiones de GEI	35
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1	IDENTIFICACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO.....	39
4.1.1	Sistema de producción forestal.	40
4.1.2	Sistema de producción agrícola:	40
4.1.3	Sistema de producción pecuario.	40
4.1.4	Sector administrativo.....	40
4.1.5	Áreas no cultivadas.	40
4.2	ALMACENAMIENTO DE CARBONO.....	40
4.3	FIJACIÓN DE CARBONO.....	43
4.4	EMISIONES DE GEI DEL CURDN	46
4.4.1	Emisiones de los sistemas de producción.....	46
4.4.2	Emisiones del sector administrativo.	50
4.5	HUELLA DE CARBONO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.....	52
4.6	HUELLA DE CARBONO UNITARIA.....	55
4.6.1	Huella de carbono <i>per cápita</i>	55
4.6.2	Huella de carbono por producto.	56
4.7	HUELLA DE CARBONO DEL CURDN	56
5.	CONCLUSIONES	58
	RECOMENDACIONES	60
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Metodologías utilizadas para el cálculo de la huella de carbono.	20
Tabla 2. Parcelas establecidas para el inventario de carbono en cada sistema de uso del suelo en el CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.	31
Tabla 3 Modelos alométricos utilizados para la estimación de biomasa arriba del suelo de árboles individuales en el CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.	33
Tabla 4. Almacenamiento de carbono en biomasa total para los diferentes usos del suelo del CURDN, Tolima, Colombia.....	43
Tabla 5. Categorías etarias para el hato bovino del CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.	48
Tabla 6. Fuentes de emisión del área administrativa del CURDN, Armero-Guayabal, Tolima.	50
Tabla 7. Huella de carbono de los sistemas de producción, Armero-Guayabal, Tolima.	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la zona de estudio.	28
Figura 2. Medición de árboles presentes en las parcelas temporales de muestreo en sistemas de uso del suelo en el CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.	32
Figura 3. PTM establecidas en los diferentes usos del suelo definidos en el CURDN .	39
Figura 4. Tasa de fijación de los diferentes sistemas de producción del CURDN, Tolima, Colombia.	46
Figura 5. Emisión de GEI producidas por los sistemas de producción del CURDN.	49
Figura 6. Huella de carbono de la granja CURDN.....	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

El cambio climático es ocasionado por el aumento en las concentraciones de gases de efecto de invernadero. El objetivo de este estudio fue estimar la huella de carbono del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), Armero, Guayabal. La huella de carbono se estimó como la diferencia entre la fijación de carbono en biomasa y las emisiones de gases de efecto invernadero. Se establecieron 44 parcelas temporales de muestreo en los diferentes usos del suelo donde se midió todos los árboles con diámetro del tronco a la altura del pecho > 10 cm y plantas de cacao. Se emplearon modelos alométricos y factores de expansión de biomasa, la fracción de carbono (0,5) y se calculó el CO₂e. Se estimó la fijación de los sistemas productivos en biomasa de leñosas perennes considerando el almacenamiento de carbono y la edad. Se indagó, mediante encuestas semi-estructuradas, las actividades de manejo en los sistemas productivos y del área administrativa que emiten gases de efecto invernadero. La huella de carbono del CURDN fue positiva (1575,7 t CO₂e/año), es decir, la fijación es mayor que las emisiones de gases de efecto invernadero. Se encontró que los sistemas de producción agrícolas y pecuarios son emisores netos de éstos gases (1,1 y 2,8 t CO₂e/ha/año, respectivamente); mientras que los sistemas forestales fijan netamente 14,0 t CO₂e/ha/año. Los resultados muestran que el CURDN es carbono neutro y podría eventualmente vender créditos de carbono, adicionalmente se muestra la importancia de los componentes leñosos como sumideros de carbono para la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático, huella carbono, fijación de carbono, emisión gases de efecto invernadero, modelos alométricos

ABSTRACT

The climate change is caused by the increase of greenhouse gases. The objective of this study was to estimate the carbon footprint in the Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), Armero, Guayabal. The carbon footprint was estimated as the difference between carbon fixation in biomass and the emission of greenhouse gases. A total of 44 temporal sampling plots in the different land uses where all trees with diameter of trunk at the breast height > 10 cm and cacao plants. Allometric models and biomass expansion factors and the carbon fraction (0.5) were employed and CO_{2e} was calculated. It was estimated the fixation of the productive systems in biomass of woody perennial plants considering carbon storage and age. It was consulted, through semi-structured interviews, the activity management in the productive systems and the administrative area that emit greenhouse gases. The carbon footprint of the CURDN was positive (1575.7 t CO_{2e}/year), in other words, the fixation is higher than emissions. It was found that agriculture and cattle productive systems are net emitters (1.1 and 2.8 t CO_{2e}/ha/year, respectively); whereas the forestry systems annually fix 14.0 t CO_{2e}/ha/year. The results show that CURDN is carbon neutral and it could sale carbon credits, additionally it is shown the importance of woody components as carbon sinks for climate change mitigation.

Keywords: Climate change, carbon footprint, carbon fixation, emission of greenhouse gases, allometric models.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, ocasionado por el incremento en la concentración de los gases de efecto de invernadero (GEI) en la atmósfera, comprende relaciones complejas entre procesos climáticos, ambientales, económicos, políticos, institucionales, sociales y tecnológicos (Panel intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2007), Según el IPCC, 2001a "...la preparación de una respuesta del cambio climático se caracteriza por la adopción de decisiones en condiciones de incertidumbre y riesgo, lo que abarca cambios no lineales y/o irreversibles" (p. 3). En un informe del Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2014, se concluyó que del total de las emisiones de GEI, el CO₂ constituye aproximadamente el 70%, mientras que cerca del 20% corresponde a CH₄ y un 9% son N₂O.

Según un informe el IPCC, 2002, afirma que los cambios de uso del suelo, como la deforestación y la degradación reducen sustancialmente los bosques y las reservas de carbono, incrementando a su vez las emisiones de GEI, lo cual acentúa el cambio climático. Los sistemas de uso de la tierra que incluyen leñosas perennes, tal como bosques, plantaciones y sistemas agroforestales mitigan el cambio climático al fijar carbono en biomasa, necromasa y suelos y al mejorar las condiciones de suelo (Guerra, 2007; Pachón & Marín, 2012; Alvarado, Andrade & Segura, 2013; Marín, Andrade & Sandoval, 2016; Canal, 2017).

Ibrahim et al., (2007) mencionan que los principales sumideros de carbono en el uso de la tierra son el carbono orgánico del suelo (COS) y la biomasa arriba del suelo. Brown, Cabarle & Livernash, (1997) afirman que el carbono almacenado en los bosques primarios varía entre 60 y 230 t/ha, en bosques secundarios entre 25 y 190 t/ha, y en el suelo se encuentra entre 60 y 115 t/ha.

La huella de carbono (HC) mide la cantidad de emisiones de GEI que aceleran el cambio climático, relacionado a la producción humana o actividades de consumo (Wiedmann &

Minx, 2008) y conocerla permite identificar posibles rutas para la reducción y mitigación de estos gases (Guerra, 2007). Las plantaciones forestales, bosques primarios, secundarios y todos los sistemas que involucren leñosas perennes, tal como sistemas agroforestales, absorben netamente el CO₂ de la atmósfera, generando alternativas de mitigación de este gas (Segura & Andrade, 2012; Montagnini, 2015). La HC considera la fijación de carbono en biomasa y/o suelos menos las emisiones de GEI; si este balance es negativo indica emisión neta, si es positivo es una fijación neta que representa la neutralidad de carbono (Segura & Andrade, 2012). La HC refleja que tan amigable con el medio ambiente, en términos de emisiones de GEI, es una actividad humana (Andrade et al., 2014a).

Baena (2015), afirma que entre el 2011 y 2020 fue declarada como la década de la biodiversidad por las Naciones Unidas, esto implica la conservación de áreas verdes, corredores naturales, creación de parques y techos blandos como sumideros de carbono. Colombia cuenta con un gran potencial frente al mercado mundial de carbono, ocupando el cuarto lugar de Hispanoamérica y el número 12 del mundo con un total de 190 proyectos de MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio) registrados ante la Organización de las Naciones Unidas (Galindo, 2013).

Sin embargo, es poca la información existente sobre los distintos depósitos y reservas de carbono forestal en Colombia (Monsalve, 2016), se ha estimado que el promedio nacional de carbono almacenado en la biomasa aérea de los bosques en Colombia varió entre 79,1 y 168,9 Mg C/ha, indicando que las reservas de carbono oscilan entre 4,7 y 10,0 Pg¹ C, representando entre 17,1 y 36,6 Pg CO_{2e} que no han sido emitidos a la atmósfera (Phillips et al., 2014). Este es el potencial en el mercado de los bonos de carbono en Colombia y productos con sellos diferenciados como el carbono neutro (Segura & Andrade, 2012).

¹ 1 Pg (Petagramos) = 10¹⁵ g = 1 Gt (Gigatoneladas).

La estimación de la huella de carbono, como el total de GEI emitidos en las etapas de producción en el sector agropecuario, podría traer consigo beneficios contribuyendo al compromiso frente a la sostenibilidad del sector. Esta información podría promover en un futuro el consumo de productos que tengan las menores emisiones, generando un cambio en las cadenas de producción (Segura & Andrade, 2012; Umaña, 2012; Andrade et al., 2014a).

El objetivo de la presente investigación fue cuantificar las emisiones de GEI producto de las actividades de manejo de los diferentes sistemas de producción, actividades académicas y administrativas en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), de la Universidad del Tolima en Armero-Guayabal. De la misma forma, se pretende realizar estimaciones a nivel de los sistemas de uso de suelo más dominantes del Centro, reconociendo el estado actual del cambio y uso del suelo, dando como resultado la fijación de carbono y aquellas actividades claves en la emisión de GEI. Es importante conocer si este balance es positivo, negativo o cero; dando opciones y/o estrategias de mitigación y adaptación para cada uno de los sistemas y el CURDN en general. Esta huella de carbono será una herramienta clave para la política ambiental de la Universidad del Tolima.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar la huella de carbono de los sistemas de producción del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima en Armero-Guayabal. Tolima.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar las emisiones de gases de efecto invernadero de las principales actividades productivas, académicas y administrativas del CURDN.
- Cuantificar la fijación de carbono en biomasa total en los principales usos del suelo en el CURDN.
- Estimar la huella de producción unitaria de los principales productos comercializados en el CURDN.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO

El clima se define como la variación de las condiciones atmosféricas, observadas en un área determinada el cual se determina por los cambios frente al estado y evolución del tiempo en un determinado lugar o espacio, en un periodo de tiempo relativamente largo al menos unos 30 años. (Cifuentes 2010; Benavides & León, 2007).

El IPCC (2002) define “Cambio climático como cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de una actividad humana” (p. 6). Esto hace referencia a cambios directos en los procesos que definen el funcionamiento del sistema tierra (Duarte et al., 2006). El cambio climático está siendo acelerado principalmente por el incremento de la concentración de GEI como el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera (Ibrahim et al., 2007). Estas emisiones crecientes son actualmente de origen antropogénico, siendo un problema que afecta a nivel mundial de forma nociva en los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta (IPCC, 2001b).

2.2 AFECTACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GANADERÍA Y AGRICULTURA

El cambio climático plantea múltiples amenazas en la agricultura, afectando el rendimiento de cultivos, reduciendo la productividad e impactando economías locales, comprometiendo la seguridad alimentaria en algunos países de la región Andina y Centro América (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016). Estas regiones no solo reciben los impactos del cambio climático también contribuyen con sus efectos siendo responsable del 14% de las emisiones globales de GEI; a su vez, tienen el potencial de ser parte importante de la solución a través de la mitigación, reduciendo o eliminando una parte de las emisiones globales (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2009).

El IPCC (2007), menciona que es probable que en América Latina los cultivos de arroz sufran reducciones generalizadas en rendimiento por las altas pérdidas de producción de granos básicos hacia el año 2020. El efecto que trae consigo el cambio climático es una realidad clara a la vista de todos la cual no solo está afectando la producción de alimentos, sino también la disponibilidad y estabilidad de los mismos (FAO, 2015). Las prácticas agrícolas que capturan y retienen carbono en el suelo, ofrecen alternativas beneficiosas frente al cambio climático (ONU, 2009), Por ejemplo, la restauración de pastizales degradados, a través de prácticas de pastoreo y producción de forraje sostenible con un manejo adecuado del suelo y agua, pueden fijar carbono a diferentes profundidades, evitando la erosión y mitigando el cambio climático al retener grandes cantidades de CO₂ (FAO, 2014).

2.3 EL EFECTO INVERNADERO

Según Benavides & León (2007), El efecto invernadero es un proceso que ocurre de forma natural generado por la presencia paulatina en el aire de una serie de gases, como el vapor de agua (H₂O) y el CO₂, que atrapan, absorben y remiten radiación en la atmósfera. Cuanta mayor cantidad de GEI se encuentren en la atmósfera mayor es la energía que atrapan haciendo a su vez más caliente el planeta (IPCC, 2007). Adicionalmente, se encuentran en la atmósfera un grupo de GEI creados por las actividades diarias del ser humano, tal como el halocarbono y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, regulados como el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (Benavides & León, 2007).

2.3.1 Clasificación de gases de efecto invernadero. Benavides & León (2007) mencionan que existen dos tipos de GEI, los directos e indirectos. Los directos son aquellos encontrados de forma natural en la composición química de la atmósfera con mayor proporción en el aire, en este grupo se encuentran:

- Dióxido de carbono (CO₂). El CO₂ es uno de los gases más frecuentes y abundantes en la atmósfera, es el más importante en relación a los procesos vitales de las plantas,

animales y el ser humano; siendo el segundo más significativo en cuanto refiere al calentamiento global, es originado de manera natural y/o antropogénica.

- Metano (CH_4). Este gas es importante en la determinación de la capacidad de oxidación en la troposfera. La fuente más relevante de este gas es la descomposición de materia orgánica en los sistemas biológicos.
- Óxido nitroso (N_2O). A este gas, cuya fuente proviene de forma natural y antropogénico, se le atribuye cerca del 6% del forzamiento del GEI. El N_2O es generado por fuentes de quema de combustibles, biomasa y la agricultura.

Los GEI indirectos son aquellos contaminantes del aire no producidos de forma natural sino desarrollados por el hombre con fines industriales, que se convierten a GEI directos. En este grupo se encuentran los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano y el monóxido de carbono, los hidrofluorocarbono (HFC) y compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano (COVDM).

2.4 HUELLA DE CARBONO (HC)

El concepto de huella de carbono es parte de la metodología de análisis del ciclo de vida de un producto y sirve como un indicador de impacto en la medición del potencial del cambio climático (Finkbeiner, 2009). Según Wiedmann & Minx (2008), la HC establece una cierta cantidad de emisiones de GEI asociado a la producción humana o actividades de consumo. A partir de la determinación de esta variable es posible tomar medidas correctivas para reducir los niveles de emisión en procesos productivos o actividades (British Standards Institution [BSI], 2011).

“En el pasado, la medición de la HC se centraba en empresas aisladas que de manera voluntaria realizaban esfuerzos por reducir sus propias emisiones mientras que en la actualidad, es cada vez mayor la preocupación en los consumidores por los productos de mercado” (Poroma, 2012, p. 9), la HC se expresa en toneladas de CO_2 equivalentes

(tCO₂e) y se calcula multiplicando las actividades (cantidad) por factores de emisión ya establecidos (Rodas, 2014; IPCC, 2006).

Según Rodas, (2014) “La Huella de Carbono puede analizarse sobre un individuo, institución, evento o producto” (p.32). En la HC a nivel individual o institucional se evalúan las emisiones de GEI de todas las actividades que se llevan a cabo, considerando el uso, consumo de energía y transporte que hay dentro de la institución; mientras que la HC de un producto mide las emisiones de GEI en el ciclo de vida de éste (Rodas, 2014). Cuantificar el impacto por emisiones de estos gases permite identificar posibilidades de reducción, tanto en emisiones como en costos (IPCC, 2005).

En el caso de sistemas de producción que fijen carbono, tal como los que incluyen leñosas perennes, la HC resulta del balance de la fijación de carbono en biomasa, necromasa y/o suelos menos las emisiones de GEI en las actividades de producción y transformación, esto hace que los sistemas fijadores de carbono tengan posibilidades de tener una huella positiva y ser amigables con el medio ambiente. (Segura & Andrade, 2012; Andrade et al., 2014a). Ibrahim et al., (2007) afirman que las “fincas ganaderas pueden aportar carbono mediante la implementación de sistemas agroforestales, bosques remanentes, áreas de vegetación secundaria en regeneración, pasturas arboladas y otros usos de la tierra dedicados a labores agrícolas que pueden fungir como sumideros de carbono atmosférico” (p.28).

En el manejo de sistemas de producción, las emisiones de GEI están dadas por el uso de fertilizantes nitrogenados y carbonatos de calcio, uso de electricidad, de combustibles fósiles y de leña (Segura & Andrade, 2012). De estas actividades, la fertilización nitrogenada tiene la mayor importancia en arroz y café (Andrade, Campo & Segura, 2014b; Andrade, Marín & Pachón, 2014c). Por otra parte, Andrade, Segura & Varona (2015), afirman que el uso y aplicación de fertilizantes nitrogenados contribuye con más del 60% de las emisiones de GEI en sistemas de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

2.4.1 Metodologías para la estimación de la huella de carbono. Existen diferentes metodologías para la estimación de la HC; sin embargo, no todas generan información para todos los casos (Rodas, 2014). A continuación de forma explicativa se presentan las metodologías más empleadas para estimar la HC (Tabla 1).

Tabla 1. Metodologías utilizadas para el cálculo de la huella de carbono.

Metodología	Descripción
Protocolo de gases de efecto invernadero (GHG Protocolo)	Es la herramienta internacional más utilizada para el cálculo de emisiones, permite hacer inventarios de bajos costos ofreciendo información para preparar estrategias de gestión y reducción.
Public Available Specification 2050 (PAS, 2050)	Patrón que proporciona método para determinar el ciclo de vida de los GEI de los bienes y servicios.
Directrices para los inventarios nacionales de GEI (IPCC, 2006).	Provee metodologías destinadas a la estimación de los inventarios nacionales de emisiones y absorciones por sumideros de GEI.

Fuente: Rodas (2014)

2.4.2 Mercado mundial de carbono. Existe en el mundo dos mercados grandes de créditos de carbono: los regulados y los voluntarios. Los regulados son los definidos en el Protocolo de Kioto, tal como la implementación Conjunta (IC) y los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), entretanto, los mercados voluntarios son aquellos en donde se transa el carbono por voluntad propia o respondiendo a exigencias del mercado (Samayoa & Sosa, 2011). Los proyectos forestales y de intervenciones de uso de la tierra generaron la venta de 32,7 millones de t CO_{2e}, con un valor de U\$ 200 millones en el año 2013 (Ecosystem Marketplace, 2014).

2.5 EMISIÓN Y REDUCCIÓN DE GEI EN COLOMBIA

Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto de Invernadero, entre 1990 y 2010 las emisiones de estos gases han aumentado en un 15% en Colombia para el 2012, el país emitió 258 millones de toneladas, y pasó de contribuir con el 0,37% al 0,42% mundial (Correa, 2016).

El transporte y el ordenamiento territorial (uso del suelo a escala municipal), son los dos principales aspectos en los que el país debe concentrarse de manera prioritaria, para reducir significativamente sus GEI, ya que juntos suman el 87% de las emisiones emanadas en el 2012 (Correa, 2016). A partir de la firma con los compromisos adquiridos en la Convención de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CNUCC), el país se ubica como un país ambicioso y propositivo en cuanto alcanzar la meta de reducción voluntaria de un 20% de emisiones de GEI, como aporte a evitar el aumento de 2°C en la temperatura media anual, constituyendo el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Pulido et al., 2016).

2.6 ACTIVIDADES QUE DETERMINAN LA HUELLA DE CARBONO

En el caso de la HC, se incluyen todas las emisiones de GEI que se asocian directa o indirectamente a una actividad, por consiguiente, se debe tener en cuenta todo el ciclo de vida de un producto y/o servicio, desde las materias primas o insumos hasta el producto final. (Segura & Andrade, 2012; Andrade, Segura & Varona, 2015)

2.6.1 Emisión de GEI. El IPCC (2006), para el reporte de emisiones y absorciones en inventarios nacionales de GEI, divide las emisiones en cuatro grandes grupos generadas 1) por el uso de electricidad, 2) procesos industriales, 3) agricultura silvicultura y otros usos de la tierra y 4) residuos; estos grupos a su vez se dividen en subgrupos que representan diferentes actividades emisoras de GEI por ejemplo: la fertilización nitrogenada, combustibles fósiles y emisión derivada del ganado (fermentación entérica y gestión de estiércol).

2.6.1.1 Energía. El sistema de conexión de energía eléctrica colombiano para el año 2012 estaba constituido principalmente por generación de energía hidráulica, lo cual corresponde a un 64% de la producción, un 33% cubre a la generación térmica y un 3% atribuido a las nuevas tecnologías de energía renovable (eólica, solar y biomasa) que apenas han sido exploradas (Castillo, 2012).

Colombia para el año 2012 consumió cerca de 1 EJulio² de energía según información presentada en el balance energético nacional, de cual el 67% pertenece al consumo de fuentes fósiles, 13% es biomasa y un 20% al consumo de energía eléctrica (aproximadamente el 20% de la electricidad proviene de fuentes fósiles y cerca del 7% de gasolina y diésel consumidos de origen vegetal) (Gutiérrez & Andrade, 2013). Durante el año 2015, las fuertes temperaturas causadas por el fenómeno del Niño aumentaron la demanda de energía en el país, esto se evidenció en el aumento del consumo de energía eléctrica que tuvo el mercado regulado con un 5,5 y un 1,7% el mercado no regulado en las regiones cálidas del país durante los meses de julio a diciembre (Compañía de Expertos en Mercado XM, 2015); Por otra parte, para el año 2015, la demanda de energía eléctrica del Sistema Interconectado Nacional de Colombia subió el 4,2%, con un consumo de 66,174 GWh (Compañía de Expertos en Mercado XM, 2015).

2.6.1.2 Combustión móvil. Esta actividad da origen a emisiones de GEI directos, como CO₂, CH₄ y N₂O, generados por la quema de diversos tipos de combustible, así como otros contaminantes de GEI indirectos que contribuyen a la contaminación del aire (IPCC, 2006). El transporte terrestre abarca aquellos vehículos que funcionan con diferentes tipos de combustibles tanto gaseosos como líquidos, en este grupo se encuentran los automóviles, camiones de carga, autobuses y motocicletas (IPCC, 2006). Se deduce que el sector del transporte en el mundo emite un 20% del total de las emisiones de GEI (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, [IICA], 2007).

² 1 EJulio = 10¹⁸ Julios

2.6.1.3 Emisiones totales de GEI, diferentes al CO₂ derivadas del ganado. La producción pecuaria es una de las causas principales de emisiones de GEI en el mundo, al producir CO₂, CH₄ y N₂O a lo largo de su ciclo (Carmona, Bolívar & Giraldo, 2005). El ganado afecta al cambio climático al emitir GEI, de forma directa por medio de la fermentación entérica o la gestión de estiércol y de forma indirecta en el caso de la transformación de áreas de bosques en áreas de cultivos y/o pastizales (Hristov et al., 2013). Se ha calculado, con base en el análisis del ciclo de vida (ACV), que el sector ganadero emite cerca del 18% del total de las emisiones de los GEI antropogénicas (Steinfeld et al., 2006).

2.6.1.4 Fuentes de emisión de GEI generadas por la producción de ganado. La fermentación entérica hace referencia al CH₄ que se genera durante la digestión de los rumiantes y es expulsado al eructar, según la calidad y tipo de alimento (Leyva et al., 1999). La gestión de estiércol se refiere a las emisiones de CH₄ y N₂O generadas en el proceso de descomposición anaeróbico de la materia orgánica, donde “El potencial de producción de metano del ganado depende de la composición específica del estiércol, que a su vez depende de la composición y digestibilidad de la dieta del animal” (Tubiello et al., 2015. p.14).

2.6.2 Clasificación de los sistemas de uso del suelo. Se determina el uso actual del suelo e identifican sus principales coberturas vegetales (Corpoaire, 2002).

2.6.2.1 Sistemas forestales. Conformado por las estructuras productivas representadas en vegetación leñosa, Olmeda & Castillo (1998).

- Bosque secundario. Es aquel bosque originado naturalmente por fenómenos atmosféricos, fauna silvestre o bien sea intervenido por la mano del hombre (Henao, Ordoñez, De Camino, Villalobos & Carrera, 2015). El grado de recuperación para su equilibrio natural es a través de una sucesión de especies endémicas, dependiendo de la duración e intensidad del uso anterior de estas áreas para cultivos agrícolas o pastos (Smith, Sabogal, de Jong & Kaimowitz, 1997).

- Bosque de galería o corredores. Son formaciones de árboles, arbustos y especies herbáceas que se desarrollan en forma de franjas en los márgenes de los ríos protegiendo los cursos del agua a lo largo de su recorrido, formando redes continuas de vegetación natural de gran importancia ecológica (Murgueitio, Giraldo & Cuartas, 2006).
- Plantaciones forestales. Es un cultivo de árboles plantados que conforma una masa boscosa que dependiendo de su objetivo puede generar beneficio a mediano y largo plazo (Zanotti & Galloway, 1996).
- Plantaciones lineales. Compreendida por una o más hileras de árboles y/o arbustos plantados en línea contiguo a una parcela dedicada a cultivos agrícolas, pasturas o ambos en donde existe interacción biológica (Méndez, Beer, Faustino & Otálora, 2000).
- Árboles dispersos. Se entienden como formaciones arbóreas que se pueden encontrar distribuidas aleatoriamente o sistemáticamente, ocupando tierras destinadas a otros propósitos diferentes a las boscosas (Kleinn, 2000).

2.6.2.2 Sistemas de producción agrícola. Hace referencia a cultivos de explotación convencional, monocultivos transitorios con asocio a leñosas perennes, de alto rendimiento por hectárea, de los cuales se obtiene materia prima de origen vegetal (Guerra, 2007).

- Sistemas agroforestales (SAF). Es un sistema en forma de cultivo múltiple donde se relacionan dos o más especies de plantas en una misma área; teniendo en cuenta que al menos una de ellas debe ser leñosa perenne y la otra una planta con fin agrícola (incluyendo pastos), el principal propósito de este tipo de sistemas es encontrar opciones para optimizar la baja producción y degradación de la tierra (Somarriba, 1990).

2.6.2.3 Sistema de producción pecuario. Son considerados como la estrategia social que puede proveer seguridad en el sustento diario, conservar ecosistemas, promover la conservación de la vida silvestre y satisfacer los valores culturales y tradiciones (FAO, 2007).

- **Sistemas silvopastoriles (SSP).** Es una alternativa de producción pecuaria que permite una mejor productividad a través de la combinación de leñosas perennes con componentes como forrajeras herbáceas y animales bajo un mismo sistema integral, algunas opciones de sistemas silvopastoriles que se pueden encontrar son, cercas vivas, árboles y arbustos dispersos en potreros (Pezo & Ibrahim, 1996).

2.7 FIJACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES

El almacenamiento de carbono se refiere a las existencias de este elemento en un determinado ecosistema vegetal (Segura, 1997, p.35), el cual se expresa en t C/ha; mientras que la fijación de carbono detalla el incremento en el almacenamiento de carbono durante un periodo de tiempo (Segura, 1997, p.35) y se considera en t C/ha/año.

La transformación del bosque en campos agrícolas y potreros no implica la erradicación del bosque ni del árbol, los SAF y SSP demuestran la riqueza, diversidad de especies y densidad del árbol, siendo compatibles con la producción animal o agrícola (Detlefsen y Somarriba, 2015). Según Dávila (2011), “Las especies leñosas tienen una gran capacidad de incorporar a sus tejidos el carbono capturado de la atmosfera” (p. 63). Según Snowdon et al., (2002), los ecosistemas forestales acumulan carbono en cuatro componentes: biomasa aérea, biomasa abajo del suelo, materia orgánica (hojarasca y materia muerta) y suelo (carbono del suelo).

2.7.1 Biomasa. Según Quiceno y Tangarife (2013), la biomasa es “la cantidad total de materia orgánica en el ecosistema en un momento dado, en el caso de la biomasa vegetal, la cantidad de materia viva producida por las plantas y almacenada en sus

estructuras en forma de biomasa” (p. 19) que incluyen las partes aéreas y subterráneas, su fuente de producción es la luz solar.

2.7.2 Biomasa arriba del suelo. Toda la biomasa viva por encima del suelo incluyendo el tronco, el tocón, las ramas, la corteza, semillas y las hojas (FAO, 2004). La biomasa aérea representa 70% en promedio del carbono acumulado en ecosistemas forestales (Schlegel, 2001).

2.7.3 Biomasa abajo del suelo. Se refiere a las raíces de la vegetación del ecosistema. (Gamarra, 2001). Marín et al., (2016), en sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, reportaron datos de biomasa abajo del suelo en un rango entre 5,3 y 20,8t/ha.

2.7.4 Hojarasca y materia vegetal muerta. La hojarasca y materia muerta es la vegetación que se encuentra en proceso de descomposición, la hojarasca, se colecta del suelo, en un marco de (50 x 50 cm), incluyendo el humus. La otra materia vegetal muerta se refiere, a los árboles muertos en pie o caídos (Dávila, 2011).

2.7.5 Carbono orgánico del suelo. El carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1 500 Pg C a 1 m de profundidad (FAO, 2002), dicho almacenamiento depende de la concentración de carbono orgánico en suelo y la densidad aparente (Alvarado, Andrade & Segura, 2013). Los sistemas agroforestales pueden almacenar carbono (biomasa y suelo) entre 20 y 204 t ha⁻¹ (Ibrahim et al., 2007).

Diferentes estudios reportan valores de almacenamiento y fijación de carbono en los diferentes usos del suelo; Ibrahim et al., 2007 reporta valores de 158,7 t C/ha en la biomasa aérea de bosques riparios en Colombia y 90,8 y 23,0 t C/ha en bosques secundarios de Costa Rica y Nicaragua respectivamente. Este mismo autor indica que los sistemas agroforestales por su parte pueden almacenar entre 20 y 204 t C/ha, y las plantaciones de teca de 92,4 t C/ha en Costa Rica.

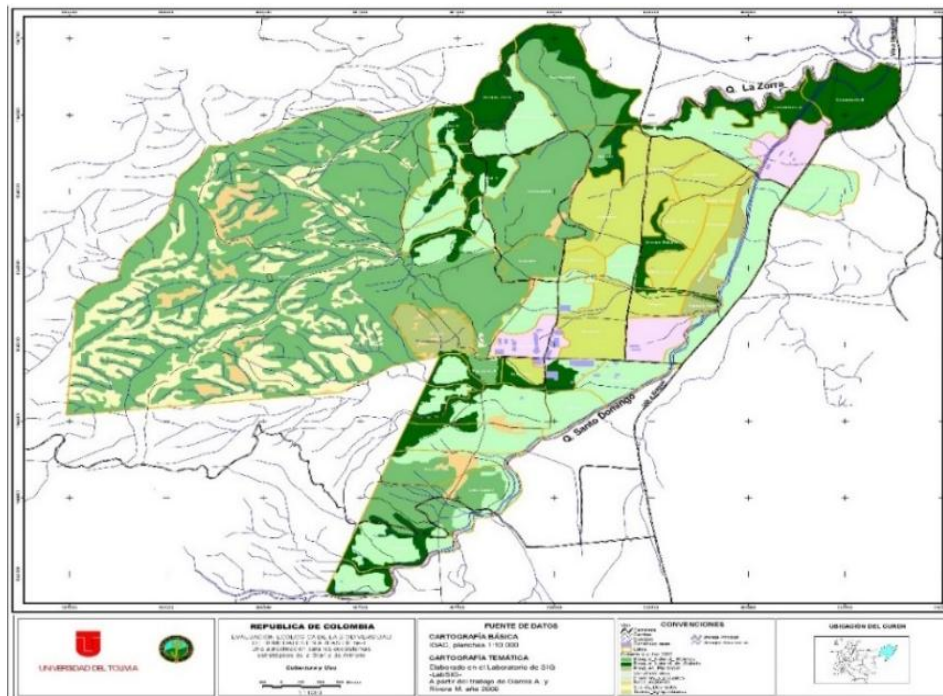
Otros estudios como los reportados por Espinosa et al., (2012), demuestran valores de almacenamiento de carbono en diferentes sistemas agroforestales entre 114 y 29 t C/ha y 2,0 t C/ha para sistemas silvopastoril en el estado de Veracruz, México. Ávila et al., (2001), reporta fijación de carbono entre 0,3 y 2,2 t C/ha/año para sistemas agroforestales. Fonseca (2008), por su parte reporta en plantaciones forestales de (*V. guatemalensis*, *H. alchorneoides*) y bosques secundarios valores de fijación de 6,5, 5,5 y 1,5 t C/ha/año, respectivamente.

3. METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se desarrolló en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, el cual se encuentra ubicado en la zona de vida bosque seco tropical (Bs-T) (Holdridge1996), en la vertiente norte del río Magdalena a unos 85 km de la vía que comunica Ibagué a Armero-Guayabal. El centro cuenta con un área aproximadamente 700 ha, divididas así: 10 ha del área administrativa, 80 ha destinadas a la agricultura, 119 ha de uso pecuario, 60 ha de uso forestal y aproximadamente 431 ha de áreas de proyectos de reforestación (Universidad del Tolima, 2015). La zona cuenta con una temperatura media anual de 27°C, una precipitación promedio de 1738 mm anuales y una altitud entre 250-275 m (Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], 2011).

Figura 1. Delimitación del área de estudio en el CURDN.



Fuente: García y Rivera (2000)

3.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS USOS DE LA TIERRA DEL CURDN

Se identificó los principales usos y coberturas del suelo presentes en el CURDN, con base en mapas temáticos proporcionados por el Laboratorio de SIG de la Universidad del Tolima e imágenes de Google Earth. De los principales usos del suelo, la intensidad de muestreo fue de 2,5%, teniendo en cuenta la metodología de Duaber (1995), según el área total de la población. Se prestó especial atención en aquellos sistemas de uso del suelo que incluyen especies leñosas perennes y fijan carbono en biomasa. Esta información se verificó, complementó y actualizó en campo tomando puntos de geo-referenciación (Coordenadas en Magna Sirgas), los cuales permitieron la localización de las parcelas a establecer y el resto de áreas a estudiar.

De la misma forma, se seleccionaron todas las actividades del centro que emiten GEI, tal como las productivas de los cultivos generadas en el uso fertilizante nitrogenados, combustión fósil y venta de productos unitarios, las académicas y las administrativas (consumo de energía, gas propano y transporte)

3.3 ESTIMACIÓN HUELLA DE CARBONO

La HC se estimó como la diferencia entre la tasa de fijación de carbono en biomasa arriba y abajo del suelo de árboles de sombra, arbustos y las emisiones de GEI (CO₂, N₂O y CH₄) producto de las actividades de los sistemas de producción. Esto se realizó para los principales sistemas de producción, extrapolarlo los datos a nivel de ha, para todo el CURDN.

3.3.1 Sistemas de producción evaluados. Se consideraron los diferentes tipos de sistemas de producción y a su vez su uso del suelo: forestal: Bosque galería (BOGAL), árboles fuera de bosque (ARBFB), plantaciones lineales (PL), plantaciones forestales (PLANT), bosques secundarios (BOSEC), áreas no cultivadas, agrícolas: SAF, plantación frutal, plantaciones lineales y pecuario (plantaciones lineales).

3.3.2 Almacenamiento y fijación de carbono en biomasa total. Se estimó la fijación de carbono en biomasa total (arriba y abajo del suelo) en los principales usos del suelo en el CURDN, tal como bosques secundarios, plantaciones forestales: de teca (*Tectona grandis*), nogal (*Cordia alliodora*), melina (*Gmelina arborea Roxb.*), caucho (*Hevea brasiliensis*), guadua (*Angustifolia kunt*), mango (*Mangifera indica*) e iguá (*Pseudosamanea guachapele*), los sistemas agroforestales de cacao con árboles maderables, los cultivos agrícolas con especies leñosas perennes y los árboles fuera de bosque. A cada uno se le estimó el almacenamiento de carbono y se indagó por su edad, para de esta forma estimar la tasa de fijación de carbono promedio como el cociente de estas dos variables. En cada caso, la extrapolación de los datos por sistema y para todo el CURDN se realizó estimando la media ponderada de acuerdo al área de cada uno de ellos.

Se establecieron en total 44 parcelas temporales de muestreo (PTM) distribuidas en los diferentes sistemas de producción, siendo cada una geo-referenciada. El número de parcelas establecidas por sistema dependió del área total y número de lotes de cada uno de ellos, de modo que la intensidad de muestreo fuese similar en todos los sistemas de uso del suelo. El tamaño de las PTM se definió siguiendo la metodología propuesta de MacDicken (1997), dependiendo de la densidad arbórea (Tabla 2), para los SAF se establecieron parcelas de dos tamaños, una grande para los árboles de 20 x 30 m y 20 x 40 m y para el cultivo fue de 100 y 225 m², respectivamente. Se midió el diámetro del tronco a la altura del pecho (dap) de todos los árboles con dap > 10 cm o el diámetro a 30 cm de altura (D₃₀) en el caso de cacao y la altura total (ht).

En el caso de una de las parcelas establecida en las plantaciones de *G. arborea* se midió el 50% de la altura de los árboles el restante se calculó utilizando la ecuación de Flewelling & Jong (1994), que relaciona la altura y el diámetro.

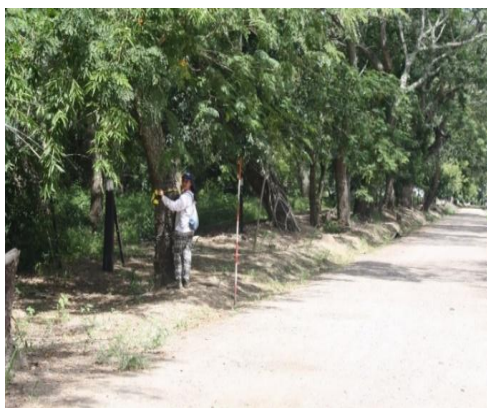
Tabla 2. Parcelas establecidas para el inventario de carbono en cada sistema de uso del suelo en el CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

Sistema uso del suelo	Forma Parcela	Tamaño (m ²)	Número de parcelas	Árboles medidos
Bosque secundario (BOSEC)	Rectangular	600	16	577
		500	1	
		300	1	
		250	1	
Bosque galería (BOGAL)	Rectangular	600	2	124
	Rectangular	500	1	
	Circular	2000	1	
Plantación lineal (PL)	Lineal (*)	223	1	121
		120	1	
		100	3	
		50	1	
Árboles fuera de bosque (ARBF)	Circular	3848	2	118
	Circular	2000	2	
Plantaciones forestales (PLANT)	Rectangular	3000	1	504
		1029	2	
		2500	1	
		600	1	
		300	1	
		144	2	
		400	1	
Sistemas agroforestales con cacao (SAF)	Rectangular	800	1	47
		600	1	

Nota: (*) Parcelas lineales unidades en m.

3.3.2.1 Medición. Los datos colectados de cada individuo medido en las parcelas fueron diligenciados en un formato de planilla de campo. Los individuos no identificados en campo se tomaron muestras botánicas y luego fueron identificadas en el Herbario TOLI de la Universidad del Tolima (Anexo A).

Figura 2. Medición de árboles presentes en las parcelas temporales de muestreo en sistemas de uso del suelo en el CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.



Fuente: Autores.

Una vez colectada la información de las variables dasométricas de los árboles en pie, se estimó la biomasa arriba del suelo empleando modelos alométricos reportados en la literatura (Tabla 3). Estos modelos se seleccionaron por especie, género, familia y en casos aislados por zona de vida. En caso de no reportarse modelos para alguna especie, se procedió a su cuantificación utilizando el factor de expansión de biomasa (FEB), el cual permite transformar valores de volumen de fuste en biomasa total arriba del suelo (Brown & Lugo, 1984; Segura & Kanninen, 2002). Posteriormente, se extrapolaron estos resultados a nivel de sistema y se estimó la biomasa abajo del suelo usando la ecuación de Cairns, Brown, Helmer & Baumgardner (1997) y recomendada por el IPCC (2003), la cual se puede aplicar a bosques tropicales (Ecuación 1). En el caso de las plantaciones lineales los datos fueron expresados en t/km.

$$Br = e^{(-1,0587+0,8836*Ln(Ba))} \quad \text{Ec. 1.}$$

Dónde:

Br: Biomasa de raíces en t/ha

Ba: Biomasa aérea total en t/ha

Para los fragmentos de bosque, el modelo más recomendado es el de Álvarez, et al., (2011), para la zona de vida bosque seco tropical (Td) y seco subtropical (STd), empleando el dap, ht y la densidad de la madera de cada especie. Estas variables fueron tomadas de lo reportado por Arévalo & Londoño (2006), para especies comercializadas

en el Tolima y la base de datos de *Global Wood Density* por Zanne et al., (2009). En el caso de no reportarse la densidad de madera para una especie en particular, se empleó un promedio de las densidades existentes (Anexo B; Tabla 3).

Tabla 3 Modelos alométricos utilizados para la estimación de biomasa arriba del suelo de árboles individuales en el CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

Sistema uso	Especies	Rango	Modelo	R ² Ajustado	Fuente
de suelo		dap (cm)			
BOSEC	Especies varios	5,1- 8,0	$B= 10^{(-1,27+2,20*\text{Log}(D))}$	0,88	Andrade, Segura, Somarriba & Villalobos (2008)
	Especies varios	10,2- 43,9	$\text{Ln}(B)=-2,217+2,081*\text{Ln}(D)+0,587*\text{Ln}(H)+1,092*\text{Ln}(q)$	0,95 (*)	Álvarez et al., (2011)
BOGAL	Especies varias	5,1- 9,3	$B=10^{(-1,27+2,20*\text{Log}(D))}$	0,88	Andrade, Segura, Somarriba & Villalobos (2008)
	Especies varias	9,5- 44,2	$\text{Ln}(B)=-2,217+2,081*\text{Ln}(D)+0,587*\text{Ln}(H)+1,092*\text{Ln}(q)$	0,95	Álvarez et al., (2011)
PL	Especies varias	9,5- 42,3	$\text{Ln}(B)=-2,217+2,081*\text{Ln}(D)+0,587*\text{Ln}(H)+1,092*\text{Ln}(q)$	0,95	Álvarez et al., (2011)
ARBDISP	Especies varias	10,2- 42,9	$\text{Ln}(B)=-2,217+2,081*\text{Ln}(D)+0,587*\text{Ln}(H)+1,092*\text{Ln}(q)$	0,95	Álvarez et al., (2011)
SAF			$B= 10^{(-1,625+2,63*\text{Log}(D_{30}))}$	0,98	Andrade, Segura, Somarriba & Villalobos (2008)
	<i>Theobroma cacao</i>	10,7- 32,0			
	Especies varias	10,6- 44,0	$\text{Ln}(B)=-2,217+2,081*\text{Ln}(D)+0,587*\text{Ln}(H)+1,092*\text{Ln}(q)$	0,95	Álvarez et al., (2011)

Sistema uso	Especies	Rango	Modelo	R ² Ajustado	Fuente
PLANT	<i>Gmelina arborea</i>	8,9-35,4	LogB= -1,988+2,993Log(D)	0,97	Rodríguez (2013)
	<i>Tectona grandis</i>	10,5-23,4	LogB= -0,82+2,38*Log(D)	0,98	Pérez & Kanninen (2003)
	<i>Hevea Brasiliensis</i>	9,8-21,3	LogB= 56,74-13,14(D)+0,96(D) ²	0,97	Hernández (2014)
	<i>Cordia alliodora</i>	10,6-33,1	LogB=-0,755+2,072*Log(D)	0,95	Segura, Kanninen & Suárez (2006)
	<i>Mangifera indica</i>	30,2-37,2	Ln(B)=-2,217+2,081*Ln(D)+0,587*Ln(H)+1,092*Ln(q)	0,95	Álvarez et al., (2011)
	Especies varias	60,3-135,9	FEB		
	<i>Guadua angustifolia</i>	10-115,9	B= 2,23*D ^{1,059}	0,95	Rojas, Li, Lora & Andersen (2013)
	<i>Pseudosamenea guachapele</i>	12,1-37,4	Ln(B)=-2,217+2,081*Ln(D)+0,587*Ln(H)+1,092*Ln(q)	0,95	Álvarez et al., (2011)

Nota. R²: coeficiente de determinación ajustado; B: biomasa aérea total (kg/árbol); D: diámetro a la altura del pecho (cm); Ht: altura total (m); (*) R²: coeficiente de determinación; D₃₀: Diámetro del tronco a 30 cm de altura; q: Densidad por árbol individual. BOSEC: bosques secundarios; BOGAL: bosques de galería; PL: plantaciones lineales; ARBDISP: árboles dispersos; SAF: sistemas agroforestales; PLANT: plantaciones.

El carbono se estimó al multiplicar la biomasa total por la fracción de carbono de 0,5, el cual ha sido recomendado por el IPCC (1996). La tasa de fijación de carbono se calculó dividiendo el almacenamiento de carbono en biomasa total entre la edad del componente leñoso. A su vez, el carbono se transformó en CO₂e al multiplicarse por el factor estequiométrico

3,67 (IPCC, 2003). En el caso de áreas no cultivadas, referentes a regeneración natural, se empleó una tasa del 30% de lo estimado en bosques secundarios encontrados en este estudio, debido a que éstas se encuentran en áreas con una menor calidad de sitio.

3.3.3 Estimación de las emisiones de GEI. Se realizaron encuestas semi-estructuradas a los administrativos, personal de apoyo, funcionarios, estudiantes y profesores que participan en el manejo de cada sistema para estimar las actividades que causan emisiones de GEI. Esta encuesta reconstruyó todas las actividades de manejo de los sistemas de producción del centro durante el año inmediatamente anterior. En ellas se indagó sobre el uso, manera y aplicación de fertilizantes nitrogenados (orgánicos e inorgánicos), insumos, cal, combustibles fósiles utilizados en el manejo del cultivo, transporte (tipo y cantidad combustible) de operarios y el transporte del producto producido hasta su destino de venta, electricidad y otros agroquímicos.

En estas estimaciones se incluyó todas las emisiones por concepto de transporte de estudiantes, funcionarios e ingreso de alimentos, consumo de electricidad y demás actividades propias de la vida académica del CURDN. Las emisiones de estas actividades fueron asignadas a la institución en general y no a los sistemas de uso de suelo.

Se emplearon los factores de emisión para estimar las emisiones con base en las actividades realizadas y/o fuentes de emisión:

- Fertilización nitrogenada: 0,01 kg N₂O/kg N (IPCC, 2006).
- Uso de electricidad: 130 g CO_{2e}/kWh (Camargo, Arboleda & Cardona, 2013).
- Uso de combustibles fósiles: 2,83 y 2,33 kg CO_{2e}/l de diésel y gasolina, respectivamente (IPCC, 2006).

Se estimó las emisiones de metano por fermentación entérica (FE) y por la gestión de estiércol (GE), y las emisiones directas de óxido nitroso por la GE producidas por todo el

hato bovino clasificado según las categorías etarias presentadas en el Registro Único de Vacunación (RUV) del Fondo ganadero del Tolima. Para la estimación de estas emisiones se utilizó el nivel I (Tier I) recomendado por el (IPCC, 2006), en donde se incluyeron vacas, toros y animales jóvenes para carne, considerando las características de cada animal para todo el hato bovino del CURDN. La raza dominante del CURDN es Romosinuano y se caracteriza por ser criolla de talla media tolerante a altas temperaturas y humedad relativas diferentes.

Debido a que se estimó la emisión de otros GEI diferentes al CO₂, tal como el CH₄ y N₂O, se empleó la capacidad de calentamiento del CH₄ para convertirlo a CO_{2e}: 21 g CO_{2e}/g CH₄ y 310 g CO_{2e}/g N₂O (IPCC, 2006).

Las ecuaciones utilizadas para la estimación de emisiones de GEI, según la metodología del IPCC (2006), son:

- Emisión CO₂ del transporte terrestre (Tipo combustible)

$$Emisión = \sum [Combustible_a * EF_a] \text{ Ec. 2}$$

Dónde:

Emisión= Emisión de CO₂ (kg)

Combustible_a= Combustible vendido (TJ)

EF_a= Factor de emisión (kg/TJ). Es igual al contenido de C del combustible multiplicado por 44/12

a= Tipo de combustible (p.ej., gasolina, diésel, gas natural o GLP).

- **Ecuaciones para la estimación de emisiones del hato bovino**

Fermentación entérica de una categoría de ganado.

$$Emisiones = EF_{(T)} * \left(\frac{N_{(T)}}{10^6} \right) \text{ Ec. 3}$$

Dónde:

Emisiones= Emisiones de metano por fermentación entérica (Gg CH₄/año)

EF_(T)= Factor de emisión para la población de ganado definida (kg CH₄/cabeza/año)

N_(T)= La cantidad de cabezas de la especie/categoría de ganado

T= Especie/categoría ganado.

Emisiones totales por fermentación entérica del ganado.

$$Total\ CH_4\ Entérica = \sum E_i\ Ec. 4$$

Dónde:

TotalCH₄= Emisiones totales de CH₄ por fermentación entérica. Gg. CH₄/año

E_i= Emisiones de las j°. Categorías y subcategorías de ganado.

Emisiones de CH₄ de la gestión de estiércol

$$CH_4\ estiércol = \sum_{(T)} \frac{(EF_{(T)} * N_{(T)})}{10^6} Ec. 5$$

Dónde:

CH₄Estiércol = Emisiones de CH₄ por la gestión del estiércol, para una población definida (Gg CH₄/año)

ET (T) = Factor de emisión para la población de ganado definida (kg CH₄/cabeza/año).

Emisiones directas de N₂O de la gestión del estiércol

$$N_2O_{D(mm)} = \left[\sum_S \left[\sum_T (N_{(T)} * Nex_{(T)} * MS_{(T,S)}) \right] * EF_{3(S)} \right] * \frac{44}{28}$$

Dónde:

N₂O_{D (mm)} = emisiones directas de N₂O de la gestión de estiércol (kg N₂O/año).

N_(T) = cantidad de cabezas de ganado de la especie/categoría T

N_{ex (T)} = promedio anual de excreción de N por cabeza de la especie/categoría T (kg/animal/año).

$MS_{(T, S)}$ = fracción de la excreción total anual de N de cada especie/categoría de ganado T que se gestiona en el sistema de gestión del estiércol S en el país, sin dimensión.

$EF_{3(S)}$ = factor de emisión para emisiones directas de N_2O de sistema de gestión del estiércol S en el país, $kg\ N_2O-N/kg\ N$ en el sistema de gestión del estiércol S .

S = sistema de gestión del estiércol

T = especie/categoría de ganado.

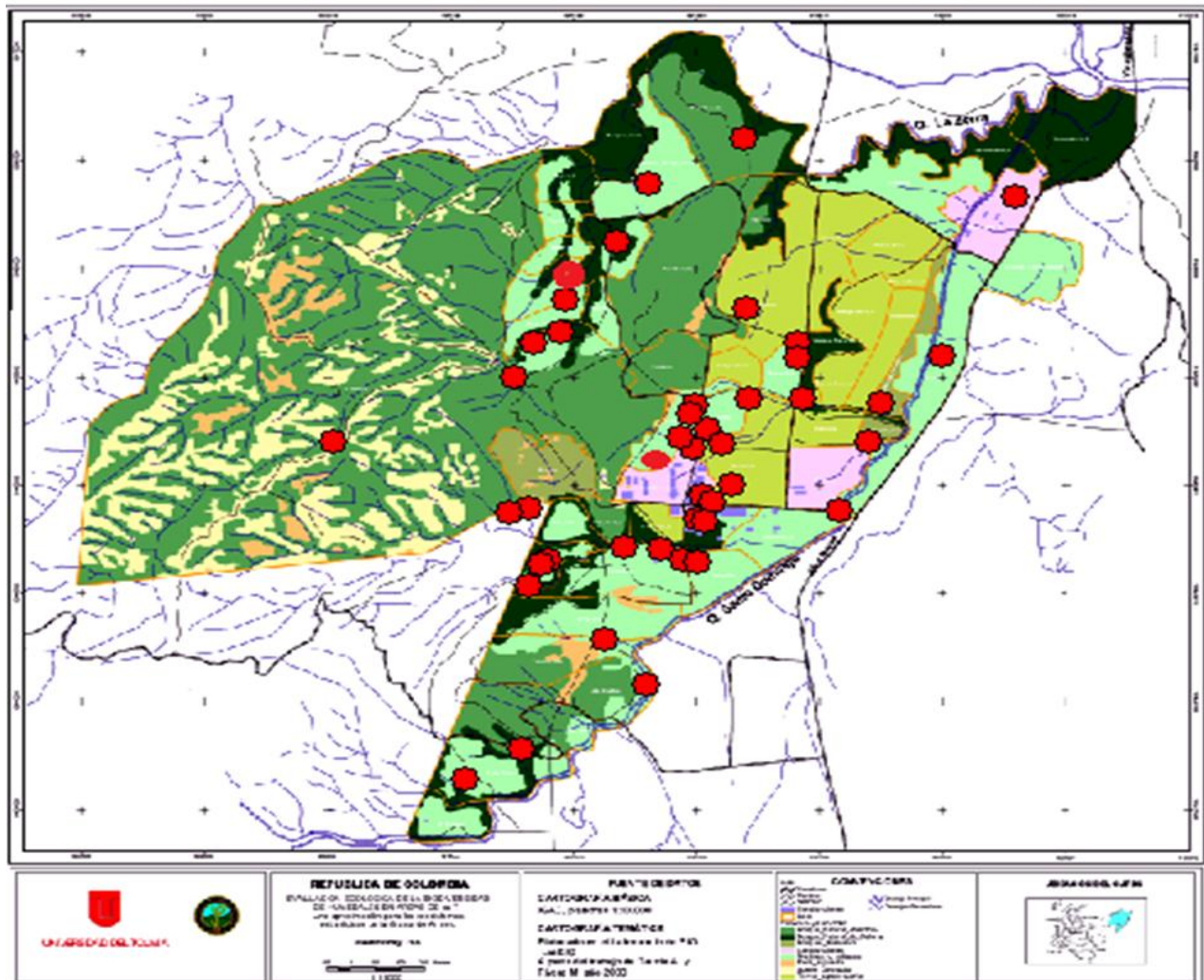
$44/28$ = conversión de emisiones de $(N_2O-N)_{(mm)}$ a emisiones de $N_2O_{(mm)}$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO

El CURDN cuenta con 700 ha, de las cuales se identificaron los principales usos del suelo en cada sistema de producción, áreas no cultivadas y la parte administrativa (Figura 3).

Figura 3. Localización de las PTM establecidas en los diferentes usos del suelo definidos en el CURDN, Universidad del Tolima, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.



Fuente: Modificado de Laboratorio de SIG (LabSIG). Universidad del Tolima

4.1.1 Sistema de producción forestal. Comprendido aproximadamente por 62 ha distribuidas en dos clases de sistemas: 1) bosques fragmentados con 45 ha en estado de regeneración con presencia de árboles remanentes y 2) plantaciones forestales de especies comerciales con 17 ha aproximadamente.

4.1.2 Sistema de producción agrícola: Abarca aproximadamente 40 ha distribuidas en áreas de cultivos transitorios en los que se encontraron: cultivos de arroz con 20 ha, algodón con 5 ha, maíz con 5 ha, y otros cultivos de (girasol, maracuyá y plátano) con un área destinada de 4,9 ha y SAF con 0,25 ha.

4.1.3 Sistema de producción pecuario. Comprendido aproximadamente por 50 ha, definidas como áreas de potreros con pasturas mejoradas de: pastos angleton, kikuyo, destinadas para el crecimiento, producción y alimentación del animal.

4.1.4 Sector administrativo. Área aproximadamente de 10 ha destinadas para el desarrollo las labores diarias y/o actividades pertinentes de los programas académicos presentes en el CURDN.

4.1.5 Áreas no cultivadas. Comprende aproximadamente 400 ha, es el uso del suelo que ocupa la mayor extensión de área del CURDN.

4.2 ALMACENAMIENTO DE CARBONO

Se observó diferencias en el almacenamiento de carbono promedio del componente leñoso de los diferentes sistemas de producción. El sistema de producción forestal presentó el mayor almacenamiento de carbono con 77,7 t C/ha, seguido del sistema de producción agrícola con 1,0 t C/ha, excluyendo los cultivos transitorios; mientras que el sistema de producción pecuario con 0,02 t C/ha, el de menor almacenamiento de carbono por la poca presencia de árboles de sombrero.

El sistema de producción forestal arrojó valores de almacenamiento de carbono entre 71 y 124 t C/ha (Tabla 4) siendo superiores a los estimados por Phillips et al., (2011), para bosques secos tropicales de Colombia donde los valores de carbono no superan los 48,1 t C/ha. Dai et al., (2014), reportaron 3,2 t C/ha en Bs-T (península de Yucatán, México), Solomon, Birhane, Tadesse, Treydte & Meles (2017), reportaron valores similares para bosque natural e intervenidos entre 58,1 y 22,3 t C/ha, respectivamente. Chacón, Leblanc & Russo (2007), reportan para un bosque secundario de 15 años en la Región Tropical Húmeda en Costa Rica, 46,4 t C/ha. Ibrahim et al., (2007), en Costa Rica, reportaron valores de 92,4 t C/ha en un Bs-T de 10 años, encontrándose en el rango a lo reportado en este estudio. Las diferencias son marcadas y se deben principalmente a las curvas de crecimiento y acumulación de carbono de estos sistemas de sucesión natural.

El almacenamiento de carbono promedio para las plantaciones forestales fue de 26,3 t C/ha. La plantación de *H. brasiliensis* a una edad de (12 años) es la que presenta la mayor acumulación de carbono (64,4 t C/ha), seguida de *G. arborea*, *P. guachepele* y *T. grandis*. En el otro extremo, las plantaciones de *G. angustifolia* y *C. alliodora* presentaron el menor almacenamiento de carbono (Tabla 4). López et al., (2016) en Tabasco, México, reportaron datos inferiores en su etapa juvenil (nueve años) de 35,7 t C/ha y datos superiores (108,6 t C/ha) en su etapa adulta (15 años) demostrando el potencial de almacenamiento de carbono en el periodo de transición (joven-adulto) reflejado por el incremento significativo del diámetro y así mismo la acumulación de biomasa.

La plantación de *T. grandis*, en este estudio, almacenó 27,2 t C/ha a los cinco años de edad, datos comparables a lo reportado por Jiménez & Landeta (2009), para procedencias de ocho años de esta especie encontradas en el Campus Prosperina - ESPOC con 33,1 t C/ha. La plantación de *Cordia alliodora* almacenó 20,0 t C/ha a los (17 años), lo cual contrasta con Hummel (2000), quien reportó valores inferiores (3,9 t C/ha) en monocultivos de plantaciones jóvenes en la Estación Biológica La Selva en el norte de Costa Rica. Esto evidencia que para esta especie el mayor almacenamiento de carbono se da en su etapa de madurez. Por su parte, Marín et al., (2016) estimaron

almacenamiento de 19,0 t C/ha en SAF con cacao y *C. alliodora* en el departamento del Tolima (Tabla 4).

En el sistema de producción agrícola se encontraron áreas de cultivos rotativos que unidos a las plantaciones lineales, tienen una biomasa de 2,1 t C/ha. La plantación de *M. indica* de 25 años almacenó 18,6 t C/ha, valores inferiores a lo reportado por Chavan & Rasal (2012) en Maharashtra (India) con 104,4 t C/ha. Concha, Alegre & Pocomucha, (2007), reportaron 40 t C/ha en la región de San Martín (Perú) para SAF – frutales que incluían esta especie.

Los SAF almacenaron 69,4 y 102,5 t C/ha a los (10 y 15 años) respectivamente (Tabla 4), con diferencias entre la edad y los árboles de sombra que los componen. Estos resultados son superiores en comparación a lo encontrado por Andrade, Figueroa y Silva (2013), quienes hallaron 28,8 y 33,6 t C/ha para la misma zona de estudio con edades de 18 y 35 años. Estos mismos autores afirman que la mayor acumulación de carbono se da hasta los primeros años de edad. Estos resultados también son similares a lo reportado por Concha et al., (2007) de 40 t C/ha para sistemas de (20 años) de cacao asociado a frutales: *Inga edulis*, *Calycophyllum spruceanum* y *Mangifera indica* para el sector de Villaprado (Juanjui) San Martín, Perú.

El sistema de producción pecuaria, conformado principalmente por pasturas mejoradas con árboles en línea sirviendo como divisor de lotes y sombrío, en el cual se obtuvo valores de almacenamiento de 1,1 t C/ha (Tabla 4).

Tabla 4 Almacenamiento de carbono en biomasa total para los diferentes usos del suelo del CURDN, Tolima, Colombia.

Sistemas	Uso del suelo	Abundancia (árboles/ha)	Rango dap (cm)	Biomasa		
				Arriba del suelo t/ha	Abajo del suelo t/ha	Carbono en biomasa t C/ha
Agrícola	Cacao + árboles	19	11,2-30,5	115,2	23,5	69,4
	Cacao + árboles	28	10,7-24,5	171,3	33,8	102,5
	Plantación <i>Mangifera indica</i>	33	11,7-135,9	30,4	7,0	18,7
	Plantaciones lineales	17	18,1-63,6	3,18	0,96	2,1
Forestal	Plantaciones Lineales (*)	63	9,5-173,4	136,1	25,1	80,6
	Bosque secundario	596	5,1-121,2	163,1	29,8	96,5
	Bosque Galería	124	5,1-121,2	119,6	22,5	71,0
	Árboles dispersos	118	3,1-171,9	209,8	38,2	124,0
	Plantación <i>G. angustifolia kunt.</i>	36	10-115,9	40,8	9,1	25,0
	Plantación <i>Gmelina arborea Roxb.</i>	332	8,9-35,4	69,0	14,4	41,3
	Plantación <i>Tectona grandis</i>	42	5,4-23,2	44,6	9,8	27,2
	Plantación <i>Pseudosamanea guachapele</i>	16	12,1-37,4	46,8	10,2	28,5
	Plantación <i>Cordia alliodora</i>	20	10,6-33,1	32,5	7,4	20,0
	Plantación <i>Hevea brasiliensis</i>	23	9,8-21,2	107,6	21,3	64,4
PECUARIO	Plantaciones lineales	22	11,1-53,1	1,7	0,6	1,14

Nota: (*) t C/km, Biomasa aérea (BA), Biomasa abajo del suelo (BAS), Carbono (C).

4.3 FIJACIÓN DE CARBONO

La tasa de fijación de carbono promedio para los sistemas evaluados en el CURDN fue de 0,9 t C/ha/año. El sistema de producción forestal es el de mayor tasa de fijación promedio con 3,0 t C/ha/año y 0,8 t C/ha/año atribuido a las áreas no cultivadas, seguido del sistema de producción agrícola con 0,04 t C/ha/año, y finalmente el sistema de producción pecuario

(< 0,1 t C/ha/año), causado por la degradación de los suelos y por la poca implementación de sistemas fijadores de carbono que interactúen con las pasturas y animales (Figura 4).

El sistema de producción forestal fija carbono en sus dos tipos de subsistemas: bosques y plantaciones. Las últimas alcanzaron la mayor fijación con 1,3 t C/ha/año, principalmente las plantaciones jóvenes tienen la capacidad de captación y absorción de CO₂ en pleno crecimiento para así reducir su concentración en la atmósfera. La plantación de *G. angustifolia*, tiene una tasa de fijación de 1,0 t C/ha/año a los 25 años (Figura 4), siendo muy inferior a los valores de fijación reportados por Camargo, Rodríguez & Arango (2010) de 20,9 t C/ha a los siete años, esto influenciado por el espaciamiento de la plantación; la capacidad de fijación para esta especie depende de la edad de la plantación, crecimiento y madurez de sus culmos (Camargo et al., 2010), en este estudio la fijación se vio influenciada por el espaciamiento inadecuado. La plantación de *T. grandis* fija 5,4 t C/ha/año a una edad de cinco años (Figura 4), con leves diferencias a lo reportado por Cubero & Rojas (1999), quienes encontraron valores entre 1,6 y 3,6 t C/ha/año a una edad de cinco años en Hojanca, zona del Pacífico seco de Costa Rica. La plantación de *G. arborea* fija 8,3 t C/ha/año a una edad de cinco años (Figura 4), este resultado es superior a lo indicado por Cubero & Rojas (1999), quienes hallaron valores entre 1,0 y 3,3 t C/ha/año a los cuatro años en Hojanca, zona del Pacífico seco de Costa Rica. Estas diferencias pueden ser causadas por las diferencias de calidad de sitio, edad y manejos silvícolas.

Los bosques fragmentados de 30 años de edad, en estado de regeneración y con presencia de árboles remanentes, fijan en promedio (<1 t C/ha/año) (Figura 4). Estos hallazgos resultan similares a lo reportado por Pereira et al., (2016) de 0,9 t C/ha/año para un bosque seco tropical de 30 años en Brasil. Vargas, Allen & Allen (2008), reportan valores superiores de 2,5 t C/ha/año, en bosques tropicales estacionales en Quintana Roo, en México; mientras que Chacón et al., (2007) reportaron una tasa de fijación de 3,1 t C/ha/año en la región tropical húmeda de Costa Rica. Para las áreas no cultivadas

se asignó un valor de fijación de los bosques de 0,8 t C/ha/año, este valor incrementa la fijación total del CURDN, debido principalmente a su gran extensión.

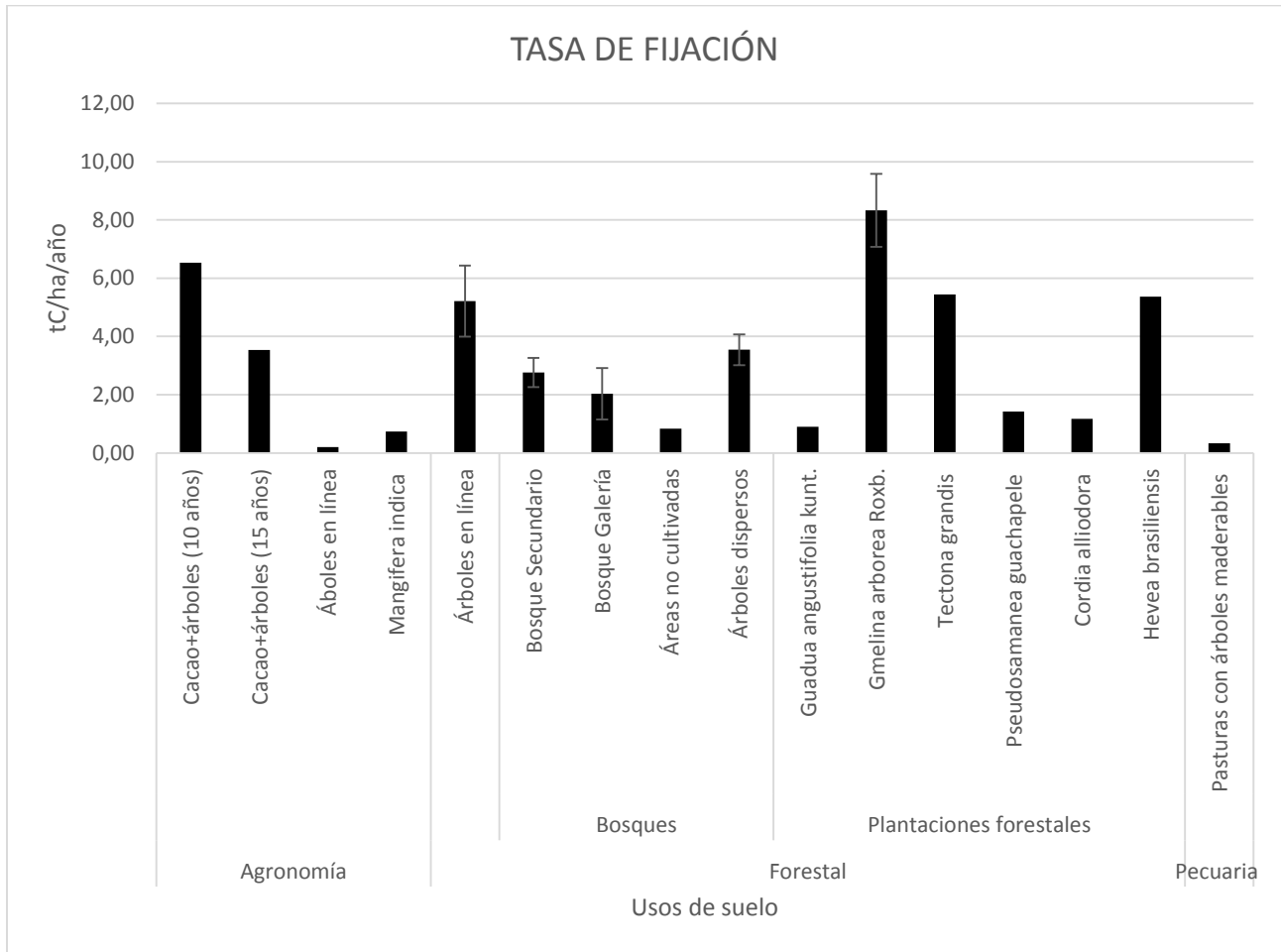
El promedio de la tasa de fijación de carbono para todo el sistema de producción agrícola fue de 0,04 t C/ha/año; siendo los SAF los encargados de la mayor fijación con un promedio de 5,0 t C/ha/año, demostrando el potencial de almacenamiento que tienen éstos en su etapa juvenil, y el asociamiento de especies leñosas con cultivos como opción rentable y ecológica para mitigar el cambio climático (Segura & Andrade, 2008).

La tasa de fijación para los SAF fue de 6,5 y 3,5 t C/ha/año a los 10 y 15 años, respectivamente (Figura 4). Estos hallazgos son similares a lo reportado por Aristizábal & Guerra (2002) en Caldas, Colombia y Andrade et al., (2014c) de 4,3 y 4,4 t C/ha/año, respectivamente. Marín, Andrade & Sandoval (2016), reportan 9,4 t CO₂e/ha/año para SAF – maderables en el Tolima, valores superiores se encontraron en el CURDN de (24 y 12,8 t CO₂e/ha/año).

Por otro lado, Ceballos & Ocaña (2014), reportan una fijación máxima de 18,6 t CO₂e/ha/año para árboles de sombra (maderables y frutales) en las fincas cafeteras de la Unión, Nariño (Colombia), valor superior a lo reportado en este estudio para la plantación frutal (*M. indica*) en el departamento del Tolima (2,7 t CO₂e/ha/año). Esto confirma que los árboles pueden modificar las tasas de fijación dependiendo de la etapa de crecimiento, afirmando que los SAF pueden ser manejados para estabilizar la emisión de gases a través del secuestro de CO₂ en las plantas (Ortiz & Riascos, 2006).

El sistema de producción pecuaria alcanzó una tasa de fijación de carbono muy baja (<0,1 t C/ha/año) (Figura 4) teniendo en cuenta que dentro de este sistema hay presencia de muy pocos árboles en línea como divisores de los lotes. En contraste, Arcos (2016) encontró que los sistemas silvopastoriles con árboles cuyo dap es mayor a 25 cm, fijan 2,5 t C/ha/año.

Figura 4. Tasa de fijación de carbono en biomasa de los diferentes sistemas de producción del CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.



Fuente: Autores

4.4 EMISIONES DE GEI DEL CURDN

Se detallan las emisiones de GEI de los diferentes sistemas de producción (forestal, agrícola y pecuaria) y las actividades realizadas por la parte administrativa y académica.

4.4.1 Emisiones de los sistemas de producción. El promedio de las emisiones de los diferentes sistemas de producción fue de 0,3 t CO₂e/ha/año, siendo el sector pecuario el mayor emisor con 2,8 t CO₂e/ha/año (Figura 5), atribuido principalmente a la emisión de

CH₄ resultante de la fermentación entérica y emisiones de CH₄ y N₂O de la gestión de estiércol del ganado.

En la granja CURDN, los valores resultantes por emisión de fermentación entérica (CH₄) fue de 108,5 t CO₂e/año (Figura 6), para 150 cabezas de ganado de raza Romosinuano. Estos valores son menores a los reportados por Guerra (2007) (739,6 t CO₂e/año) para 295 cabezas de ganado de la finca comercial CATIE, en Costa Rica. En la hacienda El Chaco (Doima, Tolima), con 119 cabezas de ganado, las emisiones fermentación entérica de CH₄ de 249,5 t CO₂e/año (Arcos, 2016).

Mora (2001), reportó emisión entre 0,7 y 0,8 t CH₄/año en fincas de las zonas altas de Costa Rica, valores superiores a la emisión de la granja (0,1 t CH₄/año), Nieto, Guzmán & Steinaker (2014), encontraron emisiones entre 15 y 112 kg CH₄/año/animal en la región central de Argentina en la provincia de San Luis, la granja CURDN tiene emisiones de 34,4 kg CH₄/año/animal para todo el hato bovino. Este mismo autor reporta valores de rango anual entre 0,5 y 2,4 kg/año/animal para la emisión de CH₄ por gestión de estiércol, siendo similares con este estudio (0,7 kg/año/animal).

La emisión por gestión de estiércol en la granja fue de 1,8 kg N₂O/ha/año, valores superiores comparado con Arcos (2016), con 0,0018 kg N₂O/ha/año, Mora (2001), reportó valores entre 5,4 y 2,8 kg N₂O/ha/año.

La carga animal de la granja CURDN fue de 2,1 UA/ha (Tabla 5) actualmente la finca cuenta con 150 cabezas de ganado distribuidas en 50 ha, número que ha venido incrementándose en comparación al año 2014, sobreexplotando el uso de la tierra, lo que podría causar la degradación de los suelos. Cabe resaltar que para el periodo 2010-2014 la capacidad de carga del CURDN estaba en un rango de 1,2 – 1,5. Gómez & Rueda (2011), reportan que para Colombia la capacidad de carga es de 0,6 UA/ha en promedio, siendo un indicador menor a lo encontrado en este estudio.

Tabla 5 Categorías etarias para el hato bovino del CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

Categorías FEDEGAN	Unidades	Peso promedio (kg)	UA	FE (t CH ₄ /año)	GE (t CH ₄ /año)
Ternera <1 año	12	75	2,0	0,1	0,002
Hembra 1-2 años	15	220	7,3	0,4	0,01
Hembras 2-3 años	25	250	13,9	0,7	0,01
Hembras >3 años	67	470	70,0	3,4	0,07
Terneros < 1 año	14	75	2,3	0,1	0,002
Machos 1-2 años	11	240	5,9	0,3	0,01
Machos 2-3 años	5	260	2,9	0,1	0,003
Machos >3 años	1	525	1,2	0,1	0,001
Total			105,5	5,2	0,1

Nota: UA: 450 kg de peso vivo; FE: fermentación entérica; GE: gestión del estiércol.

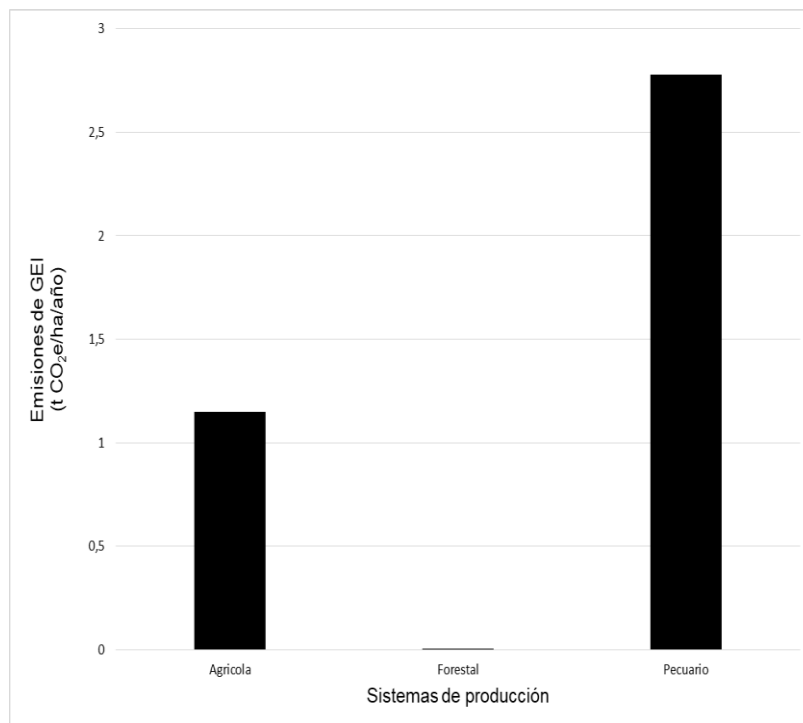
El sistema de producción agrícola es el segundo emisor con un promedio de 1,2 t CO₂e/ha/año, atribuidas a la aplicación de fertilizantes nitrogenados y el uso de combustibles fósiles en el manejo de los cultivos. La mayor emisión se atribuye al cultivo de arroz con 1,8 t CO₂e/ha/año (Figura 5), donde los fertilizantes nitrogenados son responsables del 74% de la emisión y el 26% generado por los combustibles fósiles. El cultivo de maíz, con 0,9 t CO₂e/ha/año, fue el segundo emisor, donde el 55% de la emisión es producida por los fertilizantes nitrogenados y un 45% por combustibles fósiles. El cultivo de algodón emitió 1,02 t CO₂e/ha/año, 69% a causa de la fertilización nitrogenada y 31% por combustibles fósiles.

Andrade et al., (2014b) reportaron valores menores a los de este estudio en sistemas de producción de arroz en Campoalegre (Huila) (2,0 t CO₂e/ha/año) ocasionado principalmente por los fertilizantes nitrogenados con 65% del total emitido, en contraste al uso de combustibles fósiles (maquinaria, transporte y aplicaciones) los cuales emite 1 y 18%, respectivamente. Vetter et al., (2017), reportaron que la producción de arroz en la India emite 0,005 t CO₂e/kg de arroz producido, lo equivale a un 10,5 % de las emisiones en la producción de alimentos agrícolas en el país. En una granja de

Queensland, el algodón emite 1,3 t CO₂e/ha, atribuido principalmente a la utilización de insecticidas, pesticidas y reguladores (Maraseni, Cockfield & Maroulis, 2010). En el municipio de Falan, Tolima, se estimó que el maíz emite 0,70 t CO₂e/ha/año, de los cuales el 64% corresponden a la utilización de fertilizantes, los combustibles aportan el 22% de este valor (Umaña & Conde, 2013).

El sistema de producción forestal es el de menor emisión (< 0,1 t CO₂e/ha/año), atribuidas directamente a las emisiones de N₂O por la aplicación de fertilizantes nitrogenados y consumo de combustibles fósiles en el establecimiento de las plantaciones de *T. grandis* y *G. arborea*. De este monto, en ambas plantaciones un 63% se le atribuye a la emisión producida por combustibles fósiles y un 37% a la aplicación de fertilizantes nitrogenados. El resto de plantaciones no se le estimó la emisión, puesto que en la actualidad no tienen ningún manejo y no existe información al respecto.

Figura 5. Emisión de GEI producidas por los sistemas de producción del CURDN, Armero-Guayabal, Tolima. Colombia.



Fuente: Autores

4.4.2 Emisiones del sector administrativo. El consumo de electricidad en la granja CURDN, para abastecer el servicio de restaurante, oficinas y aulas de clases, es monitoreado por un solo medidor. El uso de la energía eléctrica promedio generó una emisión de 10,1 t CO₂e/año (Tabla 6) en el periodo comprendido entre septiembre 2015 - julio del 2016 por un consumo promedio de 140,4 kWh/ha/año que equivale a 18,2 kg CO₂e/ha/año. Guerra (2007), reporta valores superiores de consumo de energía de 1088 kWh/ha/año en la finca de CATIE Costa Rica, los cuales equivalen a 141,5 kg CO₂e/ha/año.

El consumo de combustibles y, por ende, fuente de emisión directa se debe al desplazamiento de la rutina diaria de trabajadores, estudiantes, funcionarios y personas externas de la granja CURDN. Este consumo depende principalmente de: transporte de paso (autobuses de prácticas académicas), transporte constante (motos, vehículos, bicicletas), autobús de transporte de los estudiantes internos, vehículos de carga y tractores y transporte de alimentos (furgones y motos) (Tabla 6). La información obtenida para la estimación de las emisiones por combustible fósil fue cuantificada para el primer semestre del 2016 y extrapoladas para el siguiente semestre del mismo año.

Tabla 6. Fuentes de emisión del área administrativa del CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

ADMNISTRACIÓN CURDN	TIPO TRANSPORTE	Cantidad Vehículos	Emisión t CO ₂ e/año
	Motos Funcionarios	4	1,5
	Carros Funcionarios	6	8,8
	Motos Estudiantes (Medicina Veterinaria y Zootecnia)	6	2,2
	Autobús (Medicina Veterinaria y Zootecnia)	1	7,4
	Carro Estudiantes (Medicina Veterinaria y Zootecnia)	2	2,9
	Bicicletas Estudiantes (Medicina Veterinaria y Zootecnia)	9	0,0

ADMINISTRACIÓN CURDN	TIPO TRANSPORTE	Cantidad Vehículos	Emisión t CO ₂ e/año
Transporte constante	Autobús (Ingeniería Agronómica 7º)	1	5,2
	Autobús (Ingeniería Agronómica 8º)	1	5,2
	Carros (Ingeniería Agronómica)	1	1,8
	Motos (Ingeniería Agronómica)	4	2,9
	Motos Empleados	14	5,2
	Bicicletas trabajadores	10	0,0
Transporte de Paso	Autobús (Prácticas académicas)	4	20,6
	Furgones	1	2,6
Transporte alimentos	Furgones	1	3,7
	Furgones	1	5,5
	Moto	1	0,4
Consumo de energía	kWh/mes	6456,36	10,1
Consumo de gas	Pipetas	4	60,4

La emisión total de GEI de la parte administrativa del CURDN es de 146,3 t CO₂e/año, siendo un factor negativo para la huella total de la granja. La mayor emisión es causada por el consumo de combustibles fósiles (75,8 t CO₂e/año), generado en la rutina diaria de todas las actividades desarrolladas por este sector dentro de la granja CURDN.

Se detectó que los funcionarios son responsables de la mayor emisión con 15,5 t CO₂e/año, generado principalmente por el medio de transporte que utilizan a diario desde su domicilio hasta el lugar de trabajo, seguido del transporte de alimentos con 12,1 t CO₂e/año, relacionado con el uso y funcionamiento del restaurante estudiantil. La emisión de los autobuses de paso que transportan estudiantes de prácticas académicas en donde se incluyen los estudiantes de Ingeniería Forestal y estudiantes internos para

los programas de Ingeniería Agronómica y Medicina Veterinaria y Zootecnia, es de 20,6 y 27,6 t CO₂e/año, respectivamente, siendo el uso de vehículos y motos por parte de los estudiantes internos la menor emisión (9,9 t CO₂e/año). Esto como consecuencia al incremento en la cantidad de estudiantes por semestre y número de viajes en el día realizados por los mismos.

Igual que en este estudio, en la Universidad Rafael Landívar de Guatemala, se analizaron las emisiones de GEI del personal administrativo y estudiantes del campus, mostrando que el mayor aporte corresponde al consumo de combustibles fósiles para su desplazamiento (11,4 t CO₂e en el año 2012) (Rodas, 2014).

El consumo de gas licuado de petróleo (GLP), en la preparación de alimentos en el restaurante es la segunda actividad que presenta mayores emisiones (60,4 t CO₂e/año), siendo un valor superior comparado a lo reportado por estudiantes del MAYDES para el campus coloso de la Universidad de Antofagasta (20,4 tCO₂e/año) (Centro Regional de Estudios y Educación Ambiental [CREA] – Universidad Antofagasta [UA], s.f).

4.5 HUELLA DE CARBONO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

La HC para los sistemas de producción fue de 3,1 t CO₂e/ha/año, influenciada directamente por los sistemas fijadores que lo constituyen. Se evidenció que el sistema de producción pecuaria tiene una huella de carbono negativa (-2,8 t CO₂e/ha/año) (Tabla 7), atribuidas directamente a las emisiones producto del proceso digestivo de los rumiantes, este sistema es el de menor fijación de carbono y, por tanto, es el menos sostenible con el medio ambiente por ser un emisor directo de GEI. En contraste, Arcos (2016) evidenció que los sistemas silvopastoriles pueden ser amigables con el medio ambiente, el buen manejo y el asocio de plantas leñosas perennes logran mitigar las emisiones causadas por la digestibilidad del ganado, arrojando una huella de carbono positiva entre 0,2 y 1,3 t CO₂e/ha/año.

El sistema de producción agrícola tiene una huella de carbono de -1,1 t CO₂e/ha/año, (Tabla 7) con aportes de emisión de GEI de 1,9; 0,9 y 1,0 t CO₂e/ha/año por parte los cultivos de arroz, maíz y algodón, respectivamente. Andrade et al., 2015, realizó estudios similares en cadenas de sistemas de producción de caña de azúcar en los cuales reportaron altas emisiones de GEI (1,3 t CO₂e/ha/año); Andrade et al., 2014b en cultivos de arroz (2,0 t CO₂e/ha/año). Diferentes estudios han demostrado que los sistemas agrícolas asociados con plantas leñosas perennes pueden aportar significativamente en el almacenamiento de carbono, logrando que los sistemas tengan una huella de carbono positiva. En contraste, se ha observado HC positiva en sistemas que involucran árboles u otras especies leñosas perennes. En el caso de los sistemas de producción de cacao asociado con cítricos y aguacate los cuales tienen una huella positiva de 13,8 t CO₂e/ha/año (Marín 2016) y los de café en el municipio de Líbano, asociados con *C. alliodora* tienen una fijación neta de 17,2 t CO₂e/ha/año (Canal, 2017). Segura & Andrade (2012), en cadenas de producción de café en Costa Rica, (4,0 a 14,4 t CO₂e/ha/año).

El sistema de producción forestal es el que presenta una huella de carbono mayor, en los sistemas evaluados (14,0 t CO₂e/ha/año) (Tabla 7), dado principalmente por las reservas de carbono de los bosques, plantaciones forestales y áreas no cultivadas las cuales mitigan las emisiones generadas por el mantenimiento de los mismos sistemas. Esto demuestra la importancia de estos sistemas de uso del suelo para compensar emisiones en otras actividades productivas.

Tabla 7. Huella de carbono de los sistemas de producción, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

Uso del suelo	Ha	Tasa fijación t CO ₂ e/año	Emisión t CO ₂ e/año	HC t CO ₂ e/año
Cacao + árboles	3,0	0	0	3,0
Cacao + árboles	1,6	0	0	1,6
Cultivo Arroz	0	0	38	-38
Cultivo Maíz	0	0	4,5	-4,5

Uso del suelo	Ha	Tasa fijación t CO ₂ e/año	Emisión t CO ₂ e/año	HC t CO ₂ e/año
Cultivo Algodón		0	5,1	-5,1
<i>M. indica</i>		0,7	0	0,7
Plantación Lineal		0,2	0	0,2
Total sistema agrícola (t CO ₂ e/ha/año)	4 0	0,1	1,2	-1,1
Plantaciones lineales		11,1	0	11,1
Bosque secundario		458,2	0	458,2
Bosque Galería				
Árboles dispersos				
<i>G. angustifolia</i>		7,3	0	7,3
<i>G. arborea</i>		131,5	0,04	131,4
<i>T. grandis</i>		41,9	0,02	41,9
<i>P. guachapele</i>		20,8	0	20,8
<i>C. alliodora</i>		8,6	0	8,6
<i>H. brasiliensis</i>		2,5	0	2,5
Total sistema forestal (t CO ₂ e/ha/año)	6 2	11,0	0,001	11,0
Pasturas con árboles maderables		0,1	139	-139
Total sistema pecuario (t CO ₂ e/ha/año)	5 0	0,002	2,8	-2,78
Áreas no cultivadas (t CO ₂ e/ha/año)		3,0	0	3,0
Total sistemas de uso del suelo (t CO ₂ e/ha/año)		3,5	0,34	3,1

Uso del suelo	Ha	Tasa fijación t CO ₂ e/año	Emisión t CO ₂ e/año	HC t CO ₂ e/año
(t CO₂e/año)		1908,7	186,7	1722,1

4.6 HUELLA DE CARBONO UNITARIA

4.6.1 Huella de carbono *per cápita*. La huella de carbono unitaria es negativa para las categorías del sector administrativo (-0,76 t CO₂e/persona/año). La categoría transporte de paso representa el menor impacto a nivel individual con -0,2 t CO₂e/persona/año, esta es la huella que dejan los estudiantes de las facultades de Medicina veterinaria y Zootecnia, Ingeniería Forestal e Ingeniería Agronómica que van a la granja de práctica durante los dos primeros meses del semestre.

La categoría de transporte interno, que incluye empleados, funcionarios y estudiantes de Ingeniería Agronómica y Medicina Veterinaria y Zootecnia, también tiene una huella de carbono negativa (-7,0 t CO₂e/persona/año). Los empleados con -0,4 t CO₂e/persona/año, representan el menor impacto de huella *per cápita*, ya que el medio de transporte de la mayoría es la bicicleta. El Servicio de Protección Ambiental [SEPA], (2015), estimó la HC de la Universidad de Córdoba, España, donde se determinaron emisiones indirectas causadas por la movilidad de alumnos (autobús y moto) tienen una huella *per cápita* de 0,06 t CO₂e/persona/año y 0,1 t CO₂e/año, respectivamente y los funcionarios con 0,1 t CO₂e/persona/año.

Los funcionarios, por su parte, tienen una huella de -1,8 t CO₂e/persona/año atribuidas directamente al consumo de combustibles fósiles, relacionadas con su medio de transporte diario. Por último, se evidenció que los estudiantes de Medicina Veterinaria y Zootecnia e Ingeniería Agronómica tienen una huella de -5,2 t CO₂e/persona/año, generadas por el aumento en el número de viajes de los mismos. El transporte de alimentos representa la HC mayor, siendo negativa, con un valor de -6,1 t CO₂e/año, atribuido a la frecuencia con la que se descargan los alimentos en el CURDN.

4.6.2 Huella de carbono por producto. Los diferentes productos comercializados dentro del CURDN, como arroz, maíz y algodón, provienen del sistema de producción agrícola, estos presentaron una huella de carbono negativa influenciada por las emisiones de combustibles fósiles y fertilizantes nitrogenadas de (-0,06 t CO₂e/ha/año). El cultivo de arroz presenta la mayor huella negativa con un (-1,5 t CO₂e/t arroz) valor inferior a la emisión reportada por Andrade et al., (2014b) de (0,3 t CO₂e/t arroz) en Campoalegre, Huila.

Para el sistema de producción forestal no se evidenció extracción de productos (maderables y no maderables), ya que la finalidad de los bosques es la conservación y preservación de los mismos. Por otra parte, las plantaciones forestales de *T. grandis* y *G. arborea*, con un área de 7 ha son de uso académico e investigativo, el resto de lotes destinados para plantaciones se encuentran en etapa de crecimiento; cabe resaltar que no se incluyeron las emisiones producto del aprovechamiento de las plantaciones forestales a futuro.

Calcular la huella individual/persona y producto/unitario permitió la influencia de las personas que realizan labores diarias dentro del CURDN y los productos para ser comercializados.

4.7 HUELLA DE CARBONO DEL CURDN

En general, la HC del CURDN es positiva de (1575,7 t CO₂e/año), es decir, la fijación es mayor que las emisiones de GEI en todas las actividades evaluadas; teniendo una fijación de 1908,7 t CO₂e/año, y una de emisión de 186,7 t CO₂e/año por parte de los sistemas de producción evaluados y 146,3 t CO₂e/año por parte del sector administrativo. Esto convierte al CURDN en una granja amigable con el medio ambiente en términos de carbono. La presencia de leñosas perennes es importante, ya que funcionan como sumideros de carbono y ayudan en la mitigación del cambio climático. Este balance positivo, permite que la granja sea carbono neutro y disponga de reducciones de GEI adicionales que eventualmente podrían ser comercializadas y/o empleadas para

compensar las emisiones de los sistemas de producción agropecuarios para obtener productos carbono neutro y acceder a mercados diferenciados o mercados verdes.

5. CONCLUSIONES

Se encontró una huella de carbono general para el CURDN positiva de 1575,7 t CO₂e/año directamente atribuido a una fijación de 1908,7 t CO₂e/año y una emisión de 333 t CO₂e/año, atribuidas a los sistemas de producción más la emisión del sector administrativo. La mayor compensación frente a las emisiones de GEI se presentó por el uso del suelo en bosques, plantaciones y áreas no cultivadas, evidenciando la importancia de las leñosas perennes como sumideros de carbono para mitigar los efectos del cambio climático.

Las estimaciones de emisión, con valores de menos de 0,001; 1,2 y 2,8 t CO₂e/ha/año, para los sistemas de producción forestal, agrícola, y pecuario, respectivamente, muestra que el último sistema presenta la mayor emisión de GEI con un 75% del total, principalmente durante el proceso digestivo y la gestión del estiércol del ganado. El sistema agrícola es el segundo emisor de GEI con 24% y <1%, esto como consecuencia del uso de fertilizantes nitrogenados y combustibles fósiles en el manejo de los cultivos.

La tasa fijación de carbono estimada para la finca CURDN es de 3,5 t CO₂e/ha/año, donde el sistema de producción forestal, aporta el 99% de este valor, atribuido a las reservas de bosque que se encuentran. El 1,0% de la fijación de carbono es aportado por los sistemas agroforestales con maderables, los cuales tienen el potencial de mitigar los GEI que emiten los sistemas agrícolas y pecuarios.

El proceso de producción y venta del maíz, algodón y arroz de la granja, genera emisiones por utilización de fertilizantes nitrogenados y consumo de combustibles fósiles. El arroz aporta el 84% del total de las emisiones mientras que el maíz y algodón aportan el 4 % y 12%, respectivamente.

Este balance positivo, permite que la granja sea carbono neutro y disponga de reducciones de GEI en los sistemas de producción agropecuarios, finalmente se obtienen

beneficios ambientales y de comercialización de cada producto el cual obtendrá un certificado amigable con el medio ambiente.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que los sistemas agroforestales tienen capacidad y potencial de fijar de carbono, se recomienda la implementación estos y sistemas silvopastoriles SSP en el CURDN y en el departamento, lo cual genera futuras proyecciones para compensar las emisiones de los sistemas de producción agropecuarios y así obtener productos de carbono neutro y acceder a mercados diferenciados o mercados verdes.

Se recomienda minimizar la aplicación de fertilizantes nitrogenados y de combustibles fósiles utilizados en el transporte para la supervisión y mantenimiento de los lotes, generando bajas emisiones de GEI, causantes de la degradación de los suelos, erosión; esta emisión generada puede ser equilibrada con los desechos y residuos de origen animal (fertilizantes orgánicos), permitiendo de dichos productos obtengan sellos de buenas prácticas silvícolas.

Es recomendable que la institución promueva la investigación hacia proyectos de desarrollo investigativo, promoviendo la reforestación de las áreas no cultivadas, con finalidad de compensar las emisiones evaluadas a través del cálculo de su huella de carbono.

Se recomienda el incrementó las áreas verdes en el campus convirtiéndola a mediano plazo en una institución de carbono neutral, que podría tentar a una certificación nacional, resaltando su imagen institucional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I...Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267, 297-308. doi: 10.1016/j.foreco.2011.12.013
- Alvarado, J., Andrade, H. & Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16 (1), 21-31. doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a02
- Andrade, H., Segura, M., Somarriba, E., Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras en fincas indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería de las Américas*, (46), 45-50. Recuperado de http://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/andrade2008.pdf
- Andrade, H., Figueroa, J.M. & Silva, D. (2013). Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientia Agroalimentaria*, (1), 6-10. Recuperado de <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/1318/1/RIUT-LI-spa-2013-Almacenamiento%20de%20carbono%20en%20cacaotales%20%28Theobroma%20cacao%29%20en%20Armero-Guayabal%20%28Tolima%2C%20Colombia%29.pdf>
- Andrade, H.J., Segura, M., Canal, D., Feria, M., Alvarado, J., Marín, L...Gómez, M. (2014a). The carbon footprint of coffee production chains in Tolima, Colombia. En Oelbermann, M. (ed.). (2014), *Sustainable agroecosystems in climate change mitigation*, (pp. 15-268). The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Andrade, H.J., Campo, O. & Segura, M.A. (2014b). Huella de carbono del sistema de producción de arroz (*Oryza sativa*), en el municipio de campo alegre, Huila, Colombia. *Corpoica Cienc. Tecnología Agropecu*, 15 (1), 25-31. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v15n1/v15n1a04.pdf>

- Andrade, H.J., Marín, L.M. & Pachón, D.P. (2014c). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro*, 26 (2), 127-132. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612014000200008&lng=es&tlng=es.
- Andrade, H.J., Segura, M.A. & Varona, J.P. (2015). Huella de carbono del sistema de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Palmira, Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6 (1), 19-27. Recuperado de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1260/1596>.
- Arcos, J. C. (2016). *Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con leucaena (Leucaena leucocephala)*. (Tesis de maestría). Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia: Universidad del Tolima, Ibagué. Recuperado de <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/1691/1/DOCUMENTO%20FINAL%20BIBLIOTECA%20FEB%2021%202017.pdf>
- Arévalo, R.L & Londoño, A. (2006). *Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima*. Recuperado de http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/LIBROS/Libro_maderas.pdf.
- Aristizabal, J. & Guerra, A. (2002). *Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal Nogal cafetero (Cordia alliodora) – Cacao (Theobroma cacao L)- Plátano (Musa paradisiaca)*. (Tesis de pregrado). Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales: Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Bogotá D.C, Colombia. Recuperado de <http://www.sidalc.net/repdoc/A4836e/A4836e.pdf>
- Avila, G., Jimenez, F., Beer, J., Gomez, M., e Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforesteria en las Américas*, 8 (30), 32-35. Recuperado de http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5765/Almacenamiento_fijacion_de_carbon.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- Baena, M. P. (15 de julio de 2015). Colombia urbanizada y biodiversa. *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-urbanizada-y-biodiversa-articulo-572840>.
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2014). *Fundamentos del cambio climático*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/248552756/Fundamentos-del-Cambio-Climatico-pdf#scribd>.
- Benavides, H.O & León, G.E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.
- British Standards Institution [BSI]. (2011). *Guide Pas 2050:2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Recuperado de <http://shop.bsigroup.com/upload/shop/download/pas/pas2050.pdf>.
- Brown, S. & Lugo, A. (1984). Biomass of Tropical Forest: A new estimate based on forest volumes. *Science*, 223 (4642), 1290-1293. Doi: 10.1126 / science.223.4642.1290
- Brown, S., Cabarle, B. & Livernash, R. (1997). *Carbon counts: estimating climate change mitigation in forestry projects*. Estados Unidos: World Resources Institute. Recuperado de http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACD175.pdf
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E., Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecología*, (111), 1-11. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.484.5959&rep=rep1&type=pdf>
- Camargo, J., Rodríguez, J. & Arango, A. (2010). Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, (61), 86-94.
- Camargo, L., Arboleda, M., & Cardona, E. (2013). Producción de energía limpia en Colombia, la base para un crecimiento sostenible. *Boletín virtual XM. Compañía Expertos en Mercados, filial de ISA, Colombia*. Recuperado de: http://www.xm.com.co/BoletinXM/Documents/MDLColombia_Feb2013.pdf.

- Canal, D. (2017). *Mitigación y adaptación al cambio climático en sistemas de producción de café en el municipio de Líbano, Departamento del Tolima*. (Tesis de Maestría), Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué.
- Carmona, J.C, Bolívar, D.M & Giraldo, L.A (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18 (1), 49-63.
- Castillo, C. (2012). Así se mueve el desarrollo minero energético del país. *Portafolio*. Recuperado de <http://www.portafolio.co/negocios/empresas/mueve-desarrollo-minero-energetico-pais-94590>.
- Ceballos, E. & Ocaña, S. (2014). *Estrategias de mitigación frente al cambio climático en fincas cafeteras de la Unión, Nariño*. (Tesis de pregrado). Facultad de Ciencias Agrícolas: Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Nariño.
- Chacón, P., Leblanc, H.A. & Russo, R.O. (2007). Fijación de carbono en un bosque secundario de la Región Tropical Húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical*, 3 (1), 1-11.
- Chavan, B. & Rasal, G. (2012). Total Sequestered Carbon Stock of *Mangifera indica*. *Journal of Environment and Earth Science*, 2 (1). 37-49.
- Cifuentes, M. (2010). *ABC del cambio climático en Mesoamérica*. Recuperado de <http://www.sidalc.net/repdoc/a3718e/a3718e.pdf>
- Compañía de Expertos en Mercado XM. (2015). *Informe de operación del SIN y operación del mercado*. Recuperado de <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/Default.aspx>.
- Concha, J., Alegre, J., & Pocomucha, V. (2007). Determinación de la reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L, en el Departamento de San Martín, Perú. *Ecología aplicada*, 6 (1-2), 75-82.
- Correa, P. (2016). En 20 años Colombia aumentó en un 15% sus emisiones de Gases de Efecto de Invernadero. *El Espectador*. Recuperado de <http://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/20-anos-colombia-aumento-un-15-sus-emisiones-de-gases-d-articulo-663749>.
- Corpoaire, 2002. *Esquema de ordenamiento territorial. Uso actual del suelo rural Boavita-Boyaca/2002-2010*. Recuperado de

[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/pot%20-%20uso%20actual%20y%20cobertura%20veg%20-%20boavita%20\(14%20pag%20-%20175kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/pot%20-%20uso%20actual%20y%20cobertura%20veg%20-%20boavita%20(14%20pag%20-%20175kb).pdf).

Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], 2011. *Agenda Ambiental del municipio de Armero, Guayabal*. Recuperado de https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documento_s/estudios/agendas/2010_Agenda_Ambiental_del_Municipio_de_Armero_Guayabal.pdf.

Centro Regional de Estudios y Educación Ambiental – Universidad Antofagasta. (s.f). Huella de carbono campus coloso (Acción 6.4). Recuperado de <http://intranetua.uantof.cl/crea/Huella%20de%20Carbono%20CC.pdf>

Cubero, J.A., & Rojas, S.R. (1999). *Fijación de carbono en plantaciones forestales de melina (Gmelina arborea Roxb.), teca (Tectona grandis L.f) y pochote (Bombacopsis quinata jacq.) en los cantones de Hojancha, y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. (Tesis Licenciatura en Ciencias Forestales). Escuela de Ciencias Ambientales: Universidad Nacional, Heredia (Costa Rica).

Dai, Z., Birdsey, R., Johnson, K., Dupuy, J., Hernandez, J. & Richardson, K. (2014). Modeling carbón stock in a secondary tropical dry forest in the Yucatán península, Mexico. *Water air soil pollut*, 225 (1925), 1-15.

Dávila, H. (2011). *Estimación de la cantidad de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao L.) en los departamentos de Suchitepquez y Retalhuleu del Sur-Occidente de Guatemala*. (Tesis de pregrado). Facultad de agronomía: Área integrada, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Detlefsen, G, Somarriba,E. (2015).*Producción agroforestal de madera en fincas agropecuarias de Centroamérica*. En: Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueito, E., Fassola, E., Eibl,H. (Eds). *Sistemas agroforestales. Funciones productiva, socioeconómica y ambientales. Serie 75 técnica*. Informe Técnico 402. CATIE, Tirrialba, Costa Rica. Editorial CIPAV, Cali, Colombia. p. 21-45.

Duaber, E. Guía práctica y teórica para el diseño de un inventario forestal de reconocimiento. Recuperado de http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnabx164.pdf.

- Duarte, C.M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo, M.,...Valladares, F. (2006). *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema tierra*. Recuperado de https://portal.uc3m.es/portal/page/portal/grupos_investigacion/sociologia_cambio_climatico/Pardo%20-%20Libro%20Cambio%20Global%20Impacto%20de%20la%20actividad%20humana.pdf.
- Ecosystem Marketplace. (2014). *Turning over a New Leaf: State of the Forest Carbon Markets*. Recuperado de http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_4770.pdf.
- Espinosa, w., krishnamurthy, L., Vázquez, A., & Torres, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales en café. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18 (1), 57-70.
- Finkbeiner, M. (2009). Carbon footprinting opportunities and threats. *Int J Life Cycle Assess. Springer*. 14, 91–94.
- Fonseca, W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H. & Leblanc, H. (2008). Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica. *Agroforesteria en las Americas*, (46), 57-64.
- Flewelling, J.W., & Jong, R. (1994). Considerations in simultaneous curve fitting for repeated height-diameter measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 24 (7), 1408-1414.
- Galindo, R., (2013). *Los bonos de carbono y el impacto en la economía colombiana*. (Tesis de pregrado). Ingeniería Administrativa: Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado.
- Gamarra, J. (2001). Estimación del contenido de carbono en plantación de *Eucalyptus globulus Labill*, en Junin, Perú. En Juan, Gamarra, Simposio internacional medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales (pp.1-21). Valdivia, Chile.

- Gómez, J.D. & Rueda, R.A. (2011). *Productividad del sector ganadero bovino en Colombia durante los años 2000 a 2009*. (Tesis pregrado). Colegio Mayor Nuestra Señora del Rosario, Bogotá.
- Guerra, L. (2007). *Construcción de la huella de carbono y logro de carbono neutralidad para el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)*. Costa Rica. (Tesis Maestría). Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación: Escuela de Posgrado, CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Gutiérrez, J. & Andrade, J. (2013). *Proyección de demanda de energía eléctrica en Colombia*. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. Recuperado de http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_de_manda_ee_Abr_2013.pdf.
- Hernández, C. (2014). Modelos alométricos para estimar la biomasa arriba y abajo del suelo de caucho (*Hevea brasiliensis*) y Copoazu (*Theobroma grandiflorum*) en el departamento de Caquetá, Colombia. (Disertación de Maestría). Facultad de Ciencias Agropecuarias: Universidad de la Amazonía, Caquetá, Colombia.
- Henao, E., Ordoñez, Y., Villalobos, R. & Carrera, F. (2015). *El bosque secundario en Centroamérica*. Un recurso potencial de uso limitado por procedimientos y normativas inadecuadas. Recuperado de http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7242/el_bosque_secundario_en_ca.pdf?sequence=3.
- Holdridge, L. (1996). *Ecología basada en zonas de vida*. (4ª reimpresión). San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Hristov, A.N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T.,... Oosting, S. (2013). *Mitigación de las emisiones de gases de efecto de invernadero en la producción ganadera – Una revisión de las opciones técnicas para la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO₂*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3288s.pdf>.
- Hummel, S. (2000). Understory development in Young *Cordia alliodora* plantation. *New forest*, 19, 159-170.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P.,... Rojas, J. (2007). 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), 27-36.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. (2007). *Preguntas y respuestas más frecuentes sobre BIOCOMBUSTIBLES*. Recuperado de <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>.
- Jiménez, E. & Landeta, A. (2015). Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn F.) Campus Prosperina – ESPOL. *Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5131/1/8507.pdf>.
- Kleinn, C. (2000). Inventarios y evaluación de árboles fuera del bosque en grandes espacios. *Unasylva*, 200 (51): 3-10.
- Leyva, P., Chaparro, L.R., Yanine, D., Sánchez, J., Pabón, J.D., Yepes, L.D.,... Barbosa, C.E. (1999). *Inventario Nacional De Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero, 1990 - Resumen ejecutivo*. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009528/gasesre.pdf>.
- López, L.Y., Domínguez, M., Martínez, P., Zavala, J., Gómez, A. & Posada, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y Bosques*, 22 (3), 49-60.
- MacDicken, K. (1997). *A guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Arlington, VA: Winrock International Institute for Agricultural Development. 43 p.
- Maraseni, T., Cockfield, J., Maroulis, J. (2010). An assessment of greenhouse gas emissions: Implications for the Australian cotton industry. *Journal of agricultural science*, (148), 501-510.
- Marin, M.P. (2016). *Estrategias de reducción de la huella de carbono en el ciclo de vida de la producción de cacao (Theobroma cacao) y procesamiento industrial de chocolate en Colombia*. (Tesis maestría). Facultad Ingeniería Agronómica: Universidad del Tolima, Ibagué.

- Marin, M.P., Andrade, H.J. & Sandoval, A.P. (2016). Fijación de carbono atmosférico en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *Revista U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 19 (2), 351-360.
- Méndez, E., Beer, J., Faustino, J. & Otálora, A. (2000). *Plantación de árboles en línea*. Recuperado de: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3404/plantacion_de_arboles.pdf?sequence=1.
- Monsalve, M. (2016). Así se mide el carbono de nuestros bosques. *El Espectador*. Recuperado de: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/asi-se-mide-el-carbono-de-nuestros-bosques-articulo-614516>.
- Montagnini, F. (2015). *Chapter 12: Función de los sistemas agroforestales en la adaptación y mitigación del cambio climático*. En: Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueito, E., Fassola, E., Eibl, H. (Eds). *Sistemas agroforestales. Funciones productiva, socioeconómica y ambientales. Serie 75 técnica*. Informe Técnico 402. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Cali, Colombia: Editorial CIPAV.
- Mora, V. (2001). *Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas de monocultivos y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica*. (Tesis Maestría). Programa de enseñanza para el desarrollo y la conservación: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- Murgueitio, E., Giraldo, C. & Cuartas, C.A. (2006). *Los bosques de galerías o corredores*. Carta Fedegan (95). Recuperado de http://elti.fesprojects.net/2011Corridors1Colombia/cf_95_bosques_riberen%CC%83os-guadua-trupillo-erosio%CC%81n_eo%CC%81lica-mdl.pdf.
- Nieto, M.I., Guzmán, M.L. & Steinaker, D. (2014). Emisiones de gases de efecto de invernadero: simulación de un sistema ganadero de carne típico de la región central de Argentina. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 40 (1), 92-101.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2007). *Producción pecuaria en América Latina y del Caribe*. Recuperado de <http://www.fao.org/americas/perspectivas/produccion-pecuaria/es/>.

- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2009). *FAO Recomienda políticas que integran cambio climático y seguridad alimentaria*. Recuperado de http://www.un.org/spanish/News/story.asp?NewsID=17170#.WLCbWFU1_IU.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Informe sobre recursos mundiales del suelo. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2004). *Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005. Términos y definiciones (Versión definitiva)*. Recuperado de <http://www.fao.org/forestry/9690-0d07adfee9364a4127238bf3ffc7d6ab2.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2014). *La FAO y sus socios chinos trabajan para conseguir financiación de carbono para ganaderos y pastores*. Noticias FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/news/story/es/item/233126/icode/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2015). *La agricultura debe cambiar*. Noticias FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/news/story/es/item/278270/icode/>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2016). *Cambio climático amenaza la base de la seguridad alimentaria de América Latina y el Caribe: El sector agrícola*. Noticias FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/428178/>
- Ortiz, A.M. & Riascos, L.D. (2006). *Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao *Theobroma cacao* L y Laurel *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavón) Oken en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica*. (Tesis de pregrado) Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Colombia.
- Olmeda, M & Castillo, J.S. (1998). *El sector agroalimentario y el desarrollo regional*. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=9OhZd9fAYX4C&pg=PA29&lpg=PA29&dq=Sector%20forestal%20conformado&source=bl&ots=RKozaN05OR&sig=NvQtvFiGkAfN5RzU9n5Zman5Ju4&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjw8->

T2ys7XAhXIYt8KHTbPCy8Q6AEIUzAJ#v=onepage&q=Sector%20forestal%20conformado&f=false.

- Pachón, D. & Marín, L. (2012). *Fijación de carbono en sistemas agroforestales con café en el Departamento del Tolima*. (Tesis pregrado). Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima, Ibagué.
- Panel Intergubernamental en Cambio Climático (1996). *Libro de trabajo para el inventario de gases de efecto invernadero: Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero versión revisado en 1996*. Vol.2, capítulo 5. Recuperado de <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/spanish.html>.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC]. (2001a). *Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático 2001: Mitigación*. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/mitigation/mitigation-spm-ts-sp.pdf>.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC]. (2001b). *Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>.
- Panel Intergubernamental de cambio climático [IPCC]. (2002). *Cambio Climático y Biodiversidad. Documento técnico V del IPCC*. Recuperando de <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>.
- Panel Intergubernamental en Cambio Climático [IPCC]. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Recuperado de http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC]. (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC]. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto de invernadero. Vol. 2: Energía*. Recuperado de http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf.

- Panel Intergubernamental en Cambio Climático [IPCC]. (2007). *Climate Change: The Physical Science Basis*. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf.
- Pereira, L., Andrade, E., Queiroz, A., Lemos, P., Riveiro, J., Soarez F. (2016). Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. *Artigo Científico*, 47 (1), 32-40.
- Pérez, L., & Kanninen, M. (2003). Antecedentes de Biomasa Aérea en Plantaciones de *Tectona grandis* en Costa Rica. *Revista de Ciencias Forestales del Trópico*. 15 (1), 199-213. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/23616336>.
- Pezo, D. e Ibrahim, M. (1996). Sistemas silvopastoriles: Una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. En D. Pezo y M. Ibrahim, 1er. *Foro Internacional sobre "Pastoreo intensivo en zonas tropicales"* (p. 39). Veracruz, México FIRA – Banco de México.
- Phillips, J.F., Duque, A.J., Yepes, A.P, Cabrera, K.R, García, M.C, Navarrete, D.A... Cárdenas, D. (2011). *Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en las biomasa aérea en bosque naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos*. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022167/EstimacionCarbono2005.pdf>.
- Phillips, J.F., Duque, A.J., Scott, C., Peña, M.A., Franco, C.A., Galindo, G... Cárdenas, D. 2014. *Aportes técnicos del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono a la propuesta de preparación de Colombia para REDD+: datos de actividad y factores de emisión*. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022974/AportesMonitoreoBosquesCarbono2.pdf>
- Poroma, D. (2012). *Estrategias de reducción de la huella de carbono en la producción del grano de cacao (Theobroma cacao L.) para la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua*. (Tesis Maestría). Escuela de posgrados Centro Agronomico Tropical de Investigaciones y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- Pulido, A.D., Turriago, J.D., Jiménez, R., Torres, C.F., Rojas, A., Chaparro, N.,...López, J.A (2016). *Inventario nacional y departamental de gases de efecto invernadero –*

- Colombia. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf.
- Quinceno, N.J. y Tangarife, G.M. (2013). *Estimación de contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en un resguardo indígena piapoco chigüiro-chatare de barrancominas, departamento del Guainía*. (Tesis Maestría), Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible: Universidad de Manizales, Caldas.
- Rodas, S.G., (2014). *Estimación y Gestión de la Huella de Carbono del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar* (tesis de pregrado) Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas: Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
- Rodríguez, N. (2013). *Guía para la cuantificación de la biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación*. Recuperado de <https://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=42210&download=Y>.
- Rojas, R., Li, T., Lora, G. & Anderesen, L. (2013). A measurement of the carbon sequestration potential of *Guadua angustifolia* in the Carrasco National Park, Bolivia. *Inesad*, 1-15.
- Samayoa, S. & Sosa, B. (2011). *Guía de orientaciones: Mercado de carbono, oportunidades para proyectos de pequeña escala*. Recuperado de <http://www.snvla.org/mm/file/gu%C3%ADa%20mercado%20de%20carbono%20SNV.pdf>.
- Segura, M. (1997). *Almacenamiento y fijación de carbono en Quercus costaricensis, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica*. (Tesis de pregrado), Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Escuela de Ciencias Ambientales: Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Segura, M. & Kanninen, M. 2002. Chap: Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. En: Orozco, L; Brumer, C. (Eds.). *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. Turrialba Costa Rica, CATIE. p. 202-216. (Serie Técnica. Manual Técnico No. 50).
- Segura, M., Kanninen, M. & Suárez, D. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, (68), 143-150.

- Segura, M. & Andrade, H.J (2008). ¿Cómo estimar rápidamente el carbono almacenado en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales indígenas de Talamanca, Costa Rica? *Agroforestería en las Américas*, (46), 97-103.
- Segura, M. & Andrade, H. J. (2012). Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica*) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul*, (35), 60-77.
- Servicio de protección ambiental [SEPA]. (2015). Huella de carbono de la Universidad de Córdoba 2014. Recuperado de <https://www.uco.es/servicios/comunicacion/actualidad/item/109282-finalizado-el-2%C2%BA-informe-de-huella-de-carbono-de-la-universidad-de-c%C3%B3rdoba>.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosque del tipo forestal siempreverde. En Bastienne, Schlegel, Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales (pp.1-13). Valdivia, Chile.
- Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., Ritson, P., Grierson, P., Adams, M... Eamus, D. (2002). Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system. Technical report N. 31. Recuperado de <http://www.fullcam.com/FullCAMServer/Help/reps/TR31%20Protocol%20for%20Sampling%20Tree%20and%20Stand%20Biomass.pdf>.
- Smith, J., Sabogal, C., de Jong, W. & Kaimowitz, D. (1997). *Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina*. CIFOR Occasional paper No. 13. Recuperado de <http://www.cesvi.org.bo/sia/sites/default/files/13916.pdf>
- Solomon, N., Birhane, E., Tadesse, T., Treydte, A. & Meles, K. (2017). Carbon stocks and sequestration potential of dry forests under community management in Tigray, Ethiopia. *Ecological processes*, 6 (20), 1-11.
- Somarriba, E. (1990). ¿Qué es Agroforestería? *El Chasqui*: (24), 5-13.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. & De Haan, C. (2006). *La larga sombra del ganado, problemas ambientales y opciones*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a0701s.pdf>.

- Tubiello, F.N., Córdor, R.D., Salvatore, M., Piersante, A., Federici, S., Ferrara, A.,...
Prosperi, P. (2015). *Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura- Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i4260s.pdf>.
- Umaña, A. (2012). *Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan, Tolima*. (Tesis de Maestría). Facultad de Estudios Ambientales y Rurales: Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Umaña, A. & Conde, A. (2013). Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan, Tolima. *Revista Ciencia Animal*, (6), 11-27.
- Universidad del Tolima. (2015). Centro Universitario Regional del Norte. Recuperado de: www.ut.edu.co
- Vargas, R., Allen, M. & Allen, E. (2008). Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology*, (14), 109-124.
- Vetter, S., Sapkota T., Hillier, J., Stirling, C., Macdiamid, J., Aleksandrowicz, L., Dangour, A. (2017). Greenhouse gas emissions from agricultural food production to supply Indian diets: Implications for climate change mitigation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, (237), 234-241.
- Wiedmann, T. & Minx, J. (2008). *A Definition of 'Carbon Footprint'*. Ecological Economics Research Trends: Chapter 1. Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers.
- Zanne, A.E, Lopez, G, Coomes, D.A...Chave, J. (2009). Global Wood density database. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.
- Zanotti, R. & Galloway, G. (1996). *Manejo de plantaciones de coníferas*: Guía técnica para el extensionista forestal. Serie técnica, manual técnico / CATIE; n° 22. Recuperado de http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2955/Manejo_de_plantaciones_de_coniferas.pdf?sequence=1.

ANEXOS

Anexo A. Identificación de muestras botánicas


Nº	Colecta	Nombre Científico	Familia	Género
	1	<i>Eugenia sp.</i>	Myrtaceae	Eugenia
	2	<i>Swartzia simplex (Sw.) Spreng.</i>	Fabaceae	Swartzia
	3	<i>Swartzia trianae Benth.</i>	Fabaceae	Swartzia
	5	<i>Guarea guidonia (L.) Sleumer</i>	Meliaceae	Guarea
	8	<i>Guettarda rusbyi Standl.</i>	Rubiaceae	Guettarda
		<i>Pseudobombax septenatum (Jacq.)</i>		
	9	<i>Dugand</i>	Malvaceae	Pseudobombax
	13	<i>Coccoloba obovata Kunth</i>	Polygonaceae	Coccoloba
	11	<i>Picramnia latifolia Tul.</i>	Picramniaceae	Picramnia
	12	<i>Cupania latifolia Kunth</i>	Sapindaceae	Cupania
	15	<i>Tabernaemontana grandiflora Jacq.</i>	Apocynaceae	Tabernaemontana
	16	<i>Ficus benamina L.</i>	Moraceae	Ficus
		<i>Senna spectabilis (DC.) H.S Irwin &</i>		
	17	<i>Barneby</i>	Fabaceae	Senna Mill
	18	<i>Senegalia polyphilla (D.C.) Britton</i>	Fabaceae	Senegalia
	19	<i>Melococcus biugatus Jacq.</i>	Sapindaceae	Melococcus
	20	<i>Guázuma ulmifolia Lam.</i>	Malvaceae	Guazuma Mill
	21/23	<i>Cupania cinerea Poepp.</i>	Sapindaceae	Cupania
	22	<i>Sterculia apetala (Jacq.) H. Karst</i>	Malvaceae	Sterculia
	24	<i>Muntingia calabura L.</i>	Muntingiaceae	Muntingia
	25	<i>Cassia fistula L.</i>	Fabaceae	Cassia
	26	<i>Manilkara zapota (L.) P. Rayen</i>	Sapindaceae	Manilkara
		<i>Machaerium capote Triana ex</i>		
	27	<i>Dugand.</i>	Fabaceae	Machaerium

Anexo B. Valores densidades por árbol individual

Nombre científico	Densidad (g/cm ³)
<i>Chloroleucon bogotense</i>	0,54
<i>Myrcia cerifel</i> L.	0,54
<i>Ochorma</i> sp	0,21
<i>Guarea trichilioides</i>	0,54
<i>Theobroma cacao</i>	
<i>Swietenia macrophylla</i>	0,514
<i>Anacardium excelsum</i>	0,34
<i>Hevea brasiliensis</i>	0,492
<i>Ceiba pentandra</i>	0,21
<i>Chilinchli</i>	0,54
<i>Jacaranda copaia</i>	0,35
<i>Senegalia polyphilla</i> (D.C). Britton	0,54
<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don. ex Steud	0,733
<i>Vochisya ferruginea</i>	0,39
<i>Ficus</i> sp	0,54
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	0,505
<i>Jacaranda caucana</i>	0,54
<i>Inga edulis</i>	0,587
<i>Calycophyllum candidissimun</i> (Vahl) DC	0,69
<i>Tabebuia guayacan</i> (Seem.) Hemsl	0,82
<i>Stemmadenia grandiflora</i>	0,479
<i>Ficus hispida</i>	0,32
<i>Spondias mombin</i>	0,39
<i>Pseudosamenea guachapele</i>	0,54
<i>Buddleja bullata</i>	0,54
<i>Brosinum</i> sp	0,54
<i>Mangifera indica</i>	0,54

<i>Gliricidia sepium</i>	0,53
<i>Gmelia arborea</i>	0,4
<i>Cordia alliodora</i>	0,39
<i>Casearia corymbosa</i>	0,586
<i>Samanea saman</i>	0,64
<i>Virola flexuosa</i>	0,51
<i>Eugenia sp</i>	0,54
<i>Swartzia simplex (Sw) Spreng</i>	0,54
<i>Swartzia trianae Bent</i>	0,54
<i>Guarea guidonea (L.) Sleumer</i>	0,54
<i>Guettarda rusby Standl.</i>	0,54
<i>Pseudobombas septenatum (Jacq.)</i>	
<i>Dugand</i>	0,26
<i>Coccoloba obovata Kunt.</i>	0,54
<i>Picramnia latifolia Tul.</i>	0,54
<i>Cupania latifolia Kunt.</i>	0,54
<i>Tabernaemontana grandiflora Jacq.</i>	0,54
<i>Ficus benjamina L.</i>	0,54
<i>Senna spectabilis (DC.) H.S Irwin & Barneby</i>	0,54
<i>Melococcus biugatus Jacq.</i>	0,54
<i>Cupania cinerea Poepp</i>	0,51
<i>Sterculia apetala (Jacq) H. Karst</i>	0,419
<i>Muntingia calabura L.</i>	0,3
<i>Cassia fistula L.</i>	0,9
<i>Manilkira zapota (L.) P. Rayen</i>	0,54
<i>Machaerium capote Triana ex dugand.</i>	0,54
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	0,493
<i>Tectona grandis</i>	0,56
<i>Crescentia cujete</i>	0,57

<i>Triplaris americana</i>	0,49
<i>Cecropia angustifolia</i> Trécul.	0,54
<i>Oxandra longipetala</i>	0,54

 Universidad del Tolima	PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	Página 2 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 03
		Fecha Aprobación: 15 de Febrero de 2017

Producto de la actividad académica/científica/cultural en la Universidad del Tolima, para que con fines académicos e investigativos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad del Tolima. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento en el momento mismo que hago entrega del trabajo final a la Biblioteca Rafael Parga Cortes de la Universidad del Tolima.

De conformidad con lo establecido en la Ley 23 de 1982 en los artículos 30 “**...Derechos Morales. El autor tendrá sobre su obra un derecho perpetuo, inalienable e irrenunciable**” y 37 “**...Es lícita la reproducción por cualquier medio, de una obra literaria o científica, ordenada u obtenida por el interesado en un solo ejemplar para su uso privado y sin fines de lucro**”. El artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “**los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores**” y en su artículo 61 de la Constitución Política de Colombia.

- Identificación del documento:

Título completo: **HUELLA DE CARBONO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DEL CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DEL NORTE (CURDN) DE LA UNIVERSIDAD DEL TOLIMA, ARMERO-GUAYABAL, TOLIMA, COLOMBIA.**

- Trabajo de grado presentado para optar al título de:

INGENIERO FORESTAL


- Proyecto de Investigación correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

- Informe Técnico correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

- Artículo publicado en revista:

- Capítulo publicado en libro:

- Conferencia a la que se presentó:

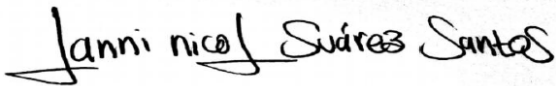
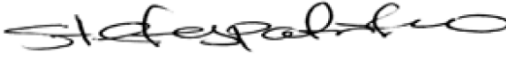
 Universidad del Tolima	PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	Página 3 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 03
		Fecha Aprobación: 15 de Febrero de 2017

Quienes a continuación autentican con su firma la autorización para la digitalización e inclusión en el repositorio digital de la Universidad del Tolima, el:

Día: 20 Mes: FEBRERO Año: 2018

Autores:

Firma

Nombre:	Lanni Nicol Suárez Santos		C.C.	1.106.484.502
Nombre:	Stefanny Patiño Forero		C.C.	1.110.553.604
Nombre:			C.C.	
Nombre:			C.C.	

El autor y/o autores certifican que conocen las derivadas jurídicas que se generan en aplicación de los principios del derecho de autor.