

ESTIMACION DE LA CAPTURA DE CARBONO EN LA BIOMASA RADICULAR
EN ALISO *Alnus jorullensis* H.B.K. EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES
EN LA GRANJA EXPERIMENTAL BOTANA, MUNICIPIO DE PASTO,
DEPARTAMENTO DE NARIÑO.

SANDRA MILENA JARAMILLO GUERRERO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL
PASTO – COLOMBIA
2007

ESTIMACION DE LA CAPTURA DE CARBONO EN LA BIOMASA RADICULAR
EN ALISO *Alnus jorullensis* H.B.K. EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES
EN LA GRANJA EXPERIMENTAL BOTANA, MUNICIPIO DE PASTO,
DEPARTAMENTO DE NARIÑO.

SANDRA MILENA JARAMILLO GUERRERO

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO AGROFORESTAL

Presidente de tesis
JAVIER ANÍBAL LEÓN GUEVARA
MSc. Agroforestería Tropical

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL
PASTO – COLOMBIA
2007

Nota de aceptación:

JAVIER ANÍBAL LEÓN GUEVARA
Presidente de Tesis

JESÚS CASTILLO FRANCO
Jurado Delegado

DIEGO MUÑOZ GUERRERO
Jurado

HUGO FERNEY LEONEL
Jurado

San Juan de Pasto, Junio de 2007

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el Trabajo de Grado, son de responsabilidad exclusiva del autor.”

Artículo 1º del acuerdo No. 324 de Octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Dedico este trabajo a

Dios

*Por ser mi guía, compañero, protector y
permitirme alcanzar un escalón mas...*

Mi Mami

*María Ritha, por ser mi amiga incondicional, por su
ejemplo, consejos y animarme siempre a seguir
adelante!!!*

Mi Papi

*José Antonio, por sus sabios consejos, sacrificio,
entrega y por darme todo el apoyo...*

Mi hermano

*Edward, por su compañía y por los ratos alegres que
hemos pasado juntos...*

† Mis Abuelitos

*Umbelina y Alfredo, por ser indiscutiblemente los
grandes maestros y ahora mis ángeles, me enseñaron
con su ejemplo a luchar, amar, vivir, pero sobretodo a
soñar, ya que esos sueños se pueden
convertir en realidad.*

Siempre estarán en mi corazón!!!

Mis familiares

*Por darme la fuerza y el apoyo que se necesita para
cumplir todas las metas que me he trazado...*

Mis Amigos

*Por brindarme una sonrisa cada
vez que la necesitaba y por los buenos deseos.
Joyce, Karito, Sandra² por llorar mis tristezas, reír mis
alegrías y por compartir hasta mis sueños...*

*“Gracias por los buenos momentos,
por que de eso esta hecha la vida,
solo de momentos”*

SANDRA

AGRADECIMIENTOS

Deseo dejar plasmado mi entero agradecimiento, especialmente a:

JAVIER ANIBAL LEÓN GUEVARA. Ingeniero Agroforestal. M. Sc. Docente Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño, por su permanente apoyo, dedicación y orientación en este trabajo de investigación; pero sobretodo por su incondicional amistad.

JESÚS CASTILLO FRANCO, DIEGO MUÑOZ GUERRERO, HUGO FERNEY LEONEL. M. Sc., miembros del comité asesor de la Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño, por sus sugerencias y recomendaciones.

Al personal Técnico-Administrativo de la Granja Experimental Botana, por su colaboración y por permitirme desarrollar este trabajo.

GERMAN CHAVEZ JURADO. Jefe Dto. De Laboratorios Especializados. Universidad de Nariño, por su colaboración y su contribución al desarrollo de la investigación.

LUZ AMALIA FORERO PEÑA. Ingeniera Forestal. M. Sc. Docente de la Universidad de Nariño, por su orientación, apoyo y por la oportunidad que me dio de hacer parte del Grupo de Investigación Agroforestería Tropical.

Mis profesores, especialmente a JORGE FERNANDO NAVIA, WILLIAN BALLESTEROS, CARLOS RIVADENEIRA, no solo por los muchos conocimientos compartidos, sino también por la amistad que me brindaron.

ALBA LUCY PEÑAFIELD. Secretaria. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño, por su paciencia y amistad.

ÁLVARO JOSÉ CASTILLO MARÍN. Secretario Académico. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño, por su amistad y por su colaboración.

La Facultad de Ciencias Agrícolas, al programa de Ingeniería Agroforestal.

Todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron en la culminación del presente trabajo de tesis.

CONTENIDO

Pag.

INTRODUCCIÓN	19
II. MARCO TEÓRICO	21
2.1 SISTEMAS AGROFORESTALES: CONCEPTO, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN.....	21
2.1.1 CONCEPTO.	21
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES.....	21
2.1.2.1 SISTEMAS AGROFORESTALES SECUENCIALES.	21
2.1.2.2 SISTEMAS AGROFORESTALES SIMULTÁNEOS.	22
2.2 SISTEMAS AGROFORESTALES COMO SUMIDEROS DE CARBONO.	23
2.3 COMPONENTES DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO.	24
2.3.1 METODOLOGÍA PARA MUESTREO DE RAÍCES EN SISTEMAS AGROFORESTALES.	25
2.3.2 MUESTREO DE RAÍCES FINAS CON BARRENO.	26
2.4 EL CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES.....	26
2.4.1 CARBONO ALMACENADO (CA).	27
2.4.2 CARBONO FIJADO (CF).	27
2.5 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ESPECIE ALISO.	27
2.5.1 GENERALIDADES.	27
2.5.2 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA.	28
2.5.3 NOMBRES COMUNES.	28
2.5.4 ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN.	29
2.5.5 DENDROLOGÍA.	29
2.5.6 USOS.	30
OTROS USOS:	30
III. DISEÑO METODOLÓGICO	32
3.1 LOCALIZACIÓN.....	32
3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ENSAYOS SELECCIONADOS.....	34
3.2.1 SISTEMA SILVOPASTORIL ÁRBOLES DISPERSOS CON ALISO.....	34
3.2.2 SISTEMA CULTIVO EN CALLEJONES CON ALISO.....	34
IV. METODOLOGÍA	35
4.1 RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.....	35
4.2 SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES.....	35
4.3 TRABAJO DE CAMPO, INFORMACIÓN PRIMARIA.	39
4.3.1 SELECCIÓN DE LOS ÁRBOLES.	39
4.3.2 MEDICIÓN DE LA BIOMASA RADICULAR.	40
4.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO.	41
4.4.1 OBTENCIÓN DE LA FRACCIÓN DE CARBONO DE LAS RAÍCES.	43
4.5 CARBONO ALMACENADO.	43

V. RESULTADOS Y DISCUSION	45
SISTEMA SILVOPASTORIL	45
5.1 VARIABLES EVALUADAS	45
5.2 ESTIMACION DE LA BIOMASA RADICULAR (FINAS Y GRUESAS) EN ALNUS JORULLENSIS H.B.K EN EL SISTEMA SILVOPASTORIL.....	46
5.3 CONTENIDO DE CARBONO EN EL SISTEMA RADICULAR DE ALNUS JORULLENSIS H.B.K.	49
5.3.1 CARBONO EN LAS RAÍCES FINAS.	49
5.3.2 CARBONO EN LAS RAÍCES GRUESAS.	51
SISTEMA CULTIVO EN CALLEJONES.	53
5.4 VARIABLES EVALUADAS	53
5.5 ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA RADICULAR (FINAS Y GRUESAS), EN ALNUS JORULLENSIS H.B.K EN EL SISTEMA CULTIVO EN CALLEJONES.	54
5.6 CONTENIDO DE CARBONO DE LA BIOMASA RADICULAR.	56
5.6.1 CARBONO EN LAS RAÍCES FINAS.	56
5.6.2 CARBONO EN LAS RAÍCES GRUESAS.	59
5.7 COMPARACION DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES.	60
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFIA	64
ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estimación de los efectos mitigantes de CO ₂ de los SAF (tC/Ha ⁻¹)	24
Tabla 2. Usos principales de la especie <i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	30
Tabla 3. Índice de valor de importancia (IVI) del componente arbóreo dentro de los SAF implementados en la Granja Experimental Botana. 2006.	36

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Aliso (<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.).	28
Figura 2. Mapa Granja Experimental Botana.	33
Figura 3. Mapa sistema silvopastoril con <i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	37
Figura 4. Mapa sistema cultivo en callejones con <i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	38
Figura 5. Muestreo con el barreno "Eijkelkamp".	40
Figura 6. Muestreo, separación, secado y maceración de las raíces.	44
Figura 7. Rangos de DAP de <i>Alnus jorullensis</i> H.B.K., en el sistema silvopastoril.	45
Figura 8. Toneladas de biomasa seca de raíces finas.	46
Figura 9. Toneladas de biomasa seca de raíces gruesas.	48
Figura 10. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces finas.	49
Figura 11. Carbono almacenado en raíces finas.	50
Figura 12. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces gruesas.	52
Figura 13. Rangos de DAP de <i>Alnus jorullensis</i> H.B.K., en el sistema cultivo en callejones.	53

Figura 14. Toneladas de biomasa seca de raíces finas.	54
Figura 15. Toneladas de biomasa seca de raíces gruesas.	55
Figura 16. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces finas.	57
Figura 17. Carbono almacenado en raíces finas.	58
Figura 18. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces gruesas.	59
Figura 19. Biomasa y carbono total presente en los dos sistemas agroforestales.	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Formulario de registro.	70
Anexo B. Clases diamétricas para los dos sistemas agroforestales.	71
Anexo C. Características físicas y químicas del suelo del sistema silvopastoril.	72
Anexo D. Características físicas y químicas del suelo del sistema cultivo en callejones.	73
Anexo E. Resultados de Laboratorio.	74
Anexo F. Variables dasométricas evaluadas en 17 árboles <i>Alnus jorullensis</i> en el sistema silvopastoril, Granja Experimental Botana.	75
Anexo G. Variables dasométricas evaluadas en 17 árboles <i>Alnus jorullensis</i> en el sistema cultivo en callejones, Granja Experimental Botana.	76

GLOSARIO

BIOMASA. Masa total de organismos vivos en una zona o volumen determinados; la biomasa puede utilizarse como fuente sostenible de combustible, con emisiones netas bajas o nulas.

CALENTAMIENTO GLOBAL. Aumento de la temperatura de la tierra debido al uso de combustibles fósiles y a otros procesos industriales que llevan a una acumulación de gases invernadero (dióxido de Carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos) en la atmósfera.

CARBONO (C). Elemento esencial en la nutrición animal y vegetal. Se encuentra en todos los compuestos orgánicos y forma la base de toda la materia viva. Entra a las plantas como dióxido de carbono, se convierte en carbohidratos, proteínas y grasas y constituye la columna vertebral de estas moléculas.

CARBONO ALMACENADO. Hace referencia a la cantidad de carbono que se encuentra en un ecosistema vegetal. Tiene en cuenta criterios como tipo de bosque o vegetación, densidad de la madera, factores de ajuste que se basan en datos de biomasa calculada a partir de volúmenes por hectárea de inventarios forestales. Generalmente, este tipo de carbono se paga por conservación de bosques y no puede ser liberado a la atmósfera si se accede a un pago por servicios ambientales. El carbono almacenado se expresa en $t\ C\ Ha^{-1}$.

CARBONO FIJADO. Se refiere a la acumulación de carbono que una unidad de área cubierta por vegetación, puede fijar en un lapso de tiempo dado. Su cuantificación permite predecir el comportamiento del C en cualquier momento durante el crecimiento de la población. El carbono fijado permite el pago por servicios ambientales, a los propietarios de bosques o sistemas agroforestales que eviten cambios en el uso de la tierra durante cierto período. El carbono fijado se expresa en $t\ C\ Ha^{-1}/año$.

CFCs (clorofluorocarbonos). Compuestos a base de cloro utilizados en refrigeradores y acondicionadores de aire, aerosoles, solventes, bandejas y envoltorios usados por la industria y el comercio de alimentos. responsables del deterioro de la capa de ozono. Un átomo de cloro puede destruir hasta 10.000 moléculas de ozono.

DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂). Emitido por la respiración de los animales, la putrefacción de los vegetales y la quema de cualquier materia que contenga carbono. El dióxido de carbono no es tóxico, pero puede asfixiar ya que no mantiene la vida. Las principales causas de su incremento son las emisiones industriales que provienen del uso de combustibles fósiles y de madera extraída de las selvas tropicales.

EFFECTO INVERNADERO. Aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, debido al uso excesivo de combustibles fósiles por la sociedad industrial, que provoca una retención creciente de calor y humedad en la Tierra, capaz de derretir los glaciares y elevar el nivel de los mares.

MATERIA SECA. Forraje verde al que se le extrae completamente el agua por medios físicos como el calor. En ella están todos los elementos del pasto o elementos sólidos que contienen las fibras, proteínas y minerales.

MITIGACIÓN. Medidas para reducir las fuentes o ampliar los sumideros de gases de efecto invernadero.

PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES. Compensación a los usuarios de la tierra por servicios ambientales que un determinado uso del suelo provee, adoptando prácticas que generan ciertos beneficios como la conservación de la biodiversidad, captura de carbono, entre otros. Lo cual ha permitido dirigir los esfuerzos hacia desarrollar sistemas en los cuales se les paga a los productores por los servicios que ellos generan.

SECUESTRO. Proceso de retirar y almacenar dióxido de carbono de la atmósfera a través, por ejemplo, de cambios en el uso de la tierra, forestación, reforestación o ampliaciones de carbono en los suelos agrícolas.

SERVICIO AMBIENTAL. Capacidad que tienen los ecosistemas para generar productos útiles para el hombre, entre los que se pueden citar la regulación de gases de efecto invernadero, producción de oxígeno, secuestro de carbono, protección de la biodiversidad, suelos y recurso hídrico.

RESUMEN

La presente investigación se realizó en la Granja Experimental Botana, localizada en la vereda Botana, corregimiento Catambuco en el municipio de Pasto, Colombia; sobre la vía Panamericana que de Pasto conduce a Ipiales desviándose en el kilómetro 77 al lado izquierdo de la carretera que conduce a la vereda “El Campanero”.

Se seleccionaron dos sistemas agroforestales: sistema silvopastoril árboles dispersos y sistema cultivo en callejones, para evaluar la biomasa radicular en raíces finas y raíces gruesas y determinar su almacenamiento de carbono en el componente *Alnus jorullensis* H. B. K.

Para la extracción de biomasa en las raíces finas, se realizó mediante el uso del barreno “Eijkelkamp” (8 cm de diámetro y 15 cm de longitud), y el apeo total de dos árboles por sistema para raíces gruesas. Para el muestreo de las raíces finas se tomaron muestras a diferentes profundidades del suelo (0 a 15 cm, 15 a 30 cm y de 30 a 45 cm), en 17 árboles de *Alnus jorullensis* en cada sistema agroforestal, que fueron seleccionados previamente por clase diamétrica (entre 0 y 14,7 cm). Cada muestra fue lavada, pesada, y llevada al proceso de asepsia, en donde se determinó el peso real de las raíces por cada profundidad, posteriormente se secaron a 70 °C por 24 horas en los Laboratorios especializados de la Universidad de Nariño, determinando así la materia seca total y la fracción de carbono correspondiente para las raíces finas y raíces gruesas.

Se determinó que *Alnus jorullensis* en el sistema silvopastoril con la edad de nueve años acumula 21,01 t/Ha⁻¹ de biomasa radicular, fijando un valor de 9,87 tC/Ha⁻¹ de carbono total. Mientras que en el sistema cultivo en callejones, con siete años de edad *Alnus jorullensis* generó una acumulación de 19,31 t/Ha⁻¹ con 9,20 tC/Ha⁻¹. Existiendo una correlación de su concentración exponencial a medida que avanza el estado sucesional de crecimiento de la especie.

Se encontró que existen diferencias en carbono almacenado de *Alnus jorullensis*, en el sistema silvopastoril fue de 6,76 tC/Ha⁻¹ a diferencia de el sistema cultivo en callejones 2,36 tC/Ha⁻¹. Es así que podrían encontrarse alternativas sostenibles de manejo de sistemas agroforestales como potenciales sumideros de carbono a

nivel radicular, que pueden contribuir a mitigar el efecto de las emisiones globales de carbono.

El propósito de esta investigación es dar a conocer la importancia que tiene los sistemas agroforestales como una alternativa para la mitigación de gas carbónico, permitiendo detallar la capacidad de capturar y secuestrar carbono en la parte subterránea de los ecosistemas terrestres en la especie *Alnus jorullensis* que permite la adición de materia orgánica al suelo, mejorando las características físicas del mismo, por lo cual se debe considerar como un mecanismo de secuestro por los diseñadores de las políticas sobre cambio climático. Además esta investigación resalta el estudio de las raíces ya que está recibiendo más atención debido a las variadas funciones fisiológicas de este órgano: en la nutrición vegetal, reserva de nutrientes, como órgano de sostén, y como órgano involucrado en la regulación fisiológica.

Palabras claves: biomasa radicular, carbono, sistemas agroforestales.

ABSTRAC

This investigation was executed in Botana Experimental Farm, it is located in Botana sidewalk, district of Catambuco in the municipality of Pasto, Colombia. This farm is to the south of Panamericana road exactly on 77 kilometer at the left side of the road that leads "The Campanero sidewalk.

It selected two agroforestry systems: silvopastoral systems trees dispersed and alleycropping, to evaluate the root biomass in thin and structural roots and determine its storage of carbon on *Alnus jorullensis* H. B. K. component.

To the biomass extraction in the thin roots, it carried out with the used "Eijkelkamp" large drill (8 cm of diameter and 15 cm of length), and with the total felling of two trees for the system of structural root. It took some samples to different depths of ground (0 to 15 cm, 15 to 30 cm and 30 to 45 cm), on seventeen trees of *Alnus jorullensis* in each agroforestry systems, which were selected previously for diametrics sort (between 0 and 14,7 centimeter). Every sample was washed and weighed, and then it was taken to the process of asepsis, and it determined the real weight of roots for every depth, after these roots were dried at 70^o Centigrade for 24 hours in the specialized Laboratorys of Nariño University, were determined the total dried matter of each sample and the fraction of carbon corresponding to the thin and structural root.

It determined that *Alnus jorullensis*, in the silvopastoral systems with the age of nine years accumulates 21,01 t/Ha⁻¹ of root biomass, and fixes a value of 9,87 tC/Ha⁻¹ of total carbon. While in the alleycropping systems, *Alnus jorullensis* with seven years generated an accumulation of 19,31 t/Ha⁻¹ with 9,20 tC/Ha⁻¹. It exists a correlation of its exponential concentration as far as possible advances the state sucesional of species growth.

Finally it found that there are differences in the stored carbono of *Alnus jorullensis*, in the silvopastoral systems was of 6,76 tC/Ha⁻¹ whereas in the alleycropping systems 2,36 tC/Ha⁻¹. For this reason it is possible to find sustainable alternatives of handling of agroforestry systems like potential drains of carbon to radicular level, which can contributed to mitigate the effect of global emissions of carbon.

The aim of this investigation is to give to know the importance of the agroforestry systems like an alternative for the mitigation of carbon gas, and to permit to detail the capacity of capturing and zeizing carbon in the subterranean places of earthly ecosystems in the *Alnus jorullensis* kind that allows the adition of organic material on the ground, it improves the characteristics of this and for this reason it should consider like a mechanism of kidnapping for designers of politics about climatic changes. Besides this investigation emphatizes the study of roots which are receiving more attention due to the mixed and physiological functions of this organ.

Key words: root biomass, carbon, agroforestry systems.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, la ciencia y la política han tomado conciencia de que algunos de los cambios ambientales que provoca la actividad humana son globales en escala, y pueden tener consecuencias de gran importancia para el futuro de la humanidad, al estar provocando un calentamiento generalizado de la tierra.

El cambio global mejor conocido por la población en general, es el incremento en la temperatura atmosférica debido al aumento del efecto invernadero¹. Es de conocer que este efecto siempre ha existido, cuyos gases que lo determinan son naturales, que al igual contribuyen a la regulación del clima terrestre, de manera que representan una de las bases de la vida de la tierra².

Según IPCC citado por Delgado (2001)³, el cambio climático es definido como cualquier cambio en el clima en el tiempo, surgiendo de la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana. En la reducción del efecto invernadero, se conocen diferentes prácticas de manejo de uso de la tierra como potencial para mitigar dicho efecto. Entre ellas, están las prácticas agroforestales como alternativa productiva y a la vez generadora de servicios ambientales, al aumentar el almacenamiento de carbono en los suelos y la vegetación⁴.

Los sistemas agroforestales permiten reducir las emisiones de gases como en el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) quienes son los responsables en el efecto de invernadero⁵. Para Snowdon *et al* (2001) citados por Andrade e Ibrahim⁶, los sistemas agroforestales acumulan carbono en el sistema

* IPCC (Sigla en inglés del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático).

¹ DELGADO, D. Bases ecológicas para el manejo de los recursos naturales: Cambio global antropogénico. 2001. p. 1.

² DELGADO, D. Op., cit., p. 1.

³ DELGADO, D. Op., cit., p. 2.

⁴ DIXON, R. K. Sistemas agroforestales y gases invernadero. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol 2. Nº 7, 1995. p. 22-36.

⁵ DIXON, R. Op., cit., p. 23.

⁶ ANDRADE, H. e IBRAHIM, M. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? En: Agroforestería en las Américas (CATIE) Vol. 10 Nº 39-40. 2003. p. 112.

en cuatro componentes: sistemas radiculares, biomasa sobre el suelo, hojarasca y carbono orgánico del suelo. De los cuales son escasas las investigaciones que se han presentado en Nariño Colombia.

Se ha considerado que el componente suelo en su conjunto constituyen un sumidero de carbono, de materia orgánica y nutrientes, que contribuyen a la recuperación de la biomasa aérea en el proceso sucesional, debido al efecto de las raíces sobre las propiedades del suelo, pues el efecto de una perturbación no es tan severo como lo es para la biomasa aérea en estudios de secuestro de carbono⁷.

El propósito de esta investigación es dar a conocer la importancia que tiene los sistemas agroforestales como una alternativa para la mitigación de gas carbónico, en la disminución del calentamiento global actual, mediante la evaluación de la concentración en captura y fijación de carbono en la biomasa radicular en uno de los componentes de dos sistemas agroforestales, mientras que se pueden considerar que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado⁸ y estos puedan remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, además resaltar el estudio de las raíces debido a su importancia en las variadas funciones fisiológicas de este órgano: en la nutrición vegetal, ya que su funcionamiento guarda una relación directa con las cantidades y calidad de biomasa útil cosechable (madera, leña, frutos, principios medicinales, taninos, entre otros) que van produciendo y acumulando durante las estaciones de crecimiento; reserva de nutrientes, tanto mediante modificaciones ecomorfológicas especializadas como en los tejidos radicales ordinarios; como órgano de sostén, distribuyendo ramificaciones en el suelo de manera que se asegure el mejor anclaje posible de la planta y como órgano involucrado en la regulación fisiológica, produciendo una serie de sustancias específicas capaces de favorecer no solamente el crecimiento de órganos aéreos, sino también de promover cambios cualitativos en el desarrollo de la planta, como la iniciación de estolones o la liberación de yemas axilares de la dominancia apical⁹.

⁷ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 181, 183.

⁸ ANDRADE, H e IBRAHIM, M. Op., cit., p. 109.

⁹ MORALES RIOS, E. A. Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales. En: Simposio Internacional "Posibilidades de Manejo Forestal Sostenible en América Tropical". CATIE. Turrialba, Costa Rica. 2000. 11 p.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas Agroforestales: Concepto, características y clasificación.

2.1.1 Concepto.

La agroforestería es una forma de uso y manejo de los recursos naturales en la que las especies leñosas son utilizadas en asociación deliberada con cultivos agrícolas o con animales, y técnicas productivas en el mismo terreno de manera simultánea o en secuencia temporal¹⁰.

2.1.2 Clasificación de Sistemas Agroforestales.

2.1.2.1 Sistemas Agroforestales secuenciales.

Se distinguen porque los cultivos y los árboles ocupan sucesivamente buena parte del mismo espacio. En estos sistemas existe una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos; es decir que los cultivos son reemplazados por los árboles a medida que van terminando sus ciclos de vida o hasta que el follaje de los árboles se encuentre desarrollado¹¹.

- Agricultura migratoria. Sistema en el cual el bosque se corta y quema, en algunas regiones (dependiendo condiciones climáticas), para cultivar la tierra en un tiempo que puede oscilar entre 2 y 5 años¹².
- Sistema Taungya. Es un método de regeneración de bosques que combina la producción de árboles con la siembra de cultivos básicos de pan coger durante los primeros años de establecimiento con la plantación¹³. La implementación de este sistema en áreas de vocación forestal, pretende buscar un equilibrio entre la agricultura y la silvicultura, un mejor uso del suelo¹⁴.

¹⁰ MONTAGNINI, F., *et al.* Sistemas agroforestales; principios y aplicaciones en los trópicos. 2ª. Edición, San José de Costa Rica, 1992. p. 17.

¹¹ ARÉVALO, L. Definición y clasificación de sistemas agroforestales. ICRAF, s.I. 2002. p. 4.

¹² MILAGRO LEON, E. Sistemas Agroforestales. PNR: Plan Nacional de Rehabilitación. INDERENA. Bogota. 1993. 136 p.

¹³ DURAN VELEZ, Y. Sistemas Agroforestales. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). 2000. p 80.

¹⁴ MILAGRO, L. Op., cit., p. 16-18.

2.1.2.2 Sistemas Agroforestales simultáneos.

Consiste en la integración simultánea y continua de cultivos anuales y perennes, árboles maderables, frutales o de uso múltiple, y/o ganadería. Estos sistemas incluyen asociaciones de árboles con cultivos anuales o perennes, huertos caseros mixtos y sistemas agrosilvopastoriles¹⁵

- Árboles en asociación con cultivos perennes. Se combinan los árboles y cultivos de manera intercalada durante toda la rotación de los árboles. La elección de un sistema con árboles para sombra depende de la necesidad de diversificar la producción¹⁶.
- Árboles en asociación con cultivos anuales. Estos sistemas se prestan para la producción de especies anuales tolerantes a la sombra; el diseño más empleado es el de cultivos en callejones, donde se utilizan cultivos semestrales o de corto ciclo en asociación con árboles; en la mayoría de los casos se utilizan especies de árboles fijadoras de nitrógeno¹⁷.
- Huertos Familiares. Sistema de uso del suelo en la cual hay un manejo deliberado de árboles de uso múltiple, arbustos cultivos y otras plantas, distribuidos en diferentes estratos espaciales, con arreglos permanentes y/o temporales que pueden interactuar entre si y/o con componentes animales, formando diferentes asociaciones, cuyo fin principal es la complementariedad a las necesidades nutricionales, económicas, medicinales y culturales, en la cual hay intervención parcial de mano de obra familiar¹⁸.
- Sistemas agrosilvopastoriles. Son asociaciones de árboles maderables o frutales con animales o cultivos, se practican diferentes niveles, desde las grandes plantaciones arbóreas comerciales con inclusión de ganado, hasta el pastoreo de animales como complemento a la agricultura de subsistencia. La economía de estos sistemas se caracteriza por la obtención de ingresos, tanto a corto como a largo plazo, a través de los productos animales y arbóreos¹⁹.

¹⁵ MONTAGNINI, F. Op., cit., p. 71.

¹⁶ ARÉVALO, L. Op., cit., p. 7.

¹⁷ MONTAGNINI, F. Op., cit., p. 75.

¹⁸ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Sede Palmira. Memorias Seminario Huertos Habitacionales Agroforestales. Secretaria de Agricultura y Pesca del Valle del Cauca. Junio 20 de 2003. 101 p.

¹⁹ MONTAGNINI, F. Op., cit., p. 82.

2.2 Sistemas agroforestales como sumideros de carbono.

En el sector de uso de la tierra y bosques se han identificado dos estrategias principales para acumular carbono. La primera es aumentar la fijación de carbono al crear o mejorar sumideros. La segunda es prevenir o reducir la tasa de liberación de carbono ya fijado en sumideros existentes. Estas estrategias pueden denominarse “fijación de carbono” y “no emisión de carbono” respectivamente. Actividades de fijación de carbono pueden incluir tratamientos silviculturales para aumentar el crecimiento, agroforestería, aforestación, reforestación, y restauración de áreas degradadas. La “no emisión” puede incluir actividades de conservación de biomasa y suelo en áreas protegidas, manejo forestal sostenible, protección contra fuegos y promoción de quemadas controladas²⁰.

Los sistemas agroforestales, no sólo actúan como sumideros de carbono, sino que también evitan el agotamiento de los sumideros ya existentes, al reducir la presión sobre los bosques. Al convertir la madera en muebles o usarla en construcción, ésta actúa como depósito de carbono hasta su descomposición completa, que puede ser muchos años.

En el contexto de cambio climático y del ciclo global del carbono, la agroforestería es de interés por lo menos por dos razones. La primera es que el componente arbóreo fija y almacena carbono de la atmósfera vía fotosíntesis. Debido a que los árboles son plantas perennes, ellos pueden funcionar como un sumidero activo de carbono por períodos de muchos años, y continuar almacenando carbono hasta que sean cortados o mueran. La segunda razón es el aparente potencial para reducir las necesidades de desmonte de bosques para agricultura, proporcionando una alternativa a la agricultura migratoria.

Los sistemas agroforestales han sido practicados en el mundo entero por siglos y podrían proveer una alternativa ecológicamente sostenible para con problemas de uso de la tierra, tales como deforestación, degradación y desertificación, los cuales resultan en emisiones excesivas de gases de efecto invernadero²¹.

En nuestro país aún no se ha valorado plenamente los servicios ambientales prestados por los sistemas agroforestales (SAF's) a la sociedad, sin embargo, en la literatura científica se reporta diversos estudios que demuestran el enorme potencial de los SAF's en la reducción de los efectos negativos causados por la contaminación atmosférica con CO₂, en Costa Rica y América Central, bajo diferentes tipos de SAF's y condiciones de sitio, estiman el área agrícola tropical

²⁰ FUNDACION SOLAR. Elementos técnicos para inventarios de Carbono. Guatemala. 2000. p. 8.

²¹ DIXON, R. Op., cit., 24-28 p.

con potencial para SAF's entre 356 - 499.106 Ha, tienen una capacidad promedio de secuestro de CO₂ de 60 ton/Ha para América y Asia, y de 30 ton/Ha para África. En contraste, Winjum *et al* (1992) consideran un valor promedio de 95 tC/Ha, y Swisher (1991) de 38 t/Ha, este último equivalente al 75% de una plantación en bloque con una rotación de 35 años en el Bosque muy Húmedo Premontano Tropical.

En la Tabla 1, se puede analizar que el mínimo de 20 tC mitigadas al cabo de 50 años será superado en casi todos los casos reales, en donde cada tipo de SAF suministra más que el mínimo estimado en al menos un tipo de efecto. Los rangos reportados anteriormente (30-95 tC/Ha) son muy altos si se refieren sólo a la acumulación de carbono en los árboles, pero se tornarían bajos si se toman en cuenta todos los otros efectos mitigantes de los SAF.

Tabla 1. Estimación de los efectos mitigantes de CO₂ de los SAF (tC/Ha⁻¹).

Acumulación y Conservación de Reservas de C	
Árboles en SAF	3 - 60
Productos maderables	1 - 100
Materia orgánica del suelo	10 - 50
Protección de bosques existentes	0 - 1.000
Σ	(14 - 1.210)
Reducción de Emisiones de CO ₂ en 50 Años	
Substitución de energía	5 - 360
Substitución de materiales	0 - 100
Reducción de fertilizantes	1 - 5
Σ	(6 - 465)
Total	(20 - 1675)

Fuente: (Kürsten y Burschel 1993)²²

2.3 Componentes del almacenamiento de carbono.

El carbono se almacena en los ecosistemas forestales en seis compartimientos: biomasa aérea, necromasa aérea, biomasa subterránea, necromasa subterránea,

²² KÜRSTEN, E. y BURSCHEL, P. CO₂ mitigation by agroforestry. Revista Water, Air and Soil Pollution. 1993.

carbono en el suelo y los productos forestales cuando existen actividades de aprovechamiento²³. Para MacDiken (1997) citado por Andrade e Ibrahim²⁴, la biomasa subterránea es la contenida en el sistema radical y constituyen otro sumidero de carbono. Este componente es muy importante, ya que corresponde entre un 10 y un 40 % de la biomasa total.

Con el cambio en el uso del suelo como resultado de la destrucción del bosque declina no solamente el carbono existente en la biomasa aérea, sino también el contenido de carbono edáfico. A su vez, actividades de rehabilitación, revegetalización y restauración, conducen el aumento del carbono en los diferentes compartimientos. Dada la dinámica y la magnitud de las existencias de carbono en el suelo en los distintos ecosistemas forestales, es probable pensar en la necesidad de su cuantificación y medición.

La clasificación entre raíces gruesas y finas obedece a un límite arbitrario. En general, los estudios de biomasa subterránea permiten considerar las raíces gruesas como aquellas que tienen diámetro $\geq 5\text{mm}$, las cuales juegan un papel fundamental como soporte mecánico del árbol y como medio de transporte de nutrientes y agua. Las raíces finas tienen un diámetro $\leq 5\text{mm}$, cumplen una importante función en la absorción de agua y nutrientes por el árbol²⁵.

2.3.1 Metodología para muestreo de raíces en sistemas agroforestales.

Para el muestreo de raíces, se pueden emplear dos métodos: **1)** Los métodos indirectos, que se evalúan con el uso de imágenes, fotos, modelos, entre otros y **2)** Los métodos directos (destrutivos), que consisten en la excavación de raíces o del muestreo de cilindros de suelo, para determinar su biomasa.

Los métodos directos incluyen mediciones en campo y toma de muestras de los componentes, teniendo en cuenta algunos criterios de evaluación. Aunque este método es más costoso y requiere de mayor tiempo, arroja resultados de alta

²³ DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ORREGO, S. Los bosques tropicales y su contribución a la mitigación del cambio climático. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 31.

²⁴ ANDRADE, H. e IBRAHIM, M. Op., cit., p. 114.

²⁵ ORREGO, S. y DEL VALLE, J. Op., cit., p. 222, 223.

confiabilidad, que los datos que se puedan obtener utilizando los métodos indirectos²⁶.

En sistemas agroforestales se aplican, por su uso práctico, frecuentemente métodos destructivos para analizar la distribución de raíces en la capa superficial (0 - 20 cm.) hasta profundidades mayores (hasta 100 cm.). La capa superficial del suelo contiene generalmente más de la mitad del volumen total de las raíces de las especies de uso común en sistemas agroforestales.

2.3.2 Muestreo de raíces finas con barreno.

Entre los métodos directos, el muestreo de raíces finas con barreno de golpe es el más usado, ya que tiene el mínimo de destrucción y puede resultar de ser el más económico, si se pretende evaluar una área relativamente grande (>1000m²). Cuando se usa el muestreo con el barreno (diámetros del cilindro interno varían de 2 – 20 cm.), se estudia áreas relativamente pequeñas en cada punto de muestreo. La calidad de información e interpretación de resultados depende de la distribución y cantidad de los puntos de muestreo.

2.4 El Carbono en ecosistemas forestales.

Desde la perspectiva técnica las opciones forestales de compensación de carbono se relacionan con captura, emisiones evitadas y desplazamiento de combustibles fósiles. La captura se relaciona con el aumento del carbono biótico a través de la combinación de prácticas de manejo forestal, del manejo de la regeneración natural, de la revegetación y restauración de áreas degradadas y de la puesta en marcha de sistemas agroforestales²⁷.

Las plantaciones forestales, por la cantidad de biomasa que produce por unidad de área, fijan anualmente considerables cantidades de CO₂ y por ende contribuyen a la “limpieza de la atmósfera”. El carbono fijado en la biomasa permanece por largos períodos acumulado en las plantaciones (Ministerio de

²⁶ ORTIZ GUERRERO, A. M. y RIASCOS CHALAPUD, L. D. Almacenamiento y Fijación de carbono del Sistema agroforestal Cacao *Theobroma cacao* L. y Laurel *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavon) Oken en la Reserva Indígena de Salamanca, Costa Rica. , Tesis de grado I. AF., Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ingeniería Agroforestal, Pasto, 2006. 111 p.

²⁷ DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ORREGO, S. Op., cit., p. 4.

Planificación Nacional y Política Económica). Una de las funciones de las plantaciones es mitigar los gases de efecto invernadero dicha función es reconocida en la actualidad por la comunidad nacional, como internacional²⁸.

2.4.1 Carbono almacenado (Ca).

Se expresa en tC/Ha^{-1} . Hace referencia a la cantidad de carbono que se encuentra en un ecosistema vegetal, en un determinado momento. Tiene en cuenta criterios como tipo de bosque o vegetación, densidad de la madera, factores de ajuste que se basan en datos de biomasa calculada a partir de volúmenes por hectárea de inventarios forestales.

Generalmente, este tipo de carbono se paga por conservación de bosques y no puede ser liberado a la atmósfera si se accede a un pago por servicios ambientales.

2.4.2 Carbono fijado (Cf).

Se expresa en $tC/Ha^{-1}/año^{-1}$, se refiere al flujo de carbono dentro de una unidad de área cubierta con vegetación, en un lapso de tiempo dado. Su cuantificación permite predecir el comportamiento del carbono en cualquier momento durante el crecimiento de la población. Este tipo de carbono depende de las características de la especie, la tasa de crecimiento y la longevidad, así como también de las condiciones del sitio, como localización, clima y rotación²⁹.

2.5 Características generales de la especie aliso.

2.5.1 Generalidades.

Se propaga por semilla, se produce en viveros y se transplanta al campo después de 1 a 2 años. También se propaga fácilmente por estaca de raíz. Es una especie de rápido crecimiento y tiene la facultad de fijar nitrógeno, compite bien con las malezas, algunas veces sus hojas son atacadas por insectos y es susceptible a hongos del suelo, especialmente cuando crece en suelos con alto contenido de materia orgánica³⁰.

²⁸ _____ . Modelos alométricos para estimación de la biomasa aérea y el almacenamiento de carbono de *Terminalia amazonia*, en Puntarenas, Costa Rica. p. 1.

²⁹ ORTIZ, A. y RIASCOS, L. Op., cit., p. 42.

³⁰ CORPOICA NACIONAL DE INVESTIGACION Y FOMENTO FORESTAL. Guías técnicas sobre sistemas forestales y agroforestales. Bogota: CONIF, 1998. p. 73.

2.5.2 Clasificación taxonómica.

El aliso tiene la siguiente clasificación taxonómica:

División: Angiospermas.

Clase: Dicotiledóneas.

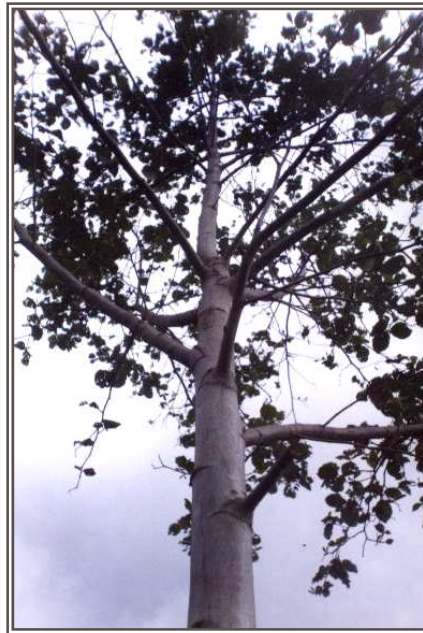
Orden: Fagales.

Familia: Betulaceae.

Género: *Alnus*.

Especie: *alpicola* H.B.K.³¹.

Figura 1. Aliso (*Alnus alpicola* H.B.K.).



Fuente: Esta investigación.

2.5.3 Nombres comunes.

En Colombia se conoce como aliso, chaquito, fresno, cerezo, abedul y aile; aliso del cerro y aliso del río en Argentina; alnus y jaul en Costa Rica. Existen alrededor de veinte especies de aliso entre arboles y arbustos. Algunas de ellas son: *A.*

³¹ GLOBALTREES. Listado de las especies de lista roja final con sinónimos. [en línea]. Globaltrees, 2006 [citado, el 10 de mayo de 2006]. Disponible en Internet: <http://www.globaltrees.org/download/anexos>.

acuminata o *zorullensis*, *A. cordata*, *A. glutinosa*, *A. incana*, *A. firma*, *A. hirsuta*, *A. nepalensis*, *A. rubra*, *A. oregana*, *A. formosana*³².

2.5.4 Origen y distribución.

El *Alnus zorullensis* nativo de México y Guatemala, se encuentra asociado con *Alnus acuminata*, que es nativo de América Central y América del Sur, y se extiende desde el noreste de México a través de América Central y Panamá y los Andes suramericanos hasta el norte de Argentina. Se planta extensamente en la cordillera Andina de Bolivia, Perú y Colombia³³.

En Colombia se encuentra naturalmente en los bosques secos, húmedos y muy húmedos del montano y montano bajo, en especial en Caldas, Risaralda, Quindío y Huila³⁴.

2.5.5 Dendrología.

Su tamaño alcanza hasta 30 m de altura en 20 años, con una copa irregular y angosta y un rendimiento de 10 a 15 m³/ha/año. Corteza lisa, de color gris oscuro; hojas simples, alternas, con estipulas, elíptico lanceoladas, con nervios en el envés obtusos, paralelos; envés pubescente de color agudo, pecíolo rojizo, presentan una coloración verde oscura y brillante en el haz, su tonalidad más clara en el envés permite observar pubescencias de color óxido.

En el mismo árbol pero separadamente, se encuentran inflorescencias masculinas terminales en amentos cilíndricos e inflorescencias femeninas coniformes. Los frutos son estróbilos cilíndricos e inflorescencias femeninas coniformes. Los frutos son estróbilos cilíndricos de 1.5 a 3 cm de largo; la germinación de la semilla es epigea y su porcentaje de germinación está relacionada con la edad y procedencia del árbol madre.

Sistema radical poco profundo, amplio y extendido. En sus raíces desarrolla, de manera simbiótica, un Actinomiceto del género *Frankia*, el cual fija nitrógeno en el suelo, además tiene una proporción carbono-nitrógeno favorable para una rápida

³² AÑAZCO, M. El Aliso (*Alnus acuminata*). Quito, Ecuador: Proyecto Desarrollo Forestal Campesino en los Andes del Ecuador, 1996. 7 p.

³³ CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA. Silvicultura de especies promisorias para producción de leña de América Central. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1992. p. 49.

³⁴ CORPOICA. Op., cit., p. 25.

descomposición y una mineralización del nitrógeno en forma aprovechable para otras plantas³⁵.

2.5.6 Usos.

Tabla 2. Usos principales de la especie *Alnus jorullensis* H.B.K.

Tipo	Usos
Medicinal	La corteza es muy utilizada contra el "Mal de orín", por su parte las hojas ayudan a combatir el estreñimiento cuando se usan como té. Hojas en infusión contra el reumatismo y los resfrios ³⁶ .
Combustible	El tallo se utiliza como leña combustible y para la elaboración de carbón.
Ornamental	La planta completa se cultiva como planta de sombra y ornato por las calles, parques y jardines, además mejora la fertilidad del suelo.
Ecológico	Es apropiado para prácticas de estabilización de cárcavas y protección de riberas contra la erosión, gracias a su buena tolerancia a las inundaciones estacionales. Su hojarasca es excelente como abono verde en las tierras agrícolas ³⁷ .
Forraje	En Nepal y Taiwán se utilizan las hojas como forraje, principalmente para cabras y ovejas.
Captura de carbono	El aliso, en una zona de vida de bosque tropical nuboso bajo, con un número de árboles por hectárea de 35 y una edad de 30 años, puede almacenar un total de 25.0 toneladas de carbono al año y un flujo de carbono de 0.8 ton/c/año ³⁸ .

Otros usos:

El aporte de nutrientes de esta especie en épocas secas podría ser muy necesario para suplir el déficit de los pastos, aunque por el ramoneo las futuras plantas no tendrán la estructura de un árbol para producir madera, sino de un arbusto que proveerá un alto contenido de biomasa foliar.

³⁵ AÑAZCO, M. Op., cit., p. 8.

³⁶ PARENT, Guy. Guía de reforestación. Bucaramanga, Colombia: CDMB, 1989. 244 p.

³⁷ SEMARNAP. Dirección de programas regionales. Especies con usos no maderables en Bosques Tropicales y Subtropicales. [en línea]. [citado el 15 de diciembre de 2006]. Disponible en Internet: http://www.semarnat.gob.mx/pfnm2/fichas/alnus_jorullensis.htm

³⁸ GUERRERO PEREZ, D. M. y HERNANDEZ BARRERO, J. J. Establecimiento de arreglos agroforestales como parcelas permanentes para evaluación y monitoreo de secuestro de carbono con participación de la comunidad de la Microcuenca Cabrera, Cuenca Alta del Río Pasto, Municipio de Pasto, Departamento Nariño, Tesis de grado I. AF., Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ingeniería Agroforestal, Pasto, 2006. p. 36.

Mejoramiento y regeneración de suelos.

Dada la capacidad del aliso de fijar nitrógeno, su utilización en el mejoramiento y regeneración de suelos es muy valiosa. Además, el aporte al suelo también puede ser en materia orgánica, ya sea en forma de hojarasca o por la mortalidad de sus raíces secundarias, manteniendo la fertilidad del suelo y la capacidad de retención de la humedad. Para Jaramillo (1993) citado por Añazco³⁹, el aliso es una especie marcadamente pionera, juega un rol valioso como rodal protector preliminar en laderas erosionadas y especialmente en las cuencas hidrográficas de las tierras altas.

³⁹ AÑAZCO, M. Op., cit., p. 23-30.

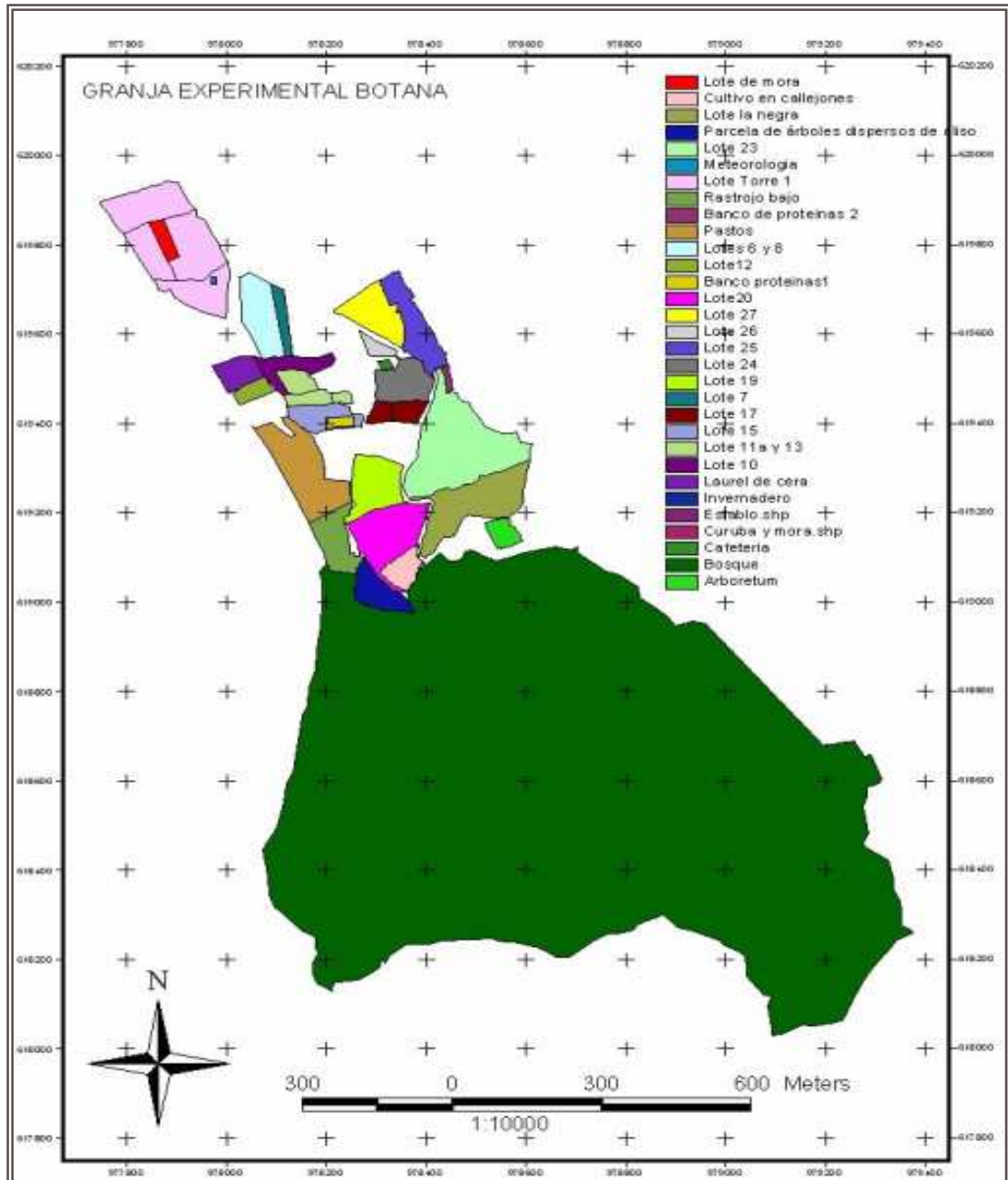
III. DISEÑO METODOLOGICO

3.1 Localización.

Este trabajo se desarrolló en dos sistemas agroforestales ubicados en la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño (Figura 2), la cual tiene un área de 1.380.000 m². Se localiza en la vereda Botana, corregimiento de Calambuco en el municipio de Pasto y se sitúa en la vía Panamericana que de Pasto conduce a Ipiales desviándose en el kilómetro 77 al lado izquierdo de la carretera que conduce a la vereda del “El Campanero”.

La Granja Experimental Botana, presenta las coordenadas planas 620000 m – 618375 m de norte a sur y 977562,5 mE – 978750 mE de occidente a oriente y coordenadas geográficas 1°0,9'40,6" latitud norte y 77°16'44,6" latitud oeste, a una altura de 2820 m, con promedio de temperatura anual de 12 °C, precipitación media anual de 1031mm/año, evaporación promedio anual cercano a los 930 mm y humedad relativa anual de 77%.

Figura 2. Mapa Granja Experimental Botana.



Fuente: Granja Experimental Botana.

3.2 Descripción general de los ensayos seleccionados.

A continuación se hace una descripción general de cada uno de los sistemas agroforestales seleccionados.

3.2.1 Sistema silvopastoril árboles dispersos con aliso.

El sistema silvopastoril implementado hace 9 años (Figura 3), se encuentra a una altura de 2825 msnm. Tiene una área aproximada de 7190 m² (0.7190 Ha), para la fecha de abril de 2006, se encontraba de manera dispersa 57 árboles de Aliso *Alnus jorullensis* H.B.K., en asocio con pastos: vicia andina *Vicia sativa*, alfalfa *Medicago sativa* L. y trébol blanco *Trifolium repens*.

3.2.2 Sistema cultivo en callejones con aliso.

Se encuentra implementado hace 7 años en una pendiente que está entre 15 - 20% (Figura 4). Tiene una área de 4583 m² (0.4583 Ha). El sistema cultivo en callejones para abril del 2006, se encontró conformado por 153 árboles de Aliso *Alnus jorullensis* H.B.K., 64 árboles de Pichuelo *Senna pistaciifolia*, 31 arbustos de Colla *Verbesina arborea* y cultivos transitorios tales como maíz (*Zea mays*), arveja *Pisum sativum*, frijol *Phaseolus vulgaris* y papa *Solanum tuberosum*.

Los árboles de aliso, están distribuidos en seis líneas con un espaciamiento entre callejones de 5 metros y a una distancia de siembra de árbol de 3 m.

IV. METODOLOGIA.

4.1 Recolección y análisis de información secundaria.

Se realizó una revisión de la información encontrada en diferentes recursos; estudios principales de la zona, estudios realizados por profesores y técnicos que apoyan los diferentes proyectos de la Granja Experimental Botana y estudios realizados por los estudiantes de diferentes semestres de Ingeniería Agroforestal, la revisión de literatura se hizo utilizando la herramienta de Internet y la biblioteca "Alberto Quijano Guerrero" de la Universidad de Nariño. Posteriormente se analizó los sistemas agroforestales, sistema silvopastoril árboles dispersos y el sistema cultivo en callejones.

4.2 Selección de los sistemas agroforestales.

Una de las razones para la selección de los dos sistemas agroforestales, se debió a la distribución del componente arbóreo *Alnus jorullensis* H.B.K, en la Granja Experimental Botana, ya que durante el manejo realizado a los sistemas presentan un comportamiento estable en crecimiento de la especie, bajo las mismas condiciones de altitud y manejo, además de encontrarlo en diferentes lugares su adopción y el establecimiento de estos sistemas son promisorios, principalmente en microcuencas afluentes a la cuenca del río Pasto.

En lo enmarcado a *Alnus jorullensis* H.B.K, se seleccionó con base en los Índices de Valor de Importancia (IVI), como herramienta útil al momento de hacer estimaciones de la importancia ecológica de las especies vegetales, al combinar diferentes características estructurales como la abundancia, la frecuencia y la dominancia. *Alnus* registro un IVI de 102.83 %, por encima de los registros en las otras especies implementadas en la Granja Experimental de Botana (Tabla 3).

Tabla 3. Índice de Valor de Importancia (IVI) del componente arbóreo dentro de los SAF implementados en la Granja Experimental Botana. 2006.

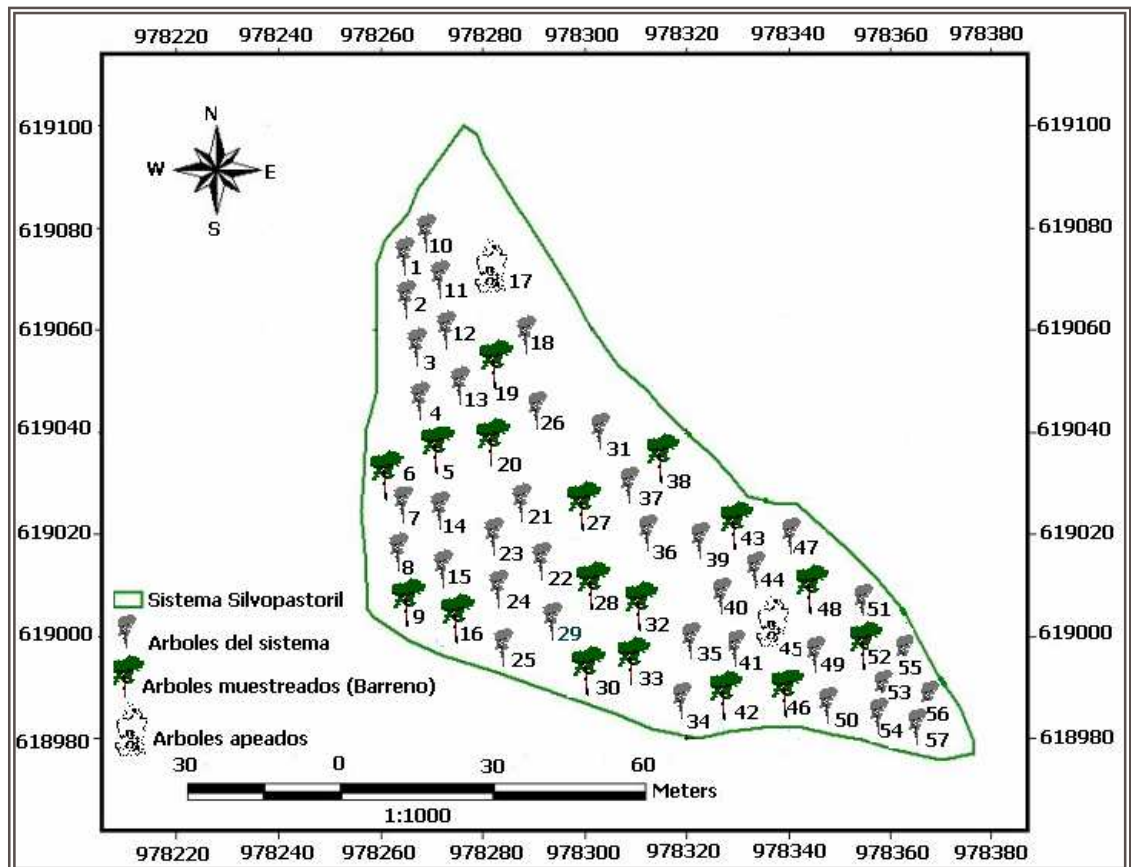
ESPECIE	A	Ar (%)	F	Fr (%)	D	Dr (%)	IVI (%)
ALISO	232	36,593	0,500	21,429	0,699	44,811	102,833
ACACIA	160	25,237	0,167	7,143	0,055	3,553	35,933
LAUREL DE CERA	81	12,776	0,333	14,286	0,209	13,416	40,478
PICHUELO	64	10,095	0,167	7,143	0,117	7,501	24,739
COLLA	31	4,890	0,167	7,143	0,364	23,338	35,370
QUILLOTOCTO	28	4,416	0,167	7,143	0,001	0,088	11,647
MANO DE OSO	17	2,681	0,167	7,143	0,104	6,692	16,517
CUCHARO	11	1,735	0,167	7,143	0,005	0,299	9,177
PELOTILLO	4	0,631	0,167	7,143	0,002	0,127	7,901
CEROTE	3	0,473	0,167	7,143	0,001	0,091	7,707
MATE	3	0,473	0,167	7,143	0,001	0,082	7,698
	634	100	2,33	100	1,56	100	300

Fuente: Esta investigación.

Donde:

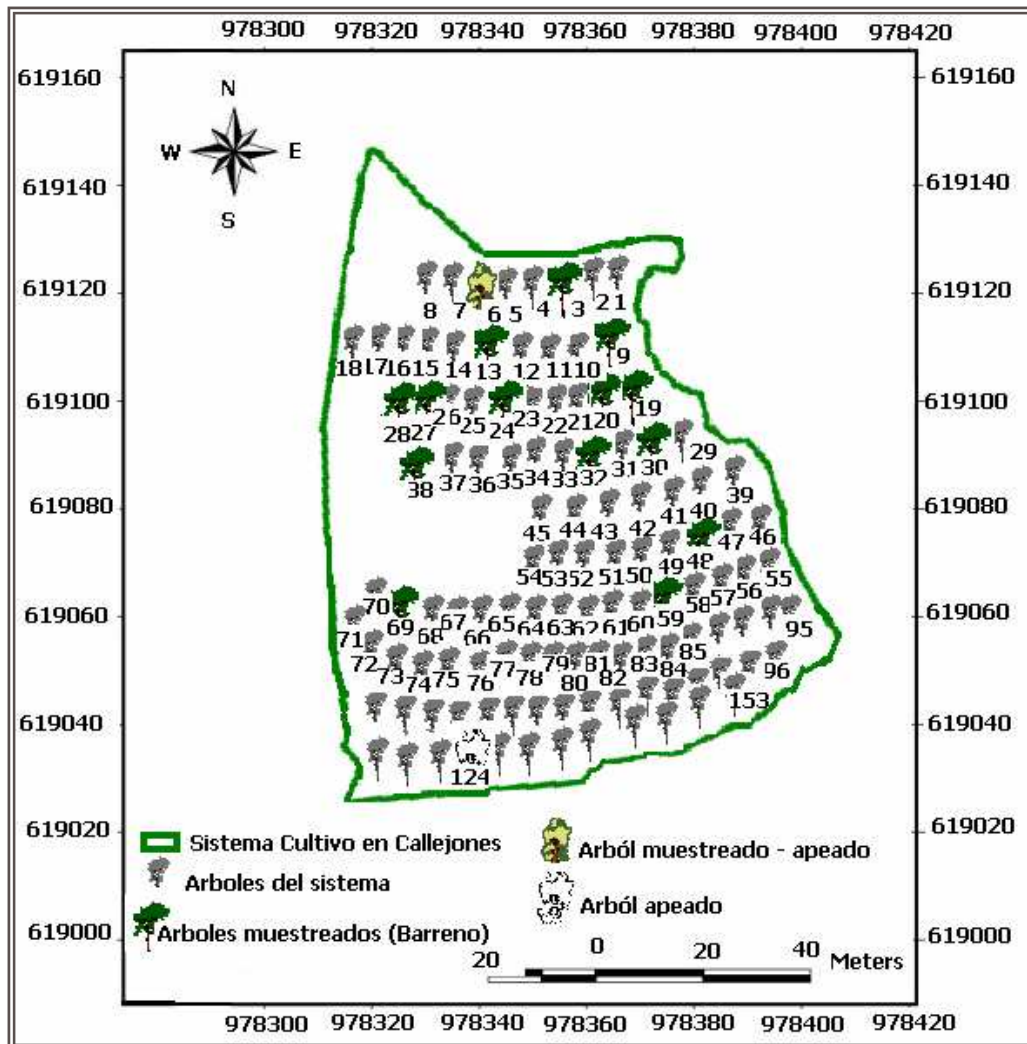
Ar%: Abundancia **Fr%:** Frecuencia **Dr%:** Dominancia
IVI %: Índice de valor de importancia (Ar%+Fr%+Dr%)

Figura 3. Mapa sistema silvopastoril árboles dispersos con *Alnus jorullensis* H.B.K.



Fuente: Esta investigación.

Figura 4. Mapa sistema cultivo en callejones con *Alnus jorullensis* H.B.K.



Fuente: Esta investigación.

4.3 Trabajo de campo, información primaria.

Se registró en formularios diseñados para cada sistema, las mediciones del componente arbóreo *Alnus jorullensis* H.B.K, principalmente diámetro a la altura del pecho, área de copa, área basal, (Anexo A. Formulario de registro).

4.3.1 Selección de los árboles.

Para seleccionar los árboles en el muestreo, se realizó de forma similar al estudio efectuado por Overman *et al* (1994) citados por Restrepo *et al*⁴⁰, para árboles en la Amazonia Colombiana, donde la muestra no es tomada estrictamente al azar. Se tomó un número aproximadamente igual de datos dentro de cada sistema (por clase de tamaño) para evitar tomar muchos datos de individuos pertenecientes a categorías menores que no aportaban mucha información en términos de biomasa.

En esta investigación se tomó en cuenta la sistematización por clases diamétricas de la especie, de tal manera su escogencia fue al azar, tendiendo en cuenta que estén representadas todas las clases diamétricas en cada sistema (Anexo B) y para mayor representación se tomaron un total de diez y siete árboles para raíces finas y dos árboles para raíces gruesas, para un total de treinta y ocho (38) individuos por los dos sistemas agroforestales.

El análisis sistemático de las medias aritmeticas para los dos sistemas agroforestales se realizó seleccionando los rangos múltiples y subcategorizados⁴¹. Los rangos de las medias son muy semejantes para los dos sistemas y analizan la homogeneidad de la misma a través de todo el rango de biomasa que son significativas.

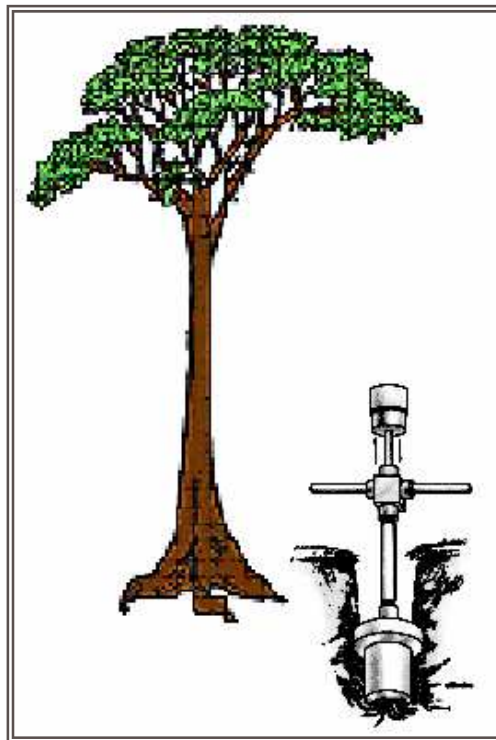
⁴⁰ RESTREPO, D.; BENJUMEA, J.; ORREGO, S.; DEL VALLE, J. y MORENO, F. Ecuaciones de biomasa para palmas del subdósel y sotobosque. *En*: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 126.

⁴¹ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J. Ecuaciones de biomasa aérea para bosques primarios intervenidos y secundarios. *En*: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 113.

4.3.2 Medición de la biomasa radicular.

Para determinar el valor de fijación de carbono concentrado en la biomasa radicular en *Alnus jorullensis*, fue necesario la medición de la biomasa radicular en cada sistema. En la toma de muestras para raíces primarias (finas), dadas las ventajas del método de barrenamiento se escogió el barreno “Eijkelkamp”, como lo recomienda Morales (1997) citado por Orrego y Del Valle⁴²; los cilindros de suelo obtenidos tienen una longitud de 15 cm y un diámetro de 8 cm (750 cc), el cual se ubicó en el promedio de las longitudes de la copa de cada árbol seleccionado, en donde se trazó una perpendicular y se procedió a la toma de muestras (Figura 5), que se hicieron a tres profundidades del suelo, (de 0 a 15 cm, de 15 a 30 cm y de 30 a 45 cm), (Figura 6).

Figura 5. Muestreo con el barreno “Eijkelkamp”.



Fuente: Esta investigación.

⁴² ORREGO, S. y DEL VALLE, J. Op., cit., p. 222.

Las muestras de raíces finas fueron lavadas y pesadas directamente en campo en una balanza, empacadas, selladas y posteriormente llevadas al laboratorio de la Universidad de Nariño en donde se realizó el lavado, identificación de las raíces finas y la determinación de la biomasa (peso fresco) de cada muestra.

Para la extracción de raíces gruesas se apearon dos árboles por sistema, para ello se generó la apertura de calicatas y se extrajo la totalidad del árbol (Figura 7); se cortó la raíz principal teniendo en cuenta que en el pesaje se registre todas las raíces secundarias que estaban adheridas desde el cono principal, con el fin de obtener la totalidad de la biomasa comprendida en las raíces gruesas. Posteriormente se tomó un kilo de raíces gruesas por cada individuo, el cual se empacó en bolsas plásticas herméticas y llevadas al laboratorio de la Universidad de Nariño, para determinar su biomasa.

Se realizó un análisis de suelos para cada sistema agroforestal (Anexo C y D), donde se muestra las características físicas y químicas de los suelos.

4.4 Análisis de laboratorio.

En el mes de junio del 2006, las muestras tanto de raíces finas y de raíces gruesas fueron llevadas a los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño, se pesaron teniendo en cuenta la metodología de Pearsus citado por Delgado y Martínez⁴³, que consistió en pesar cada muestra fresca en una balanza electrónica, posteriormente se llevó a cabo el secado en horno a una temperatura de 70 °C durante 48 horas (Figura 6) y finalmente se estimó la materia seca total.

Dentro de los controles de contaminación de las raíces con el suelo mineral se procedió a cenizar cada muestra y se expresó los valores como peso seco libre de ceniza⁴⁴ (Anexo E).

⁴³ DELGADO PORTILLA, A. M. y MARTÍNEZ MELO, Y. V. Estimación y Evaluación de la biomasa y captura de carbono de Laurel de Cera (*Morella pubescens* Humb. & Bompl.ex Willd. Wilbur) en dos sistemas agroforestales en los municipios de Pasto y San Pablo, Departamento de Nariño, Tesis de grado I. AF., Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ingeniería Agroforestal, Pasto, 2006. p. 31.

⁴⁴ SCHLÖNVOIGT, A.; CHESNEY, P.; SCHSLLER, M.; y KANTEN, R. Estudios ecológicos de raíces en Sistemas Agroforestales: Experiencias metodológicas en el CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Versión 2.0. 2000. 36 p.

En cada muestra se calculó la materia seca, teniendo en cuenta la metodología de Segura y Kanninen (2002)⁴⁵, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{MS\%} = (\text{PSM}/\text{PFM}) * 100$$

MS: porcentaje de materia seca.
PSM: peso seco de la muestra (gr)
PFM: peso fresco en campo (gr).

En el cálculo del contenido de humedad, fue realizado por medio de diferencias de porcentaje de peso perdido con respecto a la muestra llevada de campo⁴⁶.

$$\text{CH\%} = \frac{\text{PFM} - \text{PSM}}{\text{PSM}} * 100$$

CH%: contenido de humedad.
PFM: peso fresco de la muestra (gr).
PSM: peso seco de la muestra (gr).

Una vez obtenida la materia seca, se calculó la biomasa multiplicando el porcentaje de materia seca por el peso fresco de las raíces (finas y gruesas) fuera de impurezas y suelo. Se aplicó la siguiente formula para encontrar la totalidad de biomasa radicular⁴⁷.

$$\text{B} = [\text{PFC} * \text{MS} (\%)] / 100$$

B: biomasa radicular (gr).
PFC: peso fresco tomado en el campo (gr).
MS(%): porcentaje de materia seca.

⁴⁵ SEGURA, M. y KANNINEN, M. Inventarios para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Eds. Orozco, L; Brumér, C. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 2002. p 202-222.

⁴⁶ JUNTA DE ACUERDO DE CARTAGENA. Manual de diseño para maderas del grupo Andino: proyectos andinos de desarrollo tecnológico en el área de los recursos forestales tropicales PADT REFORT. Lima, Perú: CARVAJAL S.A., 1984. p. 1-15.

⁴⁷ SEGURA, M. y VENEGAS, G. Tablas de volumen comercial con corteza para encino, roble y otras especies del bosque pluvial montano de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Serie Técnica No. 306. Turrialba, Costa Rica, 1999. CATIE. 46p.

4.4.1 Obtención de la fracción de carbono de las raíces.

El resultado de las muestras secas tanto de raíces finas y de raíces gruesas, se trituraron con un mortero, finamente (Figura 6) para que pase por un tamiz de 1 mm⁴⁸ y se determinó la fracción de carbono correspondiente mediante su incineración, este método para MacDicken (1997) citado por Orrego y Del Valle⁴⁹, es un método sencillo y rápido para encontrar fracciones de carbono.

4.5 Carbono almacenado.

Para estimar el carbono almacenado, se utilizó la ecuación recomendada por Ávila (2000)⁵⁰.

$$CA = B_t * FC$$

CA: carbono almacenado (Kg).
Bt: biomasa total (Kg).
FC: fracción de carbono.

⁴⁸ APRAEZ, E. El análisis químico de alimentos. Universidad de Nariño. 2000. 100 p.

⁴⁹ ORREGO, S. y DEL VALLE, J. Op., cit., p. 223.

⁵⁰ ÁVILA, G. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 2000. 99 p.

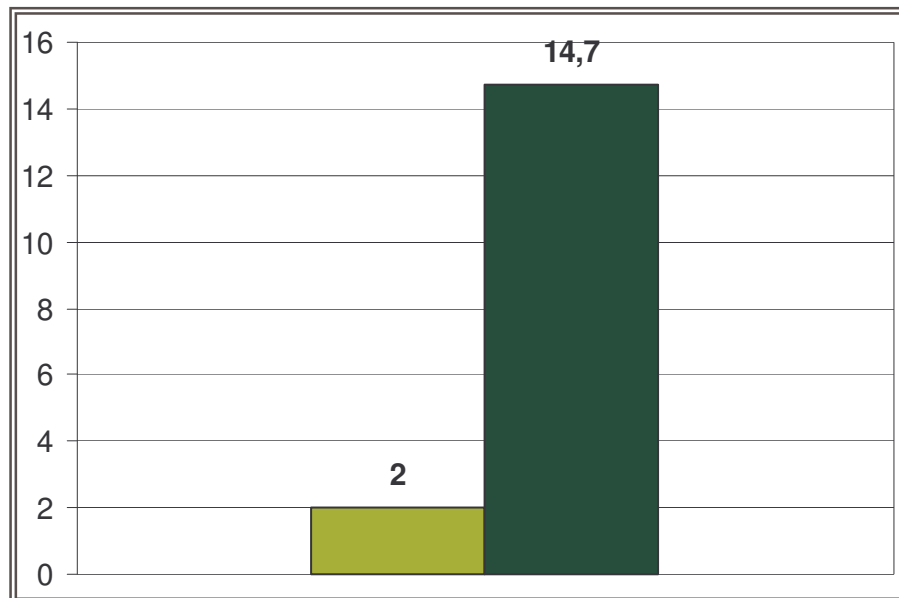
V. RESULTADOS Y DISCUSION.

Sistema silvopastoril.

5. 1 Variables evaluadas.

Los árboles implementados en cada sistema agroforestal fueron evaluados con las variables de crecimiento: diámetro a la altura del pecho, área basal, área de copa. Lo cual permitió seleccionar 17 árboles para raíces finas, y apear dos árboles para raíces gruesas, y así conocer la cantidad de carbono en los sistemas radiculares del sistema agroforestal.

Figura 7. Rangos de DAP de *Alnus jorullensis* H.B.K., en el sistema silvopastoril.



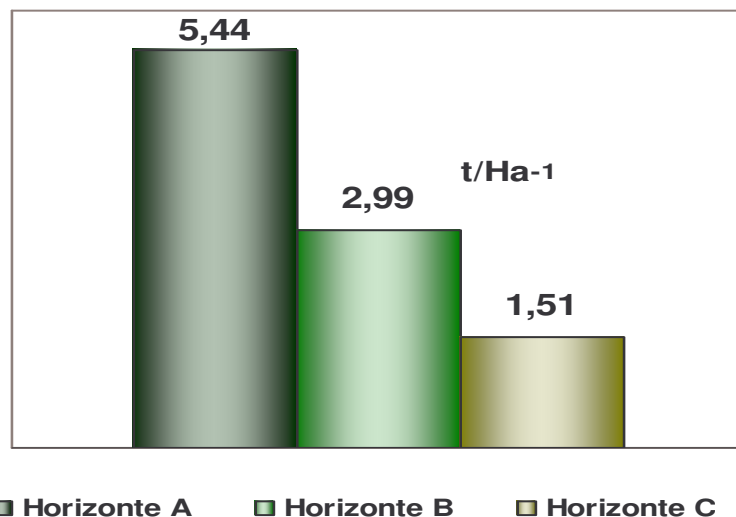
En la figura 7 se puede observar que *Alnus jorullensis* presentó un DAP de 2 y 14,7 cm., en los 57 individuos que conformaron el sistema.

En los 17 árboles seleccionados el área basal registró valores desde 415,48 m²/Ha⁻¹ hasta los 12867,96 m²/Ha⁻¹, según Saldarriaga *et al* (1988) citados por

Herrera *et al*⁵¹, el área basal aumenta con la edad. Mientras que en el área de copa (AC) el valor mas alto que se encontró fue de 2,59 m, donde fue registrado hasta un valor de 0,16 m. El parámetro evaluado área de copa se utilizó para este estudio como predictora de la biomasa total de los árboles. Se consideró la importancia de calcular y registrar cada una de estas variables al momento de ser obtenidas en campo (Anexo F), para Álvarez (1993) y Lema (1995) citados por Zapata *et al*⁵², el diámetro representa aquella variable de más fácil obtención y mayor precisión.

5.2 Estimación de la Biomasa Radicular (finas y gruesas), en *Alnus jorullensis* H.B.K en el sistema silvopastoril.

Figura 8. Toneladas de biomasa seca de raíces finas.



Horizonte A: 0-15 centímetros abajo del suelo.

B: 15-30 centímetros abajo del suelo.

C: 30-45 centímetros abajo del suelo.

⁵¹ HERRERA, M.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 151.

⁵² ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J. Op., cit., p. 105.

En cuanto a la biomasa de las raíces finas, del componente arbóreo *Alnus jorullensis* H.B.K del sistema silvopastoril, se observó que existe una mayor distribución de biomasa en raíces finas en el horizonte A con 5.44 Tn/Ha^{-1} , disminuyendo su cantidad a medida que se profundiza en los horizontes (Figura 8). Esto demuestra que la dinámica de las raíces, es alta debido en que dentro de las fases tempranas de la sucesión, crecimiento y adaptación, las plantas asignan una mayor proporción de recursos fotosintéticos al desarrollo de un potente sistema radical, en especial de raíces finas, las cuales muestran una tendencia creciente para suplir los requerimientos de agua y nutrientes⁵³.

Las raíces finas además de distribuirse principalmente en los primeros centímetros del suelo, disminuyen exponencialmente a medida que aumenta la profundidad⁵⁴, al igual que en el estudio realizado por Morales y Beer (1998)⁵⁵, quienes reportan que las raíces finas de *Eucalyptus deglupta* y *Coffea arabica* se desarrollaron bien en los estratos superficiales (58% entre 0-10) y sub-superficial (21% entre 10-20cm) del suelo y las raíces de ambas especies disminuyeron con la profundidad, mientras que en los bosques tropicales se puede encontrar en un rango entre 30 y 120 t/Ha^{-1} de biomasa radicular con promedio de $54,8 \text{ t/Ha}^{-1}$, aportando en promedio 18% de la biomasa total⁵⁶.

Por otro lado, la biomasa es importante para la fijación y almacenamiento de CO_2 y su respectiva estimación en diferentes usos de la tierra, además el CO_2 esta estrechamente relacionado con el cambio global, tal es el caso de los bosques y su relación con el ciclo del carbono. Para MacDiken (1997) citado por Andrade e Ibrahim⁵⁷, la estimación del almacenamiento de carbono en la biomasa bajo (raíces) es importante en proyectos de fijación de carbono, ya que está representa entre un 10 y 40% de la biomasa total.

⁵³ ORREGO, S. y DEL VALLE, J. Op., cit., 226 p.

⁵⁴ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., 170 p.

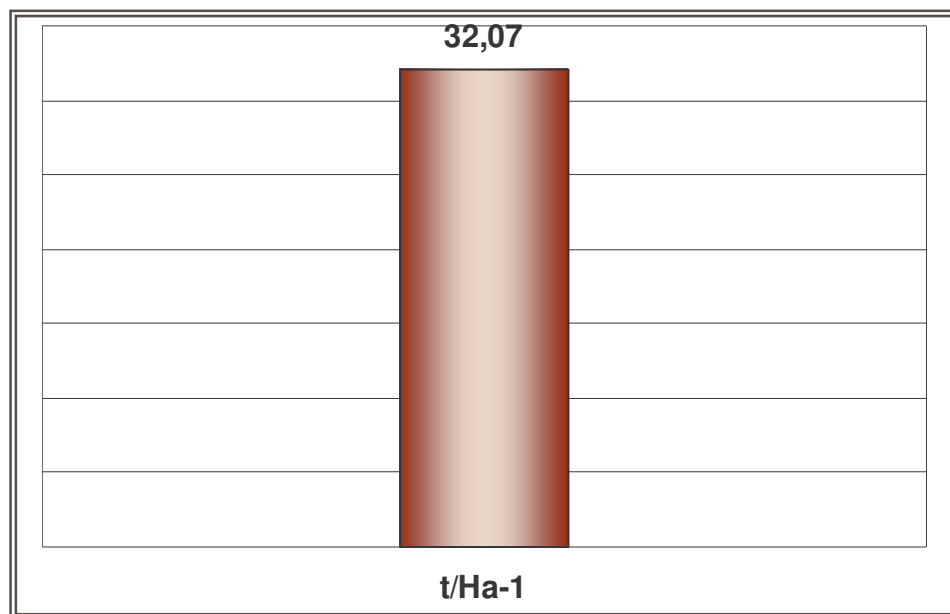
⁵⁵ MORALES, E. y BEER, J. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol. 5. Nº 17-18, 1998. 46 p.

⁵⁶ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., 170 p.

⁵⁷ ANDRADE, H. J. e IBRAHIM, M. Fijación de carbono en sistemas silvopastoriles: Una propuesta metodológica. Conferencia electrónica: Potencialidades de los Sistemas Silvopastoriles para la Generación de Servicios Ambientales (LEAD-PFI-ECONF-L) Octubre - Noviembre de 2001. [en línea], [citado, el 19 de mayo de 2006]. Disponible en Internet: <http://lead.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo5.htm>.

Además de lo anterior las raíces finas son importantes indicadores de la calidad y degradación de un suelo ya que valores inusuales de biomasa de raíces finas pueden representar condiciones extremas en las propiedades del suelo. Igualmente, para Ewel *et al* (1981), Brown & Lugo (1990) citados por Sierra *et al*⁵⁸, la biomasa de raíces finas es un importante sumidero de materia orgánica y nutrientes, pues el efecto de una perturbación no es tan severo como lo es para la biomasa aérea.

Figura 9. Toneladas de biomasa seca de raíces gruesas.



t/Ha⁻¹: Toneladas por hectárea de la biomasa seca de raíces gruesas.

La biomasa seca de las raíces es importante determinar en el momento de efectuar los cálculos que corresponden al carbono almacenado y fijado de la superficie radicular. En la figura 9, muestra que 32,07 corresponde a las toneladas por hectárea presentes en la biomasa seca de las raíces gruesas, es así para Klinge (1993), Coutts *et al* (1999) citados por Sierra *et al*⁵⁹, la importancia de la evaluación de la biomasa de las raíces gruesas, radica en que son responsables del anclaje y soporte estructural de la planta y proveen la red de conducción de sustancias asimiladas por las raíces finas.

⁵⁸ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., 181 p.

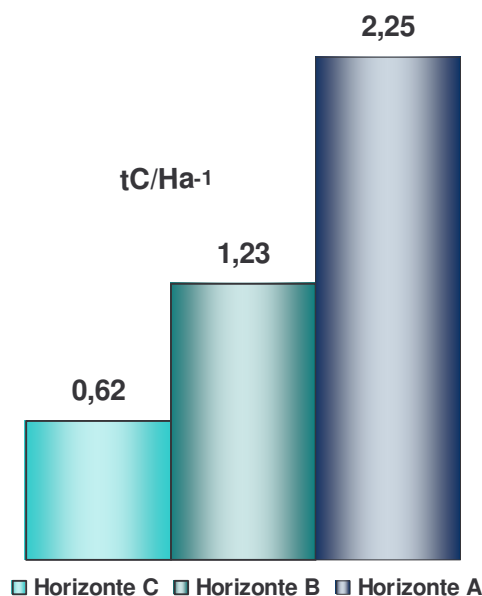
⁵⁹ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., p. 170.

5.3 Contenido de carbono en el sistema radicular de *Alnus jorullensis* H.B.K.

5.3.1 Carbono en las raíces finas.

Como se muestra en la figura 10, existe una mayor concentración de carbono en el horizonte (A), mientras que en el horizonte B y C, fijaron 1,23 y 0.62 tC/Ha⁻¹ respectivamente, al igual que en otros sistemas agroforestales han mostrado que las especies arbóreas mantienen altas concentraciones de carbono en las raíces en los primeros centímetros del suelo (20 cm), consecuentemente como lo afirman Dhyani y Tripathi (2000) citados por Oelbermann *et al* (2004)⁶⁰.

Figura 10. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces finas.



Horizonte A: 0-15 centímetros abajo del suelo.

B: 15-30 centímetros abajo del suelo.

C: 30-45 centímetros abajo del suelo.

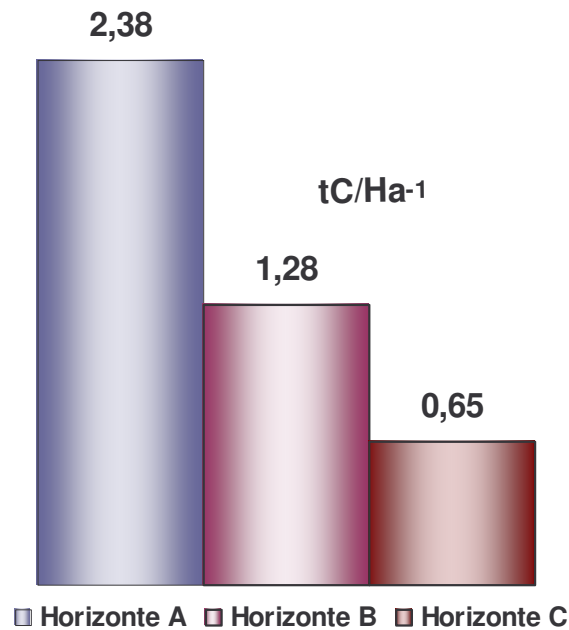
Se puede catalogar que la mayor fijación de carbono para *Alnus jorullensis* en este sistema, está concentrada en la parte superficial del suelo (0-15 centímetros), con

⁶⁰ OELBERMANN, M.; VORONEY, P. y SCHLÓNVOIGT, A. Cuantificación del carbono radicular de *Eritrina poeppigiana* de cuatro y diez años establecidos en callejones en Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, N° 41-42, 2004. 92 - 96 p.

2,25 Tn/C/Ha⁻¹, según Rao *et al* (2001) citados por Giraldo *et al*⁶¹, una de las principales razones que explica la acumulación de raíces en los primeros centímetros del suelo, es que allí se encuentra la mayor cantidad de nutrientes requeridos por la planta y por lo tanto contribuyen a la concentración de carbono en el horizonte, siendo este un importante sumidero de carbono, mientras que existe menor acumulación de carbono a medida que en los horizontes se encuentran a una mayor profundidad.

La menor cantidad de carbono en los 30-45 cm de profundidad podría ser consecuencia de un suelo pobre en nutrientes en el momento del establecimiento del árbol; al igual que en el estudio de Oelbermann *et al* (2004)⁶², donde la menor cantidad de carbono se presentó en los 20-40 cm de profundidad en los árboles de diez años a consecuencia de un suelo pobre.

Figura 11. Carbono almacenado en raíces finas.



Horizonte A: 0-15 centímetros abajo del suelo.
 B: 15-30 centímetros abajo del suelo.
 C: 30-45 centímetros abajo del suelo.

⁶¹ GIRALDO, L.; ZAPATA., *et al.* Op., cit. p. 305.

⁶² OELBERMANN, M.; VORONEY, P. y SCHLÓNVOIGT, A. Op., cit. p. 95.

El carbono almacenado en las raíces finas, para el horizonte A tiene un valor de 2,38, B 1,28 y para el horizonte C fue de 0,65 tC/Ha⁻¹, valores que resultaron altos con respecto a los que reportó Ruiz (2002)⁶³, 1.37 - 0.96 y 0.19 en un sistema silvopastoril asociado con pastos nativos en monocultivo, donde la producción de biomasa es afectada por la densidad de los árboles.

La producción primaria neta anual de las raíces puede ser una contribución importante a la dotación de carbono orgánico del suelo, gracias a la exudación y renovación de raíces finas⁶⁴, así como en el estudio reportado por Dixon *et al.*, (1994) citado por López *et al*⁶⁵, donde en un bosque, la mitad de carbono del ecosistema se encuentra en la biomasa aérea y la biomasa de raíces finas se convierte en un sumidero de materia orgánica y nutrientes Ewel *et al* (1981), Brown & Lugo (1990) citados por Sierra *et al*⁶⁶.

5.3.2 Carbono en las raíces gruesas.

En la figura 12, se muestra que en las raíces gruesas se encontró un valor de 15,64 tC/Ha⁻¹ para carbono y 5,33 tC/Ha⁻¹ para carbono almacenado, Al igual que Ávila *et al* (2001)⁶⁷, obtuvieron que el carbono almacenado fue mayor en los sistemas silvopastoriles (95 t Ha⁻¹), con respecto a las pasturas en monocultivo (68 para *brachiaria* y 84 t Ha⁻¹ para *ratana*). La localización de estas concentraciones de carbono en raíces gruesas, es debida a la compactación de los suelos que origina un medio difícil para la penetración de los sistemas radicales, aunque las raíces gruesas tienden a obtener mejores oportunidades de alcanzar mayores profundidades y capturar agua y nutrientes. Es así que la tendencia del aporte de carbono de las raíces gruesas a la biomasa total de los árboles, es siempre

⁶³ RUIZ GARCIA, A. Fijación y Almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad en Maniguas, Nicaragua. Tesis de grado Mag. Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2002. 62 p.

⁶⁴ OELBERMANN, M.; VORONEY, P. y SCHLÓNVOIGT, A. Op., cit. p. 92.

⁶⁵ LOPEZ, A.; SCHLÓNVOIGT, A.; IBRAHIM, M.; KLEINN, C.; KANNINEN, M. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol. 6. Nº 23, 1999. 52 p.

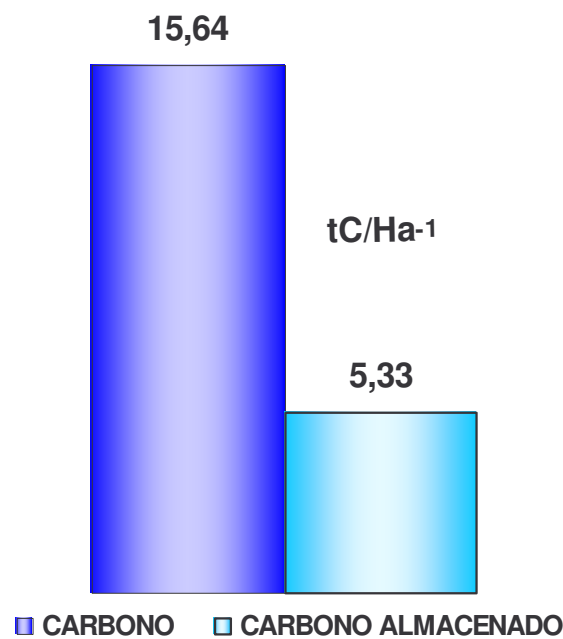
⁶⁶ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., p. 181.

⁶⁷ AVILA, G.; JIMENEZ, F.; BEER, J.; GOMEZ, M.; IBRAHIM, M. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol. 8. Nº 30, 2001. p. 34.

creciente aunque a tasas muy bajas; aporta más carbono, permitiendo así cumplir con las funciones fisiológicas y de soporte⁶⁸.

El valor del carbono almacenado encontrado en esta investigación es superior a los encontrados por Mora (2002) y Andrade (1999) citados por Ruiz⁶⁹, quienes reportaron 3.06 tC/Ha⁻¹ y 3.7 a 4.7 tC/Ha⁻¹ para un sistema silvopastoril de *A. mangium* y *E. deglupta* asociados con *B. brizantha*, *B. decumbens* y *P. maximum*, de la misma manera, Avila (2002)⁷⁰ reporto 4 tC/Ha⁻¹ en sistemas de *brizantha* en asocio con *A. mangium* y de 2.2 tC/Ha⁻¹ en *B. Brizantha* y *E. deglupta*.

Figura 12. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces gruesas.



tC/Ha⁻¹: Toneladas de Carbono por hectárea de la biomasa seca de las raíces gruesas.

⁶⁸ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., p. 176, 177.

⁶⁹ RUIZ, A. Op., cit., p. 90.

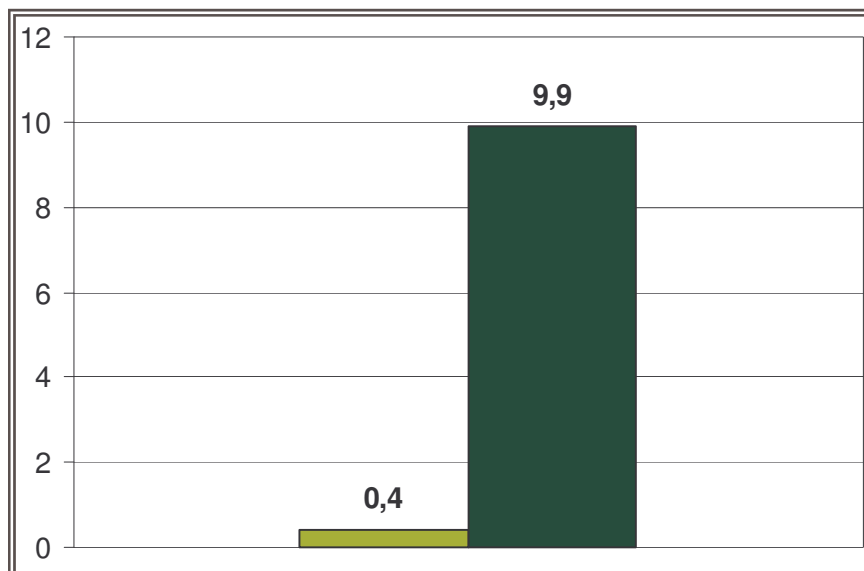
⁷⁰ ÁVILA, G. Op., cit., p. 89.

Sistema cultivo en callejones.

5. 4 Variables evaluadas.

En el sistema cultivo en callejones el área basal de los individuos oscilaron entre 78,54 y 7697,69 m²/ Ha⁻¹. Para el área de copa (AC) el valor mas alto que se encontró fue de 0,57 m, donde registro un valor hasta 0,05 m. Se debe tener en cuenta que, en sentido practico la variable área basal, área de copa, altura, entre otros, tienen los conocidos problemas por el sesgo introducido en su cuantificación en campo (Anexo G). Por lo tanto el diámetro a la altura del pecho (DAP) a sido considerado como una variable predictora, ya que representa mayor eficiencia. Overman *et al* (1994) citados por Zapata *et al*⁷¹, se refieren a la practicidad de esta variable en la medición de carbono como una de las consideraciones importantes para elegirlo.

Figura 13. Rangos de DAP de *Alnus jorullensis* H.B.K., en el sistema cultivo en callejones.



La figura 13 muestra que *Alnus jorullensis* presentó un DAP de 0,4 a 9,9 cm., para 153 individuos del sistema cultivo en callejones.

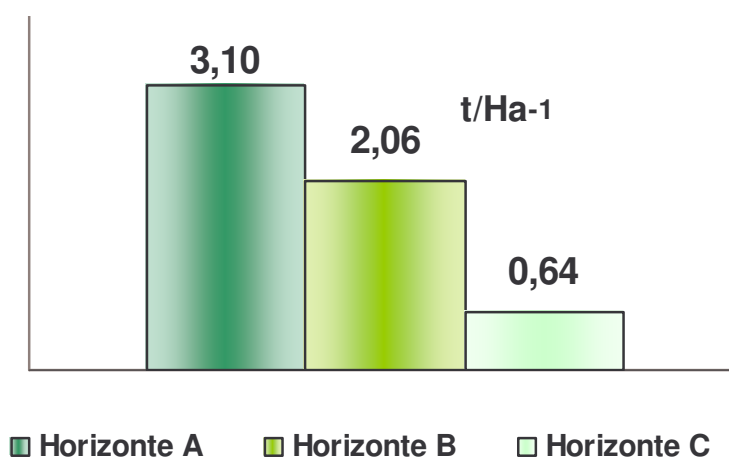
⁷¹ ZAPATA, M; COLORADO, G. y DEL VALLE, J. Op., cit., p. 107.

5.5 Estimación de la Biomasa Radicular (finas y gruesas), en *Alnus jorullensis* H.B.K en el sistema cultivo en callejones.

En la figura 14, se observa que hay mayor cantidad de biomasa en el horizonte A con un valor de 3,10 t/Ha⁻¹ seguido del horizonte B con 2,06 t/Ha⁻¹, consecuentemente con los estudios realizados por Dhyani y Tripathi (2000) citados por Oelbermann *et al*⁷², determinaron que el 70 % de toda la biomasa radicular (incluyendo raíces finas y gruesas) de un sistema cultivo en callejones en el noroeste de la india se encontraba en los 20 cm superiores de suelo.

Al igual que el sistema silvopastoril, de la granja Experimental Botana, por ser establecidos como medio de aprendizaje académico practico, se han realizado podas al *Alnus jorullensis*, razón por lo cual para el sistema cultivo en callejones, existe una tasa de aumento en la biomasa del suelo que favorece al crecimiento y desarrollo de las raíces secundarias y primarias. Las podas frecuentes permiten el reciclaje de algunos elementos principales tales como el nitrógeno del mismo árbol, y por tal razón puede producir mayor cantidad de biomasa durante un año (en el periodo que incluye varias podas)⁷³.

Figura 14. Toneladas de biomasa seca de raíces finas .



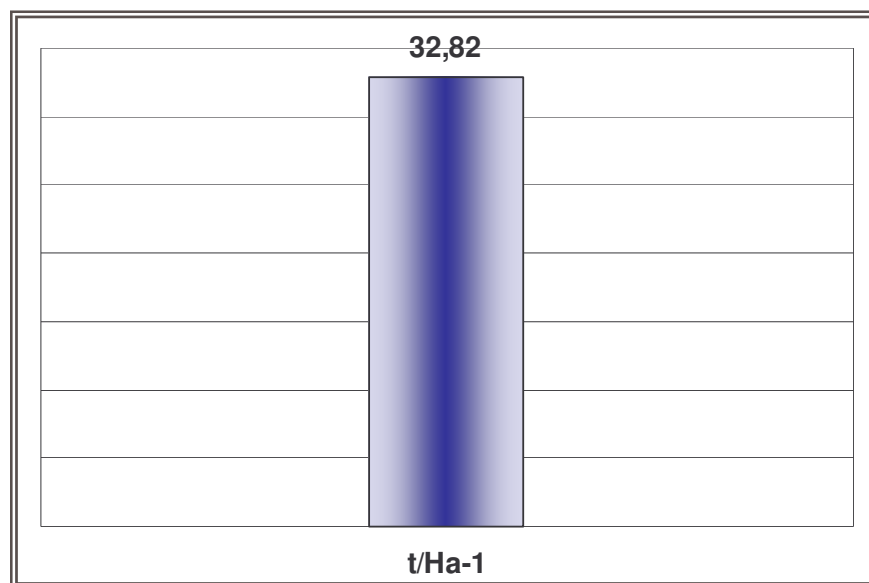
⁷² OELBERMANN, M.; VORONEY, P y SCHLÖNVOIGT, A. Op., cit. p. 94.

⁷³ CHESNEY, P.; SCHLÖNVOIGT, A.; KASS, D.; VLEK, P. y MURACH, D. Respuestas de las raíces finas y acumulación de nitrógeno en el follaje de *Erythrina poeppigiana* después de podas parciales o completas. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol 8. N° 30, 2001. p. 48-51.

Oelbermann *et al* (2004)⁷⁴ afirman en el estudio realizado de *Erythrina* de 4 y 10 años establecido en callejones existe un alto desarrollo y concentración de biomasa radicular, debido a las necesidades de explotación de los nutrientes por lo que se explica que el *Alnus jorullensis*, presenta diferencias en la cantidad de biomasa en cada horizonte evaluado, ya que estas se especializan en la consecución de diferentes elementos nutricionales disponibles en el suelo.

Para el sistema cultivo en callejones, se encontraron una densidad de 79 árboles de *Alnus jorullensis*, asociados con otras especies, con lo que se puede determinar que si existiera una densidad de 333 árboles por hectárea se podrían encontrar valores de 13,07 - 8,67 y 2,69 t/Ha⁻¹ de biomasa radicular para cada horizonte (A, B, C).

Figura 15. Toneladas de biomasa seca de raíces gruesas.



En la figura 15, el valor de 32,82 corresponde a las toneladas por hectárea de la biomasa seca presente en las raíces gruesas, fueron valores que resultaron

⁷⁴ OELBERMANN, M.; VORONEY, P. y SCHLÓNVOIGT, A. Op., cit. p. 95.

menores con los reportados por Arias *et al* (2001)⁷⁵, en *Gliricidia sepium* en el donde aparentemente, el incremento en la altura de las plantas tiene un mayor efecto sobre la fijación de carbono que el aumento de la densidad de las plantas. Para Jenik (1991), Cassel & Lal (1992) citados por Sierra *et al*⁷⁶, si existe una mayor proporción de raíces gruesas se mejorará las condiciones de aireación del suelo, constituyendo un factor importante para el desarrollo de los sistemas radicales. La biomasa de raíces aporta entre 20 y 40% de la biomasa almacenada en el compartimiento aéreo. Igualmente, la recuperación de la biomasa aérea en el proceso sucesional se debe, en gran medida, al efecto de las raíces sobre las propiedades del suelo.

Pimentel *et al* (1992) citados por Forero y Chacon⁷⁷, afirman que la importancia de la biomasa radica en el aporte que puede dar para la sustentabilidad en sistemas tanto naturales como agropecuarios y agroforestales, además puede ayudar a contrarrestar la erosión, disminuir la escorrentía y contribuye a aumentar la cantidad de nutrientes y materia orgánica del suelo.

Para Malhi y Grace (2000), Ciesla (1996) y Snowdon *et al* (2001) citados por Arreaga⁷⁸, los estudios de biomasa son esenciales para obtener un aproximado de la cantidad de carbono almacenado, ya que de acuerdo con varios autores, la relación de la biomasa seca total con el carbono es de aproximadamente 2:1.

5.6 Contenido de carbono de la biomasa radicular.

5.6.1 Carbono en las raíces finas.

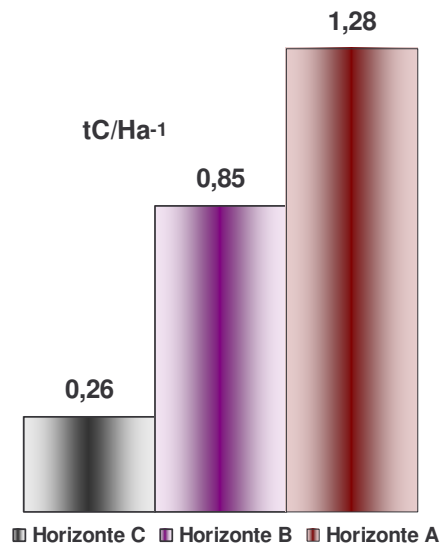
⁷⁵ ARIAS, K.; RUIZ, C.; MILLA, M.; MESSA, H. y ESCOBAR, A. Almacenamiento de carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales de Yaracuy, Venezuela. [en línea]. CIPAV, 2001 [citado, el 19 de abril de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd13/5/ruiiz135.htm>.

⁷⁶ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., p. 177, 183.

⁷⁷ FORERO, L. A. y CHACON, M. Comparación de la biomasa en diferentes agrosistemas, plantaciones forestales y ecosistemas naturales. Curso Sistemas Agroforestales en Cultivos Perennes. CATIE, Costa Rica, 2002. 15 p.

⁷⁸ ARREAGA GRAMAJO, W. E. Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la reserva Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis de grado Mag. Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2002. p. 73.

Figura 16. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces finas.



Como se muestra en la figura 16, en el sistema cultivo en callejones la mayor cantidad de carbono en las raíces finas se presentó en el horizonte A (0-15 cm), con un valor de 1,28 tC/Ha⁻¹ y la menor cantidad de carbono en las raíces finas la registra el horizonte C que tiene una profundidad de 30-45 cm, con 0.26 tC/Ha⁻¹.

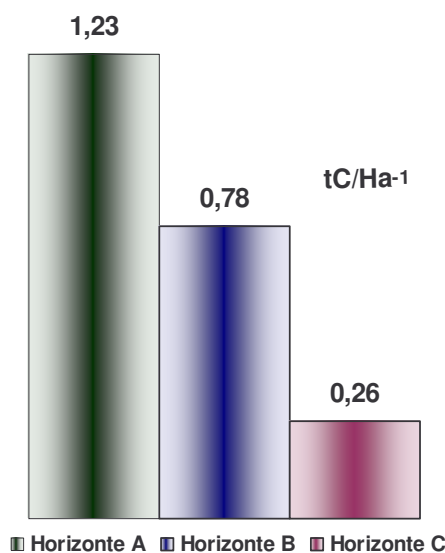
Para Lambers & Poorter (1992) citados por Sierra *et al*⁷⁹, la localización de carbono en las raíces varía según las condiciones ambientales y el déficit de recursos. La compactación del suelo genera un déficit de recursos para los árboles que les obliga a localizar una mayor cantidad de fotoasimilados en las raíces gruesas.

El bajo contenido de carbono en el sistema cultivo callejones se debe a la competencia radicular por la diversidad de componentes que existen, hace que se limite el desarrollo de los mismos, creando así un desarrollo radicular muy bajo por las especies en asocio, las cuales se especializan en crecimiento acorde a las circunstancias del medio que le favorezcan.

⁷⁹ SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., p. 177.

Por otra parte el “manejo de raíces” del componente arbóreo puede reducir la competencia con los cultivos cuando están en asocio. Así como lo afirma Yocum (1997) citado por Schaller *et al*, en un estudio donde demostró que la presencia del sistema radicular del maíz, el cual es relativamente competitivo, restringía el desarrollo lateral y aumentaba el desarrollo vertical de las raíces del manzano. Al igual que en el efecto de las gramíneas sobre la distribución de las raíces de los árboles fue también demostrado por Alkinson *et al* citados por Schaller *et al*⁸⁰.

Figura 17. Carbono almacenado en raíces finas.

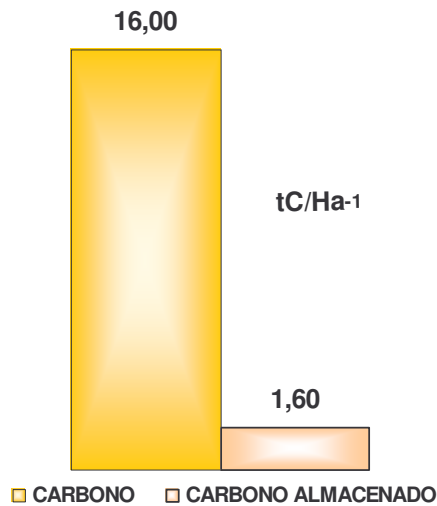


En la figura 17 se puede observar que el carbono almacenado en el sistema cultivo en callejones correspondiente a las raíces finas fue de 1,23 tC/Ha⁻¹ en el horizonte A y un valor de 0.26 tC/Ha⁻¹ para el horizonte C. La diferenciación por profundidad se realizó para tener una idea preliminar de la contribución que hacen las raíces por horizonte a la acumulación total de carbono.

⁸⁰ SCHALLER, M; SCHROTH, Goetz; BEER, J y JIMENEZ, F. Control del crecimiento lateral de las raíces de especies maderables de rápido crecimiento utilizando gramíneas como barreras biológicas. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol 6. N° 23, 1999. p. 36-38.

5.6.2 Carbono en las raíces gruesas.

Figura 18. Toneladas de carbono en la biomasa seca de raíces gruesas.

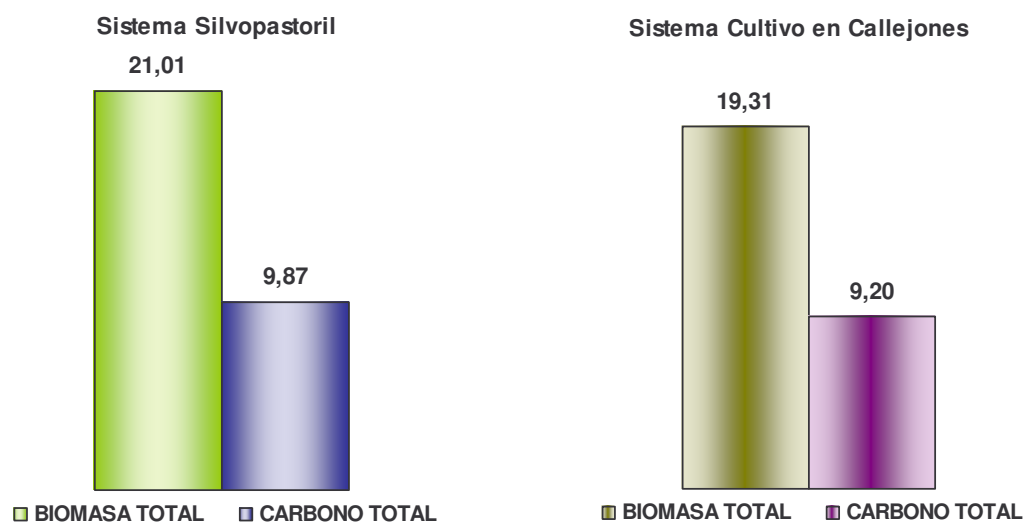


La figura 18, muestra el carbono total con un valor de 16 tC/Ha^{-1} y el valor de carbono almacenado fue de $1,60 \text{ tC/Ha}^{-1}$ para raíces gruesas esta variación es muy alta, en comparación con lo registrado por Kass (1987) citado por Guerrero y Hernández⁸¹, asumiendo un aporte significativo de carbono acumulado en las raíces en un sistema agroforestal, el sistema cultivo en callejones almacena permanentemente entre 1 y $2,3 \text{ tC/Ha}^{-1}$.

⁸¹ GUERRERO, D. y HERNÁNDEZ, J. Op., cit., p 48.

5.7 Comparación de los Sistemas Agroforestales.

Figura 19. Biomasa y carbono total presente en los dos sistemas agroforestales.



Biomasa: t/Ha⁻¹: Toneladas de Biomasa Radicular Total.

Carbono: tC/Ha⁻¹: Toneladas de Carbono por hectárea de la Biomasa radicular total.

En cuanto a la biomasa radicular (rf-rg), como se observa en la figura 19, se aprecia que hay mayor cantidad de biomasa radicular, en el sistema silvopastoril en comparación con el sistema cultivo en callejones, esta variación radica en la edad de los sistemas (nueve y siete años respectivamente) puesto que se han desarrollado en diferentes épocas, además está influenciado por factores edáficos y climáticos Sanford & Cuevas (1996), Brown (1997) citados por Sierra *et al*⁸². Según Dixon citado por Andrade e Ibrahim⁸³, las condiciones climáticas es un factor importante, de esta forma la biomasa de raíces representa el 10% de la biomasa sobre el suelo en áreas húmedas y cerca del 30% en áreas semiáridas.

Existe una mayor concentración de carbono en raíces gruesas en los dos sistemas evaluados, debido a las estructuras que la conforman y mayormente a la función que desempeñan. Los resultados de encontrar la mayor cantidad de carbono en el sistema silvopastoril, es debida a que las raíces de *Alnus* han explorado

⁸² SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Op., cit., p. 171.

⁸³ ANDRADE, H. e IBRAHIM, M. Op., cit., 114 p.

horizontes más profundos del suelo, que se debe posiblemente a las condiciones mejoradas del suelo, y a la escasa o nula existencia de competencia con los árboles establecidos dada sus amplias distancias de siembra (altamente dispersos) y con el crecimiento de los pastos asociados⁸⁴.

Para carbono total de la biomasa radicular en *Alnus jorullensis*, como se observa en la figura 19, el sistema silvopastoril almacena un valor promedio de carbono 9,87 tC/Ha⁻¹ y en el sistema cultivo en callejones 9,20 tC/Ha⁻¹, dichos resultados, muestran que existe 0,67 toneladas de diferencia para *Alnus*, esto permite establecer que la edad de los dos sistemas agroforestales están directamente relacionadas con la tasas de fijación de carbono, así como también la composición diamétrica de estos sistemas y su densidad de árboles. Como lo afirman Mora (2002) y Andrade (1999) citados por Ruiz⁸⁵, donde la densidad de árboles y su edad generan diferencias de resultados en evaluaciones de cuantificación de carbono.

⁸⁴ OELBERMANN, M.; VORONEY, P. y SCHLÓNVOIGT, A. Op., cit. p. 95.

⁸⁵ RUIZ, A. Op., cit., p. 94.

CONCLUSIONES

En las raíces finas la biomasa para *Alnus jorullensis* presentan un alto desarrollo en los primeros centímetros del suelo, que permite establecer mayores concentraciones de carbono y fijación en el mismo.

La biomasa de las raíces gruesas para *Alnus jorullensis* genera una alta concentración de carbono en comparación con la biomasa de raíces finas, lo cual su diferencia radica en la elaboración de la ramificación que permiten el anclaje, soporte de los componentes y proveen la red de conducción de sustancias asimiladas por las raíces finas hacia la biomasa aérea.

El carbono acumulado de las raíces finas en las tres profundidades evaluadas (0-15, 15-30 y 30-45 cm) en cada sistema agroforestal permiten determinar que su existencia, es influenciada por las condiciones edáficas y atmosféricas del sitio.

En los dos sistemas agroforestales evaluados (sistema silvopastoril y en el sistema cultivo en callejones), existió una mayor concentración de carbono en el sistema silvopastoril, en donde la especie *Alnus jorullensis* fue influenciada en su desarrollo radicular, por la edad de establecimiento y la disposición en distancias de siembra mas amplias, en comparación con el sistema cultivo en callejones.

La diferenciación por profundidad del muestreo, para determinar biomasa y porcentajes de concentración de carbono, contribuyen en el conocimiento de la biología del suelo, ya que permite establecer el aporte de materia orgánica y sumidero de carbono, que puede provenir de sus raíces.

La metodología aplicada para determinación de carbono almacenado en la biomasa radicular, en comparación con la biomasa aérea, no generó alta perturbación, permitiendo que dentro de la fisiología radicular pueda recuperarse fácilmente.

RECOMENDACIONES

Realizar la estimación del carbono de todos sus componentes y el total presente en el suelo, para los sistemas agroforestales: sistema silvopastoril y sistema cultivo en callejones, con el fin de generar información de la evaluación total y la comparación del carbono almacenado.

Diseñar modelos alométricos de la biomasa radicular y área de la especie *Alnus jorullensis* en estos sistemas agroforestales.

Realizar estudios de carbono en cada uno de los componentes del sistema silvopastoril en cuanto a las gramíneas asociadas con *Alnus jorullensis*, con el fin de determinar el aporte de carbono secuestrado por el sistema.

Evaluar la cantidad de biomasa radicular de otros componentes que están en asocio con *Alnus jorullensis* en el sistema cultivo en callejones, con el fin de determinar posibles existencias de competencia interespecifica.

Generar estos estudios de carbono, de la biomasa radicular en especies multipropósito nativos propios del departamento, para cuantificar la biomasa radicular y el almacenamiento de carbono, logrando una mejor comprensión del aporte de cada una de las especies.

Establecer las relaciones de competencia por recursos del suelo (fundamentalmente, nutrientes y agua) entre las diferentes especies que coexisten dentro de los sistemas agroforestales sistema silvopastoril y sistema cultivo en callejones, para apoyar en la toma de decisiones con respecto a su manejo.

Generar estudios de las dinámicas del carbono en sistemas agroforestales clasificados por edades (tratamientos), para entender los procesos de cambio, almacenamiento y fijación del carbono.

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, H. e IBRAHIM, M. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas Silvopastoriles? En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica. Vol. 10 N° 39-40. 2003. 109 -116 p.

ANDRADE, H. J. y IBRAHIM, M. Fijación de carbono en sistemas silvopastoriles: Una propuesta metodológica. Conferencia electrónica: Potencialidades de los Sistemas Silvopastoriles para la Generación de Servicios Ambientales (LEAD-PFI-ECONF-L) Octubre - Noviembre de 2001. [citado, el 19 de mayo de 2006]. Disponible en Internet: <http://lead.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo5.htm>.

AÑAZCO, M. El Aliso (*Alnus acuminata*). Quito, Ecuador: Proyecto Desarrollo Forestal Campesino en los Andes del Ecuador, 1996. 116 p.

APRAEZ, E. El análisis químico de alimentos. Universidad de Nariño. 2000. 100 p.

ARÉVALO, L. Definición y clasificación de sistemas agroforestales. ICRAF, s.l. 2002.

ARREAGA GRAMAJO, W. E. Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la reserva Biosfera Maya, Petén , Guatemala. Tesis de grado Mag. Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2002. p. 73.

ARIAS, K.; RUIZ, C.; MILLA, M.; MESSA, H. y ESCOBAR, A. Almacenamiento de carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales de Yaracuy, Venezuela. [en línea]. CIPAV, 2001 [citado, el 19 de abril de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd13/5/ruiz135.htm>.

ÁVILA, G. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 2000. 99 p.

AVILA, G.; JIMENEZ, F.; BEER, J.; GOMEZ, M.; IBRAHIM, M. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol. 8. N° 30, 2001. 32 - 35 p.

- CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA. Silvicultura de especies promisorias para producción de leña de América Central. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1992. p. 49.
- CORPOICA NACIONAL DE INVESTIGACION Y FOMENTO FORESTAL. Guías técnicas sobre sistemas forestales y agroforestales. Bogota: CONIF, 1998. 135 p.
- CHESNEY, P.; SCHLÖNVOIGT, A.; KASS, D.; VLEK, P. y MURACH, D. Respuestas de las raíces finas y acumulación de nitrógeno en el follaje de *Erythrina poeppigiana* después de podas parciales o completas. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol 8. N° 30, 2001. 66 p.
- DELGADO, D. Bases ecológicas para el manejo de los recursos naturales: Cambio global antropogénico. 2001. 30 p.
- DELGADO PORTILLA, A. M. y MARTINEZ MELO, Y. V. Estimación y Evaluación de la biomasa y captura de carbono de Laurel de Cera (*Morella pubescens* Humb. & Bompl.ex Willd. Wilbur) en dos Sistemas agroforestales en los municipios de Pasto y San Pablo, Departamento de Nariño, Tesis de grado I. AF., Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ingeniería Agroforestal, Pasto, 2006. 91 p.
- DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ORREGO, S. Los bosques tropicales y su contribución a la mitigación del cambio climático. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 3 - 43.
- DIXON, R. K. Sistemas agroforestales y gases invernadero. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol 2. N° 7, 1995. p. 22-36.
- DURAN VELEZ, Y. Sistemas Agroforestales. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). 2000. 148 p.
- FORERO, L. A. y CHACON, M. Comparación de la biomasa en diferentes agrosistemas, plantaciones forestales y ecosistemas naturales. Curso Sistemas Agroforestales en Cultivos Perennes. CATIE, Costa Rica, 2002. p 15.
- FUNDACION SOLAR. Elementos técnicos para inventarios de Carbono. Guatemala. 2000. 35 p.
- GIRALDO, L.; ZAPATA, M.; NARANJO, J.; MONTOYA, E.; CUARTAS, C.; BOTERO, A. y ARIAS, L. Estimación de las existencias de carbono en el sistema silvopastoril *Acacia decurrens* con *Pennisetum clandestinum*. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono

en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 297 - 310.

GLOBALTREES. Listado de las especies de lista roja final con sinónimos. [en línea]. Globaltrees, 2005 [citado, el 4 de junio de 2006]. Disponible en Internet: <http://www.globaltrees.org/download/anexos>.

GUERRERO PEREZ, D. M. y HERNANDEZ BARRERO, J. J. Establecimiento de arreglos agroforestales como parcelas permanentes para evaluación y monitoreo de secuestro de carbono con participación de la comunidad de la Microcuenca Cabrera Cuenca Alta del Río Pasto, Municipio de Pasto, Departamento Nariño, Tesis de grado I. AF., Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ingeniería Agroforestal, Pasto, 2006. 111 p.

HERRERA, M.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 145 - 167.

JUNTA DE ACUERDO DE CARTAGENA. Manual de diseño para maderas del grupo Andino: proyectos andinos de desarrollo tecnológico en el área de los recursos forestales tropicales PADT REFORT. Lima, Perú: CARVAJAL S.A., 1984. p. 1-15.

KÜRSTEN, E. y BURSCHEL, P. CO₂ mitigation by agroforestry. Revista Water, Air and Soil Pollution. 1993.

LOPEZ, A.; SCHLÓNVOIGT, A.; IBRAHIM, M.; KLEINN, C.; KANNINEN, M. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol. 6. N° 23, 1999. 52 p.

MILAGRO LEÓN, E. Sistemas Agroforestales. PNR: Plan Nacional de Rehabilitación. INDERENA. Bogota. 1993. 136 p.

_____. Modelos alométricos para estimación de la biomasa aérea y el almacenamiento de carbono de *Terminalia amazonia*, en Puntarenas, Costa Rica. 11 p.

MONTAGNINI, F. *et al.* Sistemas agroforestales; principios y aplicaciones en los trópicos. 2ª. Edición, San José de Costa Rica, 1992. 624 p.

MORALES, E. y BEER, J. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol. 5. N° 17-18, 1998. 46 p.

MORALES RIOS, E. A. Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales. En: Simposio Internacional "Posibilidades de Manejo Forestal Sostenible en América Tropical". CATIE. Turrialba, Costa Rica. 2000. 11 p.

OELBERMANN, M.; VORONEY, P.; SCHLÓNVOIGT, A. Cuantificación del carbono radicular de *Eriitina poeppigiana* de cuatro y diez años establecidos en callejones en Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, N° 41-42, 2004. 92 - 96 p.

ORREGO, S. y DEL VALLE, J. Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 215 - 241.

ORTIZ GUERRERO, A. M. y RIASCOS CHALAPUD, L. D. Almacenamiento y Fijación de carbono del Sistema agroforestal Cacao *Theobroma cacao* L. y Laurel *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavon) Oken en la Reserva Indígena de Salamanca, Costa Rica, Tesis de grado I. AF., Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ingeniería Agroforestal, Pasto, 2006. 111 p.

PARENT, G. Guía de reforestación. Bucaramanga, Colombia: CDMB, 1989. 244 p.

RESTREPO, D.; BENJUMEA, J.; ORREGO, S.; DEL VALLE, J. y MORENO, F. Ecuaciones de biomasa para palmas del subdosel y sotobosque. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 121 - 143.

RUIZ GARCIA, A. Fijación y Almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad en Maniguas, Nicaragua. Tesis de grado Mag. Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2002. 106 p.

SCHALLER, M.; SCHROTH, G.; BEER, J. y JIMENEZ, F. Control del crecimiento lateral de las raíces de especies maderables de rápido crecimiento utilizando

gramíneas como barreras biológicas. En: Agroforestería en las Américas (CATIE), Turrialba, Costa Rica, Vol 6. N° 23, 1999. 88 p.

SCHLÖNVOIGT, A., CHESNEY, P., SCHLLER, M., KANTEN, R. Estudios ecológicos de raíces en Sistemas Agroforestales: Experiencias metodológicas en el CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Versión 2.0. 2000. 36 p.

SEGURA, M. y KANNINEN, M. Inventarios para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. In. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Eds. Orozco, L; Brumér, C. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 2002. p 202-222.

SEGURA, M. y VENEGAS, G. Tablas de volumen comercial con corteza para encino, roble y otras especies del bosque pluvial montano de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Serie Técnica No. 306. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 1999. 46 p.

SEMARNAP. Dirección de programas regionales. Especies con usos no maderables en Bosques Tropicales y Subtropicales. [Citado el 15 de diciembre de 2006]. Disponible en Internet: http://www.semarnat.gob.mx/pfnm2/fichas/alnus_jorullensis.htm.

SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 169 - 188.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Sede Palmira. Memorias Seminario Huertos Habitacionales Agroforestales. Secretaria de Agricultura y Pesca del Valle del Cauca. Junio 20 de 2003. 101 p.

ZAPATA, M; COLORADO, G. y DEL VALLE, J. Ecuaciones de biomasa aérea para bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J.; MORENO, F. y ARBELÁEZ, T. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. 2003. p. 87 - 120.

ANEXOS

Anexo A. Formulario de registro.

REGISTRO DE CAMPO DE LA ESPECIE: <i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.		Nº ARBOL:
Fecha: Sistema Agroforestal: *Características del SAF:		
Variable	Medición	**Observaciones
DAP (1,30 m)		
Area Basal (m2)		
Diametro Copa 1 (m)		
Diametro Copa 2 (m)		
<small>* Especies con las que este asociado, condiciones del sitio, etc. ** Aspectos fitosanitarios de la especie, tipo de manejo de la especie: podas, raleos, etc.</small>		

Anexo B. Clases diamétricas para los dos sistemas agroforestales.

Clase Diamétrica entre	Media Aritmética	No Árboles por clase	Árboles seleccionados al azar
0 - 1,9	1,36	32	
2 - 2,9	2,51	49	
3 - 3,9	3,37	42	
4 - 4,9	4,41	33	
5 - 5,9	5,42	11	38
6 - 6,9	6,52	10	
7 - 8,9	8,08	14	
9 - 9,9	9,61	6	
10 - 14,7	12,3	13	

Anexo C. Características físicas y químicas del suelo del sistema silvopastoril árboles dispersos.

ELEMENTOS ANALIZADOS	VALOR		
	1	2	3
pH, Potenciómetro (1:2)	5.4	5.2	5.2
Materia Orgánica %	8.3	6.0	6.5
Densidad Aparente (g/cc)	0.9	0.9	0.9
Carbono Orgánico %	4.84	3.48	3.79
Nitrógeno Total %	0.35	0.26	0.29
Fósforo (P) Bray II (ppm)	14	15	12
C.I.C. (meq/100 g suelos)	31.8	27.4	27.8
Ca de Cambio (meq/100 g suelos)	8.3	7.2	6.0
Mg (meq/100 g suelos)	2.6	1.9	1.7
K (meq/100 g suelos)	1.08	0.44	0.37
Al (meq/100 g suelos)	0.10	0.30	0.30
Hierro (DTPA-ppm)	190	204	188
Manganeso (DTPA-ppm)	16.00	10.20	8.20
Cobre (DTPA-ppm)	1.76	1.70	1.82
Zinc (DTPA-ppm)	2.46	2.52	1.64
Boro Extracción con agua caliente (ppm)	0.21	0.18	0.14
S Ca (H ₂ PO ₄) ₂ 0.008 M (ppm)	7.62	5.26	5.26

(*) Laboratorios Especializados Universidad de Nariño.

Anexo D. Características físicas y químicas del suelo del sistema cultivo en callejones.

ELEMENTOS ANALIZADOS	VALOR		
	1	2	3
pH, Potenciómetro (1:2)	5.1	5.5	5.4
Materia Orgánica %	7.8	4.0	4.1
Densidad Aparente (g/cc)	1.0	1.1	1.0
Carbono Orgánico %	4.55	2.32	2.37
Nitrógeno Total %	0.33	0.19	0.19
Fósforo (P) Bray II (ppm)	14	13	17
C.I.C. (meq/100 g suelos)	24.2	19.8	21.2
Ca de Cambio (meq/100 g suelos)	7.6	6.9	6.7
Mg (meq/100 g suelos)	2.1	2.3	2.2
K (meq/100 g suelos)	0.45	0.27	0.34
Al (meq/100 g suelos)	0.10	*	*
Hierro (DTPA-ppm)	238	222	220
Manganeso (DTPA-ppm)	18.2	12.80	11.40
Cobre (DTPA-ppm)	3.04	2.40	3.10
Zinc (DTPA-ppm)	5.80	2.80	5.20
Boro Extracción con agua caliente (ppm)	0.21	0.13	0.18
S Ca (H ₂ PO ₄) ₂ 0.008 M (ppm)	10.46	3.70	3.01

(*) Laboratorios Especializados Universidad de Nariño.


Anexo E. Resultados de Laboratorio.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
SECCIÓN DE LABORATORIOS
LABORATORIO DE BROMATOLOGÍA

Fecha recepción: Junio 5 de 2006 **Análisis:** 5786-5795
Fecha entrega : Junio 16 de 2006
Muestra : Raíces Aliso. Total: 10 muestras
Procedencia: Granja Experimental Botana
Análisis : Carbono

MUESTRA	% CARBONO B.S.	% M.S.T.
1. Raíces finas	39.75	92.18
2. Raíces finas	37.82	93.42
3. Raíces finas	40.48	92.34
4. Raíces finas	43.78	92.12
5. Raíces finas	42.61	91.20
6. Raíces finas	43.04	91.61
7. Raíces gruesas	48.95	91.90
8. Raíces gruesas	45.65	90.95
9. Raíces gruesas	48.67	90.84
10. Raíces gruesas	51.71	89.70

Observaciones: Carbono determinado por incineración en mufla


Gloria Sandra Espinosa Narváez
Tec. Quim. Lab. Bromatología

Anexo F. Variables dasométricas evaluadas en 17 árboles de *Alnus jorullensis* en el sistema silvopastoril, Granja Experimental Botana.

Nº ARBOL	DAP (cm)	AREA BASAL (m²/ Ha-1)	AREA DE COPA (m)
1	2,3	415,48	0,25
2	2,7	572,56	0,16
3	3,6	1017,88	0,24
4	4,6	1661,90	0,46
5	5,7	2551,76	0,69
6	6,1	2922,47	0,69
7	6,8	3631,68	0,73
8	6,8	3631,68	1,13
9	7	3848,45	0,61
10	8,2	5281,02	1,66
11	9,1	6503,88	2,20
12	9,9	7697,69	2,46
13	11	9503,32	1,71
14	11	9503,32	1,45
15	12,8	12867,96	2,59
16	12,8	12867,96	2,35
17	12,8	12867,96	2,10

Anexo G. Variables dasométricas evaluadas en 17 árboles de *Alnus jorullensis* en el sistema cultivo en callejones, Granja Experimental Botana.

Nº ARBOL	DAP (cm)	AREA BASAL (m²/ Ha-1)	AREA DE COPA (m)
1	1	78,54	0,13
2	1,5	176,71	0,13
3	2,3	415,48	0,10
4	2,7	572,56	0,29
5	2,7	572,56	0,25
6	3,2	804,25	0,38
7	3,2	804,25	0,05
8	3,2	804,25	0,31
9	3,6	1017,88	0,35
10	3,6	1017,88	0,44
11	4,2	1385,44	0,35
12	4,2	1385,44	0,25
13	4,6	1661,90	0,39
14	6,8	3631,68	0,57
15	6,8	3631,68	0,40
16	9,1	6503,88	0,12
17	9,9	7697,69	0,12