
**A
L
I
A
N
Z
A**



**U.D.C.A.
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
APLICADAS Y AMBIENTALES**



**CORPORACION COLOMBIANA DE
INVESTIGACION AGROPECUARIA**



**ESCUELA DE FORMACIÓN DE
INVESTIGADORES Y CAPACITACION
EN AGRICULTURA TROPICAL**

MAESTRIA EN AGROFORESTERIA TROPICAL

**APORTES A LA REHABILITACION ECOSISTEMICA DE AREAS RIPARIAS CON
ENFASIS EN CALIDAD DE SUELOS Y PRODUCCION DENDROENERGETICA
POR MEDIO DE ARREGLOS AGROFORESTALES EN ZONAS GANADERAS DEL
PIEDEMONTE LLANERO**

**Por
Albert Julesmar Gutiérrez Vanegas**

Villavicencio - Meta

2014

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y APLICADAS

U.D.C.A

Facultad de Ingeniería Agronómica

CORPORACION COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA

CORPOICA

Escuela De Formación de Investigadores y Capacitación en Agricultura Tropical

EFICAT

**APORTES A LA REHABILITACION ECOSISTEMICA DE AREAS RIPARIAS CON
ENFASIS EN CALIDAD DE SUELOS Y PRODUCCION DENDROENERGETICA
POR MEDIO DE ARREGLOS AGROFORESTALES EN ZONAS GANADERAS DEL
PIEDEMONTES LLANERO**

Trabajo de Investigación presentado como requisito
para optar por el grado de:

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical

Presentado Por

ALBERT JULESMAR GUTIERREZ VANEGAS

Villavicencio - Meta

2014

CONSTANCIA APROBATORIA

El presente documento ha sido, debidamente revisado y evaluado de acuerdo a las normas establecidas por la Universidad, para validar el rigor y validez científica de los planteamientos y conclusiones en el reflejadas, de tal manera que el mismo es aprobado por el Comité de Maestrías, en calidad requisito parcial para optar al título de:

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical

FIRMANTES:



GERMAN ANZOLA MONTERO

Rector y Presidente del Comité de Maestrías U.D.C.A



EDGAR ALMANSA MANRIQUE

Director del trabajo de investigación



LUIS HERNANDO ESTUPIÑAN

Codirector del trabajo de investigación



PIEDAD CECILIA ZAPATA ARANGO

Jurado evaluador



LORETA ROSSELLI SANMARTIN

Jurado evaluador

AGRADECIMIENTOS

El autor se permite plasmar en este documento sus más sentidos agradecimientos a:

La Alianza U.D.C.A – CORPOICA, por la formación académica y el apoyo brindado durante la realización de este proyecto.

Al Centro de Investigación CORPOICA La Libertad y al Área de Sostenibilidad en Agroenergía- ASA (CORPOICA- ECOPETROL) por apoyar la implementación, ejecución, procesamiento y seguimiento de los ensayos en campo, necesarios para este trabajo.

A la memoria del Doctor Jaime Triana Restrepo, por creer en mí y brindarme esa maravillosa oportunidad de seguir estudiando y adquirir nuevos conocimientos para mejorar mi desempeño profesional.

A los Doctores Luis Carlos Concha Bustos y Braulio Gutiérrez Vanegas, Directores del Programa de Maestría en Agroforestería Tropical, por sus voces de aliento para que este trabajo cumpliera todas sus metas.

A los Doctores Marco Cabezas Gutiérrez, Guillermo Carvajal, Jorge Arguelles, y a todos y cada uno de quienes actuaron como mis docentes en el desarrollo del programa de maestría, por su acompañamiento y apoyo en las diferentes temáticas de este trabajo.

A los profesionales y compañeros de trabajo Xiomara Pulido, Nubia Rodríguez, Nataly Hernández, Lina Moreno, Fernando García R, Jaime Bernal, Orlando Argüello, Juan Carlos Campos, por sus apoyos en diferentes temáticas, acompañamiento y sus voces de aliento para que este trabajo se realizara.

A los auxiliares de campo Luis E. Lizarazo, Leyfredo Pineda y Pedro Solano por facilitar el desarrollo de las actividades de campo de este proyecto.

RESUMEN

GUTIERREZ, A.J. 2014. Aportes a la rehabilitación ecosistémica de áreas riparias con énfasis en calidad de suelos y producción dendroenergética por medio de arreglos agroforestales en zonas ganaderas del Piedemonte Llanero.

Palabras claves: Rehabilitación, Agroforestales, Dendroenergía, Áreas riparias, *Piptadenia opacifolia* Ducke., *Cassia moschata* Kunth., *Inga edulis* Mart., Macrofauna,

La rehabilitación comparte con la restauración ecológica la idea de tener referencia a los ecosistemas históricos, pero difiere en sus estrategias y metas. Ésta no implica llegar a un estado original y se enfoca en el restablecimiento de manera parcial de elementos estructurales o funcionales del ecosistema deteriorado, así como de la productividad y los servicios ambientales que provee el ecosistema, a través de la aplicación de técnicas. (Vargas, 2007; MAVDT, 2010; MAVDT – CONIF, 2003)

La presente investigación tuvo como objetivo: I) Que mediante el establecimiento de sistemas agroforestales en una combinación planificada de árboles, arbustos, que por sus características y como componentes en un proceso sucesional, se adaptaran a las condiciones de las áreas riparias de los bosques de galería facilitando la rehabilitación de los servicios ecosistémicos, valorados estos con la selección de variables indicadoras, las cuales se integraron cuantitativamente en índices de calidad física, química y biológica de los suelos y II) Cuantificar la biomasa dendroenergética potencialmente útil en los sistemas agroforestales establecidos para la producción de leña como alternativa productiva socialmente aceptada a través de un proceso de análisis funcional de crecimiento.

El proyecto se desarrolló en el Área de sostenibilidad en Agroenergía – ASA, CORPOICA - ECOPETROL; el cual se localiza en Chichimene (Acacias, Meta, Colombia), a 3°53'23" de latitud Norte y 73°35'17" de longitud Oeste, con una altura de 385 msnm, en un clima superhúmedo medio, con precipitación promedia de 2901 mm, temperaturas entre 20.8°C y 30.7°C. Localizado en un piedemonte deposicional, en un paisaje de terrazas coluvio-aluviales, la pendiente varía entre 0 al 7%, los suelos son profundos a superficiales, texturas medias a finas, bien a pobremente drenados.

Se establecieron 3 bloques de cinco (5) tratamientos, así: (T0) Pasto (*Brachiaria decumbes*) testigo; (T1) Yopo (*Piptadenia opacifolia* Ducke) y *Tithonia* (*Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray.); (T2) Cañafistol (*Cassia moschata* Kunth) y *Tithonia* (*T. diversifolia*); (T3) Guamo (*Inga edulis* Mart) y *Tithonia* (*T. diversifolia*); (T4) Múltiple de las tres (3) especies forestales y *Tithonia* (*T. diversifolia*). Los bloques fueron dispuestos de acuerdo con un gradiente respecto a la vegetación presente en el bosque de ribera. En el suelo, para la calidad física se midió densidad aparente, textura y curvas de retención de humedad; para la calidad química se midió: pH, materia orgánica, saturación de aluminio; contenidos de fósforo y azufre; los elementos mayores calcio, magnesio y potasio y los contenidos de los elementos menores: hierro, cobre, manganeso, zinc y boro y para la calidad biológica se midió actividad microbiana y macroinvertebrados. Para cuantificar la biomasa útil para producción de dendroenergía se tomaron variables altura y diámetro de tallo y se realizó un análisis funcional de crecimiento.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) permitió mostrar que los SAF establecidos en los tratamientos y las prácticas de manejo probablemente influyen en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y por tanto en su calidad; las variables indicadoras más sensibles al uso y manejo, en términos de calidad física fueron: densidad aparente, el almacenamiento del agua en el suelo y la porosidad; con respecto a las variables químicas más sensibles fueron: pH, la saturación de

aluminio, contenidos de materia orgánica, calcio, magnesio, hierro y cobre y en relación con la macrofauna como variable de calidad biológica del suelo fue la densidad del grupo funcional de la biota del suelo de los ingenieros y transformadores, representados por los órdenes Isóptera (termitas), Hymenóptera (hormigas) y la Haplotaxida (lombrices).

De las especies leñosas evaluadas, mostraron diferencias entre ellas en relación con sus aportes en los procesos de rehabilitación de los suelos, es de resaltar que el Yopo (*P. opacifolia*) y Guamo (*I. edulis*) presentaron los índices de calidad física, química y biológica del suelo dentro de unas escala de altos a muy altos y el Cañafistol (*C. moschata*) el de menores aportes y más bajas valoraciones. En volúmenes de biomasa seca para usos dendroenergéticos, el Yopo (*P. Opacifolia*), presentó el mejor comportamiento en tasas de crecimiento en diámetro y altura en la etapa juvenil, seguida de la especie Guamo (*I. edulis*) y por último la especie Canafistol (*C. moschata*).

ABSTRACT

GUTIERREZ, A. J. 2014. Contributions to the rehabilitation of ecosystemic riparian areas with emphasis on soil quality and production wood energy through agroforestry arrangements in livestock areas in the Piedmont Llanero.

Key words: Rehabilitation, Agroforestry, Areas riparian, Wood energy, *Piptadenia opacifolia* Ducke., *Cassia moschata* Kunth., *Inga edulis* Mart., Macrofauna, Microbial activity, Total porosity.

The rehabilitation shares with ecological restoration the idea of having reference to the historical ecosystems, but differs in its strategies and goals. This does not imply arrive to an original state and focuses on the restoration of partial way of structural or functional elements of the ecosystem deteriorated, as well as the productivity and environmental services that provides the ecosystem, through the application of techniques.

The objective of this research was to: (I) That, through the establishment of agroforestry systems in a planned combination of trees, shrubs, which, due to its characteristics and as components in a successional process, adapted to the conditions of the riparian areas of the gallery forests by facilitating the rehabilitation of ecosystem services, valued these with the selection of indicator variables, which were integrated quantitatively in indices of quality physical, chemical and biological soil and. II) Quantify the biomass wood energy potentially useful in the agroforestry systems established for the production of wood as a productive alternative socially accepted through a process of functional analysis of growth.

The project was developed in the Área de Sostenibilidad en Agroenergía – ASA - ASA, CORPOICA - ECOPEL; which is located in Chichimene (Acacias, Meta, Colombia), at 3 ° 53 ' 23' North latitude and 73 ° 35 ' 17' West longitude, with a height of 385 meters above sea level, in a climate super-humid medium, with average rainfall of 2901 mm, temperatures between 20.8 °C and 30.7 °C, with regard to the water balance, the season of deficit is covered from December to March and during the rest of the year (8 months) are presented excesses of rains. Located in a piedmont of sedimentation, in a landscape of terraces coluvio-alluvial, the slope varies between 0 to 7 %, the soils are deep to surface, average textures to fine, well to poorly drained soils.

Established 3 blocks of five (5) treatments, as well: (T0) Grass (*Brachiaria decumbes*), witness; (T1) Yopo (*Piptadenia opacifolia* Ducke) y Tithonia (*Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray.); (T2) Cañafistol (*Cassia moschata* Kunth) y Tithonia (*T. diversifolia*); (T3) Guamo (*Inga edulis* Mart) y Tithonia (*T. diversifolia*); (T4) mixture of the three (3) forest species and Tithonia (*T. diversifolia*). The blocks were prepared in accordance with a gradient on the vegetation present in the forest of the riparian. In the soil, for the physical quality was measured bulk density, texture and curves of moisture retention; for the chemical quality was measured: pH, organic matter, aluminum saturation; contents of phosphorus and sulfur; the major elements calcium, magnesium, and potassium and the contents of the minor elements: iron, copper, manganese, zinc and boron and for biological quality was measured microbial activity and macroinvertebrates. To quantify the useful biomass for the production of wood energy took variables height and diameter of stem and conducted a functional analysis of growth.

The Principal Components Analysis (PCA) has enabled us to show that the SAF established in the treatments and the management practices probably influence the physical, chemical and biological properties of the soil and therefore in its quality; the indicator variables more sensitive to the use and management, in terms of physical quality were: bulk density, water storage in the soil and the porosity;

with regard to the more sensitive chemical variables were: pH, the saturation of aluminum, contents of organic matter, calcium, magnesium, iron and copper and in relation to the macrofauna such as variable biological quality of the soil was the density of the functional group of the soil biota of the engineers and transformers, represented by the Order Isoptera (termites), Hymenoptera (ants) and Haplotaxida (worms).

Of the woody species evaluated, showed differences between them in relation to their contributions in the process of rehabilitation of the soil, it is important to emphasize that the Yopo (*P. opacifolia*) and Guamo (*I. edulis*) presented the indices of quality physical, chemical and biological soil within a scale of high to very high and the Canafistol (*C. moschata*) the minor contributions and lower valuations. In volumes of dry biomass uses for wood energy, Yopo (*P. Opacifolia*), presented the best behavior in rates of growth in height and diameter in the juvenile stage, followed by the species Guamo (*I. edulis*) and finally the species Canafistol (*C. moschata*).

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	9
2	PROBLEMA Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	11
2.1	PROBLEMA	11
2.2	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	15
2.3	HIPOTESIS	15
3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	16
3.1	OBJETIVO GENERAL:	16
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS:	16
4	JUSTIFICACIÓN	17
4.1	IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LAS ÁREAS RIPARIAS	17
4.2	ATRIBUTOS DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES	19
4.3	LOS SISTEMAS AGROFORESTALES (SAFS) Y EL USO DE LA TIERRA	20
5	TIPO DE INVESTIGACIÓN	22
6	MARCO TEÓRICO	23
6.1	LA RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN ECOLÓGICA	23
6.1.1	Fases para la rehabilitación ecológica de áreas riparias potrerizadas.....	26
6.2	SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA REHABILITACION ECOLOGICA	27
6.2.1	Especies.....	29
6.3	CALIDAD DEL SUELO	37
6.3.1	Indicadores de calidad del suelo.....	38
6.3.2	Indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo	40
6.3.2.1	Indicadores físicos de la calidad del suelo	40
6.3.2.2	Indicadores químicos de la calidad del suelo.....	42
6.3.2.3	Indicadores biológicos de la calidad del suelo.....	42
6.3.3	Índices de calidad física, química y biológica del suelo.....	45
6.4	ANALISIS FUNCIONAL DE CRECIMIENTO Y CONSUMO DE LEÑA, DENDROENERGIA	49
6.5	CONSUMO DE LEÑA, DENDROENERGIA	50
7	MÉTODOLOGIA	53
7.1	LOCALIZACION Y CARACTERISTICAS AREA DE ESTUDIO	53
7.1.1	Localización	53

7.1.2	Caracterización climática área de estudio	54
7.1.3	Caracterización edáfica área de estudio	54
7.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	56
7.3	TRATAMIENTOS	57
7.3.1	Adecuación del área y materiales para el establecimiento de los tratamientos	58
7.3.2	Condiciones de manejo de los tratamientos	59
7.4	PARÁMETROS EVALUADOS Y TOMA DE INFORMACIÓN.....	60
7.5	ESPECIFICIDADES METODOLOGICAS DEL OBJETIVO 1: Evaluar la contribución de los arreglos agroforestales en la rehabilitación del suelo con base en indicadores e índices de calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas.....	62
7.5.1	Parámetros asociados la calidad física del suelo.	62
7.5.2	Parámetros asociados a la calidad química de suelo.	64
7.5.3	Parámetros asociados a la calidad biológica del suelo	65
7.5.3.1	Macrofauna del suelo.....	65
7.5.3.2	Parámetros de actividad microbiana	66
7.6	ESPECIFICIDADES METODOLOGICAS DEL OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.....	67
7.7	PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN	70
7.8	CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD EN LA VALORACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, Y BIOLÓGICAS DE LOS SUELOS.	72
8	RESULTADOS	74
8.1	RESULTADOS ESPECIFICOS DEL OBJETIVO 1: Evaluar la contribución de los arreglos agroforestales en la rehabilitación del suelo con base en indicadores e índices de calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas.....	74
8.1.1	Caracterización física, química y biológica de los tratamientos evaluados.....	75
8.1.1.1	Caracterización física de los tratamientos.....	75
8.1.1.2	Caracterización química de los tratamientos	80
8.1.1.3	Caracterización biológica de los tratamientos	86
8.1.2	Selección de variables indicadoras de la calidad y construcción de índices de calidad física, química y biológica de los tratamientos evaluados.	94
8.1.3	Selección de variables indicadoras de calidad física, química y biológica para la construcción de los índices.	97

8.1.3.1	Selección de variables físicas indicadoras de la calidad del suelo.....	98
8.1.3.2	Selección de variables químicas indicadoras de la calidad del suelo.	102
8.1.3.3	Selección de variables biológicas indicadoras de la calidad del suelo.....	107
8.1.4	Construcción de índices de calidad física, química y biológica	110
8.2	RESULTADOS ESPECIFICOS DEL OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.....	113
8.2.1	Curvas de crecimiento en altura y diámetros	114
8.2.2	Calculo de la Tasa de crecimiento relativo $TCR_{(alt,dia)}$ e Incrementos medios Anules $IMA_{(alt,dia)}$. 116	
8.2.3	Estimación de la biomasa dendroenergética potencialmente útil para la producción de leña .	117
9	DISCUSION DE RESULTADOS	120
9.1	DISCUSION OBJETIVO 1: Evaluar la contribución de los arreglos agroforestales en la rehabilitación del suelo con base en indicadores e índices de calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas.	120
9.2	DISCUSION OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.	125
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
10.1	PARA EL OBJETIVO 1: Evaluar la recuperación del ecosistema con base en indicadores de la calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.....	129
10.2	PARA EL OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.	130
11	REFERENCIAS	132
12	ANEXOS	156

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pasos para la restauración de áreas riparias potrerizadas	26
Tabla 2. Relación entre la porosidad, tamaño y los componentes del suelo.	42
Tabla 3. Distribución de tratamientos en los bloques. ASA – Meta	56
Tabla 4. Cantidad y distancias de siembra de las especies a establecer en los diferentes tratamientos.	58
Tabla 5. Relación de análisis de características físicas analizadas del suelo y su metodología.	62
Tabla 6. Propiedades químicas analizadas y metodologías usadas	64
Tabla 7. Variables físicas en el suelo. Evaluadas en línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012). (0- 10 cm)	76
Tabla 8. Variables asociadas a las propiedades químicas y biológicas. Evaluadas en línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012) (0-10 cm)	81
Tabla 9. Grupos taxonómicos encontrados en el área de estudio, 2012. ASA – Meta.....	86
Tabla 10. Valores de densidad (individuos/m ²) de macroinvertebrados según tratamientos. (0- 10cm). ASA- Meta	89
Tabla 11. Valores medios del seguimiento a la actividad microbiana, producción de mg de CO2 por cada 100 gr de suelo, en los tratamientos en tres temporadas de muestreo. ASA – Meta.....	93
Tabla 12. Análisis de varianza para las propiedades físicas, monitoreo (m1_marzo 2012).....	96
Tabla 13. Análisis de varianza para las propiedades químicas y biológico, monitoreo (m1 _marzo 2012).....	97
Tabla 14. Análisis de varianza para las propiedades físicas, (m2_octubre 2012)	100
Tabla 15. Contribución de cada variable física a la construcción de los factores 1 y 2	101
Tabla 16. Análisis de varianza para las propiedades químicas (m2_octubre 2012).....	105
Tabla 17. Contribución de cada variable química a la construcción de los factores 1 y 2 del ACP.	106
Tabla 18. Análisis de varianza para la propiedades bilógicas, de acuerdo con la densidad (individuos/ m ²) de macroinvertebrados presentes en los tratamientos (m2_octubre 2012) (0 – 10 cm).....	110

Tabla 19. Contribución de cada variable biológica a la construcción de los factores 1 y 2 del ACP.	110
Tabla 20. Índices de calidad física, química y biológica del suelo de los diferentes tratamientos evaluados, monitoreo (m2 _octubre 2012).	111
Tabla 21. Parámetros obtenidos para las curvas de crecimiento de las especies Yopo (<i>Piptadenia opacifolia</i>), Cañafistol (<i>Cassia moschata</i>) y Guamo (<i>Inga edulis</i>). (503 días de evaluación).....	114
Tabla 22. Tasas de crecimiento relativo e incrementos medios anuales en altura y diámetro de las especies evaluadas.....	116
Tabla 23. Modelo de crecimiento estimado en altura, diámetro, volumen y biomasa total en peso seco por árbol de la especie Yopo (<i>P. opacifolia</i>).....	117
Tabla 24. Cantidad estimada de árboles, área requerida y producción de materia seca para el suministro de 4.8t/año de leña.	118
Tabla 25. Resumen de índices y variables indicadoras de la calidad física, química y biológica del suelos de acuerdo con los tratamientos.....	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de la rehabilitación natural y asistida en el proceso de desarrollo de un ecosistema (Fuente: Adaptado y modificado de MAVDT – CONIF, 2003).....	25
Figura 2. Área en Pastura (<i>Braquiaria decumbens</i>) donde se instalaron los tratamientos.	29
Figura 3. Yopo (<i>Piptadenia opacifolia</i> Ducke). A) Árbol, B) Plántulas establecidas en el experimento, C) Floración y D) Semillas.	32
Figura 4. Cañafístol (<i>Cassia moschata</i> Kunth). A) Árbol, B) Plántulas vivero, C) Árbol en la parcela y D) frutos	33
Figura 5. Guamo (<i>Inga edulis</i> Mart). A) Planta, B) Arboles en parcela en campo y C) Fruto .	35
Figura 6. Botón de oro (<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl) Gray). A y B: estacas, C: Flores y D y E: Plántulas establecidas en campo.	37
Figura 7. Localización geográfica del área de estudio en el ASA -Área de Sostenibilidad en Agroenergía. (CORPOICA – ECOPETROL), Meta.....	55
Figura 8. Datos climáticos mensuales. Estación climática ASA -Área de Sostenibilidad en Agroenergía. (CORPOICA – ECOPETROL), Meta.....	55
Figura 9. Distribución de los tratamientos en un bloque 1.....	57
Figura 10. Cantidad, distribución y distancias de siembra de un tratamiento tipo.....	58
Figura 11. Adecuación del área: Cercado, trazado, ahoyado y siembra y localización de: bloques y sus respectivos tratamiento. ASA – Meta	59
Figura 12. Distribución de especies y sitios de muestreo en un tratamiento.....	62
Figura 13. Porcentajes de porosidad (macro, meso y micro), con respecto a los contenidos de humedad, presentes en los suelos en los tres muestreos Línea Base LB (mo_octubre2011), (m1_marzo 2012) y (m1_octubre 2012), para cada uno de los tratamientos. (0 – 10 cm).....	79
Figura 14. Riqueza taxonómica de la macrofauna, número de familias presentes del suelo en cada tratamiento.....	87
Figura 15. Densidad de macroinvertebrados (individuos/m ²) presentes en los tratamientos. (0-10 cm). ASA- Meta.	89
Figura 16. Proyección de las variables físicas, químicas y biológicas evaluadas en el círculo de correlación en los componentes Dim 1 y Dim 2, para los monitoreos línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012)	95

Figura 17. Proyección de las variables físicas, químicas y biológicas evaluadas en cada muestreo; línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012).....	95
Figura 18. Proyección de las variables físicas evaluadas (m2_octubre 2012) en el círculo de correlación en función de sus aportes a la conformación de los factores F1 y F2 del ACP.....	99
Figura 19. Distribución de los tratamientos T0 (<i>B. decumbens</i>), T1 (<i>P. opacifolia</i>), T2 (<i>C. moschata</i>), T3 (<i>I. edulis</i>) y T4 (Múltiple) en función del aporte de las variables físicas a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP, en el muestreo (m2_octubre 2012).	100
Figura 20. Proyección de las variables químicas evaluadas (m2_octubre 2012) en el círculo de correlación en función de sus aportes a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP.	103
Figura 21. Distribución de los tratamientos T0 (<i>B. decumbens</i>), T1 (<i>P. opacifolia</i>), T2 (<i>C. moschata</i>), T3 (<i>I. edulis</i>) y T4 (Múltiple) en función del aporte de las variables químicas a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP, en el muestreo (m2_octubre 2012).	104
Figura 22. Proyección de las variables biológicas evaluadas (m2_octubre 2012) en el círculo de correlación en función de sus aportes a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP.	108
Figura 23. Distribución de los tratamientos T0 (<i>B. decumbens</i>), T1 (<i>P. opacifolia</i>), T2 (<i>C. moschata</i>), T3 (<i>I. edulis</i>) y T4 (Múltiple) en función del aporte de las variables biológicas a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP, en el muestreo (m2_octubre 2012).	108
Figura 24. Curvas de crecimiento en altura de las especies Yopo (<i>Piptadenia opacifolia</i>), Cañafistol (<i>Cassia moschata</i>) y Guamo (<i>Inga edulis</i>), establecidas en monocultivo (mo) o como un arreglo múltiple (mu).....	115
Figura 25. Curvas de crecimiento en diámetro de las especies Yopo (<i>Piptadenia opacifolia</i>), Cañafistol (<i>Cassia moschata</i>) y Guamo (<i>Inga edulis</i>), establecidas en monocultivo (mo) o como un arreglo múltiple (mu).....	115
Figura 26. Ataque ocasionado <i>Chelosyne sp</i> en planta de <i>Tithonia</i> ; A: Larva, B: Adulto y C: Apariencia plántulas después de consumidas.	119
Figura 27. Comportamiento de las variables físicas, A: Densidad Aparente; B: Macroporosidad; C: Mesoporosidad; D: Microporosidad. Entre los tratamientos y diferentes	

épocas de muestreo. Línea base (LB), T0 (*B. decumbens*), T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple).....121

Figura 28. Comportamiento de las variables químicas, A: pH; B: Saturación de Aluminio (SAT_Al); C: Contenido de calcio Ca (Cmol(+)/kg); D: Contenido de cobre Cu (mg/kg). Entre los tratamientos y diferentes épocas de muestreo. Línea base (LB), T0 (*B. decumbens*), T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple).....122

1 INTRODUCCION

La deforestación es un fenómeno que avanza vertiginosamente a nivel global, la FAO (2008) reporta que en el periodo de los años 2000 a 2005 en Suramérica se talaron 4.3 millones ha/año de bosque húmedo tropical, y en particular para el caso de Colombia, el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en Colombia sostiene que se deforestaron 315.000 ha/año en el período 1990 a 2010, siendo la tasa de pérdida de bosque del orden de 310.334 ha/año, estimando además que para el caso de la Orinoquia dicha tasa fue de 36.499 hectáreas/año (IDEAM, 2010_a).

En términos de deforestación para la Orinoquia, se incluye la destrucción de los bosques riparios¹, que en el piedemonte del Meta se estima en 120.000 hectáreas, que han afectado la oferta hídrica disponible en razón a la simultánea destrucción de humedales de las cuencas altas (Gobernación del Meta & IGAC, 2004). Otro aspecto prioritario es la degradación y contaminación a que están siendo sometidas las microcuencas, como consecuencia de las actividades agropecuarias que en ellas se realizan (MAVDT, 2010); adicionalmente al consumo de leña utilizada en la preparación de alimentos por parte de las comunidades rurales, debe prestársele atención, pues el abastecimiento doméstico de madera

¹ Se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicada en los márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y los drenajes naturales. Cuando la presencia de estas franjas de bosques ocurre en regiones de sabanas se conoce como bosque de galería o cañadas, las otras franjas de bosque en cursos de agua de zonas andinas (piedemonte) son conocidas como bosque ripario (IDEAM, 2010_b).

con fines energéticos, podría ser un factor subyacente de la pérdida de cobertura forestal de los bosques de galería.

Las anteriores premisas, conducen a priorizar los procesos de investigación, orientándolos a conocer más sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas de los bosques de galería, para aproximarse a la comprensión de las dinámicas ecológicas, el aporte efectivo de bienes y servicios ecosistémicos.

Con la ejecución del presente proyecto se buscó: I) Que mediante el establecimiento de sistemas agroforestales en una combinación planificada de árboles, arbustos, que por sus características y como componentes en un proceso sucesional, se adaptaran a las condiciones del ecosistema (bosque de galería) facilitando la rehabilitación de los servicios ecosistémicos, valorados estos con unos índices de calidad física, química y biológica de los suelos y II) Estimar la biomasa dendroenergética potencialmente útil en los sistemas agroforestales establecidos para la producción de leña como alternativa productiva socialmente aceptada.

2 PROBLEMA Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

2.1 PROBLEMA

Colombia con una extensión de (1.141.748 km²) en áreas terrestres es considerada en el mundo como uno de los 12 países llamados “megadiversos”; condición que se refleja en la amplia variedad de ecosistemas representados en el territorio colombiano, desde páramos, laderas y valles andinos hasta selvas húmedas tropicales, bosques secos, humedales, llanuras y desiertos (IDEAM, *et al.*, 2007). Sin embargo, la mayoría de los ecosistemas naturales de Colombia han sido transformados y degradados como resultado de actividades de deforestación, incendios forestales y quemas de origen antrópico, motivados desde expansiones urbanas, aumento de áreas destinadas a producciones agrícolas y pecuarias, cultivos ilícitos, minería y aprovechamiento no sostenible del suelo, entre otras.

Según el MAVDT, 2010, la rápida conversión y deterioro de los ecosistemas originales, ocasionados por la deforestación han generado pérdida de la biodiversidad, de la funcionalidad (generación servicios) del ecosistema, disminución en calidad y cantidad de los recursos hídricos y de las aguas continentales, de fragmentación de paisajes y la degradación de las funciones del suelo, en aspectos tales como: Servir de medio para el soporte y crecimiento de las plantas, captar y permitir la entrada de agua, suplir las necesidades de agua de las plantas y recargar los acuíferos subterráneos, suministrar nutrientes esenciales y el medio necesario para lograr la conversión del dióxido de carbono usando la energía de la luz solar (vía fotosíntesis), promover el ciclaje de nutrientes, mantener condiciones edáficas

adecuadas para el desarrollo de la actividad biológica, servir de soporte estructural y medio en donde se puedan filtrar y degradar compuestos nocivos para el ambiente (Larson & Pierce, 1994; Karlen *et al.*, 1997; Carter, 2002 y Wilson *et al.*, 2008).

Se estima que el 73.3% de la deforestación en Colombia es causada por la expansión de la frontera agrícola y la colonización seguida en importancia por la producción maderera y el consumo de leña (Minambiente, 2012); siendo la conversión para uso ganadero la principal causa (Vargas, 2007); actualmente las tierras con vocación ganadera ascienden a 10,2 millones de hectáreas, sin embargo se estima que, en el país se utilizan para esta actividad cerca de 41,7 millones de hectáreas (IGAC – CORPOICA, 2002); de ahí que, el Plan Estratégico de Ganadería (PEGA) colombiano, proponga la reconversión de 10 millones de hectáreas con fines de conservación.

Las áreas degradadas por la fragmentación del paisaje están afectadas parcialmente en los compartimentos de la vegetación, la fauna y el suelo (Almeida *et al.*, 2003), así como en sus condiciones micro climáticas; estas variaciones en la configuración del paisaje afectan la composición, estructura y una baja funcionalidad de los ecosistemas al originarse una reducción de las áreas forestales, tal como ocurre en las áreas riparias (Turner, 1996; Fahrig, 2003). En consecuencia hay una disminución de los productos ecosistémicos, el deterioro de la calidad de las áreas remanentes, la pérdida de conectividad de las mismas y la creación de efectos de bordes sobre este ecosistema (Andrén, 1994; Fahrig, 2003; Odum, 1972; Vargas 2007).

El Zonobioma Húmedo Tropical (ZHT) del piedemonte orinocense es el que presenta la mayor densidad de fragmentos (0,31 por km²), siendo el de mayor fragmentación a nivel de bioma (MAVDT, 2010). El piedemonte del Meta, hace parte de la megacuenca de sedimentación de la Orinoquia, donde está la transición entre los ecosistemas bien diferenciados de sabana y cordillera. Por esta razón, se considera como un banco genético encargado de la renovación y mantenimiento de los bosques de galería en las áreas riparias, lo mismo que área de refugio y protección de la fauna orinocense y hábitat de la fauna andina (Gobernación del Meta & IGAC, 2004).

El piedemonte del Meta actualmente presenta pocas áreas en bosque y pasto nativo, y predominan pastos introducidos y mejorados del género *Brachiaria*, manejados en sistemas de producción intensivos, dedicados principalmente a la ceba intensiva y en menor proporción al doble propósito (Rincón *et al.*, 2010). Además se desarrollan sistemas productivos de cultivos transitorios de maíz (*Zea mays*), soya (*Glycine max*), arroz (*Oryza sp.*), yuca (*Manihot esculenta*) y plátano (*Musa sp.*); cultivos permanentes de palma africana (*Elaeis guineensis*), cítricos (*Citrus sp.*) tales como naranja, limón, mandarina y frutales de papaya (*Carica papaya*), maracuyá (*Passiflora edulis*), piña (*Ananas comusus*) y marañón (*Anacardium occidentale*); plantaciones forestales de pino (*Pinus sp.*), eucalipto (*Eucalyptus sp.*), acacia (*Acacia mangium*) y melina (*Gmelina arborea*); y especies arbóreas que subsisten en relictos de bosque de galería, los cuales han sido sometidos a un fuerte proceso de intervención antrópica por la extracción de maderas finas y leña (Gobernación del Meta & IGAC, 2004).

En el departamento del Meta, se estima que en total se consume 21600 (m³/año) metros cúbicos de leña al año, que equivale aproximadamente a 100 hectáreas, de los cuales el 90%

de la madera consumida pertenece especialmente a las especies de yopo (*Anadenanthera Peregrina* y *Piptadenia opacifolia*) (CORPOICA, 2010).

El cambio de uso de bosques en las áreas riparias a pasturas o cultivos y las prácticas tradicionales como quemas, labranza convencional y disturbios en los ecosistemas, por el desmonte y el subsiguiente disturbio del suelo afectan la dinámica de este ecosistema, dado que, los bosques de galería tienen muchas funciones físicas y ecológicas; siendo las más importantes la de servir de corredores de flora y fauna y refugios durante las temporadas secas; proveer productos del bosque (madera, leña, fibra, alimentos), reducir la velocidad de las aguas de inundación, entre otras (Arizpe *et al.*, 2010; Fearnside & Barbosa 1998; Magdaleno, 2011; MAVDT, 2010; Naiman & Décamps, 1997; UMCA, 2006); actuar como buffer minimizando el impacto de desechos contaminantes químicos sobre las fuentes de agua (mantener la calidad del agua) y sobre los suelos adyacentes (Arcos *et al.*, 2006; Granados *et al.*, 2006; Lowrance *et al.*, 1984; Robins & Cain, 2002); y regular la luz y la temperatura sobre el cuerpo de agua (Johnson & Jones, 2000), entre otras.

En este contexto el cambio de uso del suelo en las áreas riparias a usos agrícolas y pecuarios con disminución de sus servicios ecosistémicos, que trasciende sus efectos a los bosques de galería y otros agroecosistemas, como lo expuesto anteriormente, se requiere entonces promover procesos de investigación orientados a encontrar alternativa de rehabilitación de los suelos en estas áreas y opciones productivas como la dendroenergía, para que las acciones de restauración de suelos tenga un efecto económico que viabilice socialmente la propuesta de rehabilitación.

2.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Las preguntas centrales que orientan la investigación giran alrededor de develar:

¿Cuáles son los aportes de los arreglos agroforestales a la rehabilitación de los suelos con base en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, en áreas riparias?

¿Son los sistemas agroforestales, una alternativa de uso del suelo con fines dendroenergéticos en las áreas riparias?

2.3 HIPOTESIS

Las hipótesis a contrastar son:

Hipótesis 1

Ho No existen diferencias en la calidad física química y biológica de los suelos en áreas riparias por la incorporación de arreglos agroforestales y sistemas de monocultivo con pastos.

Hi Existen diferencias en la calidad física química y biológica de los suelos en áreas riparias por la incorporación de arreglos agroforestales Y sistemas de monocultivo con pastos.

Hipótesis 2

Ho Los sistemas agroforestales establecidos en zonas riparias no son alternativas dendroenergéticas viables.

Hi Los sistemas agroforestales establecidos en zonas riparias si son alternativas dendroenergéticas viables.

3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

3.1 OBJETIVO GENERAL:

Evaluar la incidencia de los arreglos agroforestales en la rehabilitación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y la producción dendroenergetica en áreas riparias ganaderas del piedemonte llanero.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- 1.** Evaluar la contribución de los arreglos agroforestales en la rehabilitación del suelo con base en indicadores e índices de calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas.
- 2.** Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.

4 JUSTIFICACIÓN

4.1 IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LAS ÁREAS RIPARIAS

Las áreas riparias en condiciones naturales proveen de hábitat a gran cantidad de especies silvestres, a la vez que actúan como corredores ecológicos entre parches de vegetación en el paisaje fragmentado. Por lo general son ecosistemas más fértiles y productivos, con mejor calidad de suelos, y es la última línea de defensa para la protección de la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos (Robins & Cain, 2002).

Otra de las características importantes de las zonas riparias es la influencia marcada sobre la organización de la diversidad y la dinámica de las comunidades asociadas con ecosistemas acuáticos y terrestres (Robert *et al.*, 2000), complementando sus valores ecológicos con valores económicos y sociales, ofreciendo a las comunidades y productores recursos maderables y no maderables (Robins & Cain, 2002).

Por el cambio de usos de estas áreas a monocultivos agrícolas y pecuarios, se afectan la provisión de servicios ecosistémicos, no solo localmente, sino las de otros ecosistema adyacentes, como los acuáticos, por lo tanto se requiere para el piedemonte de la Orinoquia, emprender diferentes investigaciones, entre las cuales está la de tipo experimental, con el propósito de aportar elementos técnico-científicos, a fin definir estrategias para establecer procesos de rehabilitación de las áreas riparias.

Es de resaltar que por las perspectivas de desarrollo agroindustrial y energética previstas para el piedemonte de la Orinoquia, las áreas riparias están en un estado de alerta, en atención tanto por su fragilidad, como por su potencial productivo, de ahí que diversas instituciones públicas y privadas, como la Universidad de los Llanos, Corpoica, Corporinoquia, Cormacarena y ONGs entre otras, promueven e investigan en alternativas productivas agropecuarias y de manejo de los recursos naturales de manera sostenible, considerando la diversidad ecosistémica de la región, entre las cuales están las áreas riparias.

En este contexto CORPOICA y ECOPETROL desarrollan en el Centro ASA (Área de Sostenibilidad Ambiental- Acacias –Meta) diversos proyectos , entre los cuales está el denominado “Uso y manejo integral de las aguas tratadas asociadas a la producción de hidrocarburos en sistemas agropecuarios del área de influencia de Ecopetrol”, el cual entre sus propósitos busca identificar y domesticar especies forestales con potencial de producción dendroenergética y agroindustrial (caucho, yopo, guadua y acacia, entre otros), y el manejo predial aplicando principios de conservación y restauración ambiental de áreas riparias.

La propuesta de investigación “Aportes a la rehabilitación ecosistémica de áreas riparias con énfasis en calidad de suelos y producción dendroenergética por medio de arreglos agroforestales en zonas ganaderas del piedemonte llanero”, se inscribe como parte uno de los objetivos del proyecto ASA- CORPOICA ECOPETROL, que si bien para efectos de este trabajo se concentra en indagar el aspecto suelos y potencial dendroenergético de algunas especies arbóreas en un lapso de tiempo, el mismo continuara con toma de datos por cinco años.

4.2 ATRIBUTOS DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES

Los estudios de los sistemas de producción agroforestales (SAFs), han venido ganando terreno y aceptación entre los agricultores y las agencias de investigación y desarrollo como una alternativa de uso del suelo, gracias a los beneficios agregados que generan estos sistemas en lo social, en los servicios ecosistémicos y en las funciones productivas (Gutiérrez, 2003), como consecuencia del manejo e interacción entre árboles (leñosos y no leñosos), suelo, pastos y animales.

En lo ecológico se destaca la función de mantenimiento de la biodiversidad en paisajes agrícolas deforestados; la reducción de la erosión y recuperación de suelos y praderas degradadas y por tanto la conservación y recuperación de la capacidad productiva del suelo; el mantenimiento de cantidad y calidad del agua, la absorción de carbono y reducción de las emisiones de gases de invernadero. **En lo social** se resalta la disminución de los riesgos de producción debido a la diversificación de las especies por unidad de superficie; la generación de mayor empleo permanente, la seguridad alimentaria y la disminución de costos unitarios de producción, entre otros. (Harvey *et al.*, 2003; Harvey, 2001; Gutiérrez, 2003; Jiménez, & Muschler, 2001). **En lo productivo** se destaca la diferenciación productiva en calidad, el aprovechamiento del reciclaje de nutrientes y por tanto la disminución de insumos de origen sintético; manejo del estrés ocasionado por las altas temperaturas para los animales y estrés de sequía en los cultivos por modificación del microclima, producción de madera, leña, forraje, frutos, postes para cercas y control de plagas y enfermedades (Betancourt *et al.*, 2003).

4.3 LOS SISTEMAS AGROFORESTALES (SAFS) Y EL USO DE LA TIERRA

A nivel global los SAFs, se posicionan como alternativa sostenible de uso de la tierra por sus efectos socioeconómicos y ambientales, en relación con los cambios del uso del suelo, la necesidad de producciones sostenibles, la diferenciación de precios de los productos promovida por los mercados verdes, el cambio climático y la percepción de que el bienestar social depende de los servicios ecosistémicos, entre otros. (Gutiérrez, 2013).

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entregó en el año 2012, el Estudio de los conflictos de uso del territorio Colombiano a una escala 1:100.000; refiriéndose al tema de la vocación del uso potencial del suelo, considera cinco clases de uso: Agrícola, ganadera, agroforestal, forestal y de conservación. Para el caso agroforestal se tiene que del total de tierras de vocación agrícola, ganadera y agroforestal de 41.328.109 hectáreas (36% del área total del país), 18.752.636 millones de hectáreas son de potencial de uso en SAFs, lo que equivale al 45%, de estos usos, considerándose el uso agroforestal como uno de los más importantes en el país.

En relación a los potenciales de uso del suelo en SAFs, por regiones naturales, la Amazonia dispone de 8.752.307 hectáreas, correspondiente al 47% del total SAFs del país, le siguen en importancia la región de la Orinoquia con 4.457.180 hectáreas con 24%, la región Andina con 2.600.918 hectáreas con 14%, la región Caribe con 1.688.746 con 9% y por último la región Pacífica-Choco con 1.214.379 hectáreas con (6%). (Gutiérrez, 2013). Por lo tanto, es relevancia para la región de la Orinoquia emprender investigaciones con sistemas agroforestales

En la búsqueda de estrategias para acelerar el proceso de rehabilitación, se propone trabajar como componente leñoso de los SAFs, especies pioneras que actúen como facilitadoras². La capacidad de estas plantas como facilitadoras y catalizadoras de la rehabilitación, es consecuencia de los cambios generados en las condiciones microclimáticas, en las propiedades del suelo y en las interacciones biológicas ocurridas entre las especies con respecto a las áreas dominadas por los pastos (Cotines & Valcárcel, 2009; Díaz-Martín & Díaz, 2007; Vargas, 2007). Además, las especies pioneras son refugio de pájaros y mamíferos que son los agentes de dispersión de semilla mayores, lo cual refuerza los procesos de rehabilitación ecológica (Cotines & Valcárcel, 2009; Florentine & Westbrooke, 2003).

Con el presente trabajo se pretende: 1) El restablecimiento de servicios ecosistémicos de las áreas riparias (bosques de galería), y específicamente por ahora, cuantificados estos a través de índices de calidad física, química y biológica del suelo y 2) Estimar el potencial dendroenergetico de las especies plantadas, en lo que respecta a la generación de biomasa para leña; y aportar en la construcción de los lineamientos para el manejo y rehabilitación de estos ecosistemas estratégicos en el piedemonte del Meta.

² Por facilitadora se entiende el efecto positivo de una especie o cierto tipo de vegetación sobre el crecimiento, supervivencia y desarrollo de otra(s) especie(s), en comparación con unas condiciones existentes en el ambiente exterior (Díaz-Martín & Díaz, 2007)

5 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se desarrolla en este trabajo de acuerdo a los objetivos que pretende es de tipo experimental.

Al respecto (Arenas, 2006), sustenta lo siguiente: Se trata de un experimento porque precisamente el investigador provoca una situación para introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esa variable, y su efecto en las conductas observadas. El investigador maneja deliberadamente la variable experimental y luego observa lo que sucede en situaciones controladas.

6 MARCO TEÓRICO

En este aparte se incorporan los elementos bibliográficos que contextualizan la investigación:

6.1 LA RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN ECOLÓGICA

La restauración es una herramienta importante que nace a partir del reconocimiento de la degradación en los procesos naturales. Como disciplina se consolidó recientemente; y desde 1985 se plantea el concepto de restauración ecológica en la investigación básica (Jordán III et al. 1987). A finales de la década de los noventa se implementó en investigaciones aplicadas a la rehabilitación y recuperación (MAVDT, 2010).

La Sociedad de Restauración Ecológica (SER) por sus siglas en inglés, generó en 2004 los principios, lineamientos y marco conceptual para el abordaje de los procesos y técnicas adecuadas para restauración ecológica. En ese marco según el objetivo y propósito de restauración del área degradada se definen dos conceptos a tener en cuenta:

RESTAURACION ECOLÓGICA: Es el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema degradado, dañado o destruido. Es una actividad deliberada que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema con respecto a su salud, integridad y sostenibilidad y busca iniciar o facilitar la reanudación de estos procesos, los cuales retornarán el ecosistema a la trayectoria deseada. Para este caso se debe disponer con un ecosistema de referencia, que brinde información del estado a lograr o del estado previo al disturbio, que servirá de modelo para planear un proyecto (SER, 2004).

REHABILITACIÓN: La rehabilitación enfatiza en la reparación de los procesos, la productividad y los servicios de un ecosistema. Comparte con la restauración un enfoque fundamental en los ecosistemas históricos o preexistentes como modelos o referencias, pero las dos actividades difieren en sus metas y estrategias (SER, 2004).

La rehabilitación, comparte con la restauración ecológica el concepto de tener referencia a los ecosistemas históricos, pero difiere en sus estrategias y metas (Bradshaw, 2002). Ésta no implica llegar a un estado original, y se enfoca en el restablecimiento de manera parcial de elementos estructurales o funcionales del ecosistema deteriorado, así como de la productividad y los servicios ambientales que provee el ecosistema, a través de la aplicación de técnicas (Ej. Sistemas Agroforestales -SAF). Es posible recuperar la función ecosistémica, sin recuperar completamente su estructura, en este caso estamos hablando de una *rehabilitación de la función ecosistémica*, muchas veces incluso con un reemplazo de las especies que lo componen (MAVDT, 2010; MAVDT – CONIF, 2003; Vargas, 2007).

Cuando el ecosistema está muy degradado o no puede regenerarse por sí solo o detiene su dinámica natural, es necesario implementar estrategias para lograr su recuperación, en muchos casos, la siembra de árboles nativos o de especies pioneras dominantes y de importancia ecológica o la ayuda con la aplicación enmiendas químicas y orgánicas. A este procedimiento se le denomina *rehabilitación activa o asistida* (MAVDT – CONIF, 2003; León, 2007; Vargas, 2007). Ver Figura 1.

En la rehabilitación de ecosistemas partiendo de pastizales se utilizan muchas estrategias, entre las cuales se destacan (Vargas, 2007): a) manejo de la regeneración natural,

b) utilización de árboles aislados o vegetación remanente presente en el área a restaurar, c) incorporación de árboles de especies pioneras nativas, d) establecimiento de árboles niñeras facilitadoras e) sistemas agroforestales, f) cercos vivos y barreras rompe vientos, g) establecimiento y ampliación de corredores riparios y h) ampliación de bordes de bosque, i) uso de pastoreo para controlar el crecimiento de los pastos y para ayudar a dispersar semillas, entre otras. Las estrategias anteriores están enmarcadas en, la manipulación del ambiente físico y/o químico y/o biológico del suelo y de la vegetación.

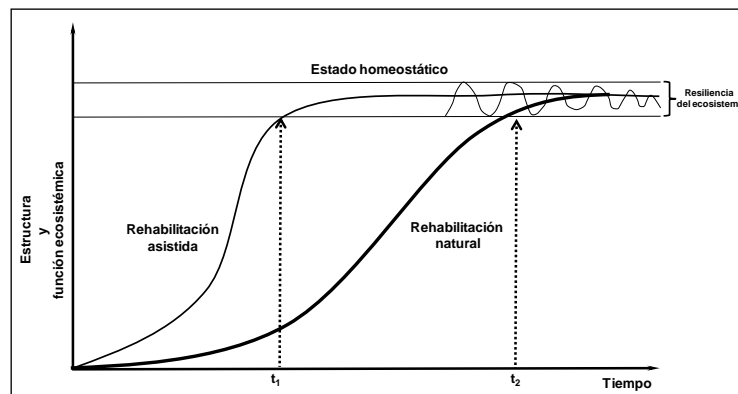


Figura 1. Modelo de la rehabilitación natural y asistida en el proceso de desarrollo de un ecosistema (Fuente: Adaptado y modificado de MAVDT – CONIF, 2003)

Según el (MAVDT, 2010) en Colombia, se han ejecutado 24 proyectos de investigación a pequeña escala en restauración y rehabilitación en áreas degradadas, rehabilitación de cuencas y en ecosistemas estratégicos como páramos, manglares, arrecifes de coral, humedales, ciénagas, lagunas, estuarios y bosque seco. Algunos de los proyectos realizados incluyen implementación de prácticas de control y manejo de tensionantes, montaje de viveros, recolección y selección de semillas, producción y propagación de plántulas, repoblación con especies nativas, enriquecimiento de potreros, regeneración de comunidades

coralinas y enriquecimiento de bordes de quebradas, entre otros; teniendo como objetivo la rehabilitación o restauración de la integridad ecosistémica y de sus bienes y servicios.

6.1.1 Fases para la rehabilitación ecológica de áreas riparias potrerizadas

Aunque no se puede generalizar y concebir un patrón igual para rehabilitar un ecosistema, por la particularidad intrínseca de cada sitio, existen recomendaciones generales apoyadas en bases teóricas y conceptuales de la Restauración Ecológica y en las experiencias acumuladas en los intentos de restaurar diferentes ecosistemas en el mundo.

El MADR, 2010; Vargas & Díaz, 2007, recomiendan los siguientes pasos para realizar una restauración de áreas riparias potrerizadas. Los pasos no necesariamente deben seguir el orden propuesto, todo depende de la particularidad de los sitios, de las escalas y los objetivos propuestos. En la tabla 1, se presentan estos pasos.

Tabla 1. Pasos para la restauración de áreas riparias potrerizadas

PASOS	Observaciones
1. Selección de los sitios.	Precisar el ancho del área riparia; eliminación pastoreo del ganado, protección y aislamiento (cercado) y evacuación inicial de los suelos (Línea Base)
2. Remoción o eliminación de pastos.	Eliminación mecánica o química
3. Enmiendas y fertilización.	En suelos ácidos y con bajos niveles de nutrientes aplicar enmiendas química y realizar fertilización
4. Selección de especies	No existe una especie que reúna la totalidad de atributos deseables para realizar la rehabilitación (Florentine & Westbrooke, 2003; MAVDT – CONIF, 2003), tales como: a) comportamiento social, b) capacidad constructiva, c) sociabilidad, d) amplia cobertura de follaje, e) alta tasa de renovación, f) activa reproducción vegetativa, g) polinización segura, h) mecanismos de dispersión adecuados, i) alta producción de semillas, j) aptitud pionera. El propósito al utilizar diferentes especies en cada tratamiento, es que los recursos disponibles (agua, luz y nutrientes) puedan ser utilizados de la manera más eficiente y que el régimen natural de disturbio pueda ser asimilado por el conjunto de especies que se establecen
5. Conformación de núcleos de facilitación	Establecimiento de arreglos agroforestales
6. Monitoreo	Se toman muestras con el fin de establecer los cambios generados por las especies en el suelo: Valores físico, químicos ; cambios biológicos (macrofauna, actividad microbiana) Las especies plantadas se evalúan en sus tasas de crecimiento, cobertura, sobrevivencia, producción de biomasa.

Fuente: Modificado y adaptado de Vargas & Díaz 2007; MADR, 2010

6.2 SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA REHABILITACION ECOLOGICA

A finales de los años 90, la creciente preocupación internacional sobre los temas ambientales conllevó a nuevos tratados, con énfasis en Servicios Ecosistémicos³ (SE) de usos de tierra alternativos. Rápidamente se reconoció que los Sistemas Agroforestales (SAF) cumplen un papel en la rehabilitación ecológica a través de los servicios que brindan al sistema.

Al referirse a los Sistemas Agroforestales (SAF), el IDEAM (2011:23), los describe como:

La agroforestería es un área interdisciplinaria que incluye interacciones entre árboles, personas y agricultura, manejando una serie de sistemas y tecnologías del uso de la tierra en las que se combinan la producción de cultivos con especies forestales y/o animales, de forma tal que sea posible demostrar una influencia ecológica mutua. Sus diferentes componentes interactúan bioeconómicamente en zonas o mezclados, tanto en ecosistemas frágiles como estables, a escala de campo agrícola, finca o región, en función del tiempo y el espacio sobre la misma superficie de terreno, ya sea de forma simultánea o secuencial.

En general, los SAF favorecen el mantenimiento de los SE por medio de la influencia en el ciclo del agua al incrementar la intercepción de la lluvia, la modificación de la transpiración y la retención del agua en el suelo, la reducción de la escorrentía e incrementando de la infiltración (Stadtmüller, 1994; Velásquez & Jarramillo, 2009). Además, pueden reciclar los nutrientes en forma conservadora, previene su pérdida por lixiviación y evita que la escorrentía superficial (conteniendo sustancias contaminantes) llegue a los cursos de agua, reduciendo la contaminación de las aguas freáticas por nitratos u otras sustancias dañinas para el ambiente y la salud humana. Con la reducción de la escorrentía y lixiviación,

³SE: Son los recursos o procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales incluidos los SAF y las especies que lo conforman sostienen y nutren la vida humana; estos servicios se agrupan en cuatro categorías amplias: aprovisionamiento, tal como la producción de agua y de alimentos; regulación, tal como el control del clima y de las enfermedades; apoyo, tales como los ciclos de nutrientes y la polinización de cultivos, y *cultural*, tales como beneficios espirituales y recreativas (M.E.A., 2005).

las microcuencas con buena cobertura del suelo (forestal o de SAF) producen agua de alta calidad; favorecen la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados (Babbar & Zak 1995; Beer *et al.*, 2003; Stadtmüller, 1994).

Desde el punto de vista biológico, las técnicas agroforestales permiten combinar especies con requisitos ambientales diferentes para mejorar el aprovechamiento de la energía radiante, utilizando tanto el espacio vertical como horizontal. Debido a la estructura vertical proporcionada por los árboles y otras especies leñosas, pueden convivir plantas y cultivos con diferentes requerimientos de luz, protegiendo al suelo de los efectos del sol, el viento y las fuertes lluvias que caracterizan al trópico (Iglesias, 1999; Navia *et al.*, 2003).

Un servicio ecosistémico de los SAF es el secuestro de carbono (C) en suelos y biomasa leñosa sobre y bajo suelo. Si los SAF están bien manejados pueden mejorar la productividad total (Bustamente *et al.*, 1998) y además secuestrar C (Andrade & Ibrahim, 2003; IDEAM, 2011). Igualmente, el mejoramiento del suelo en SAF está vinculado al crecimiento de los árboles fijadores de nitrógeno o de árboles/arbustos de raíces profundas, que aumentan la disponibilidad de los nutrientes a través de la fijación biológica, reciclaje de nutrientes desde capas profundas hacia la superficie del suelo y acumulación de materia orgánica en el suelo (Jaramillo, 2002; Maldonado *et al.*, 2006; Navia *et al.*, 2003).

De otra parte, los SAF proveen hábitat y recursos para especies de plantas y animales, manteniendo la conectividad en el paisaje y reduciendo los procesos de fragmentación, lo que facilita el movimiento de animales, semillas y polen. Esto permite reducir los efectos de

bordes en los fragmentos forestales remanentes o bosques de galería, además de amortiguar áreas protegidas (Schroth *et al.*, 2004).

A continuación se describen las especies gramíneas, forestales y arbustivas utilizadas en los arreglos agroforestales en los diferentes tratamientos.

6.2.1 Especies.

Pastura, conformada por una mezcla (*Brachiaria decumbens* cv. Basilisk) en un 95% y el restante 5% en Pasto grama (*Paspalum* sp.) y arvenses tales como Tote (*Cyperus* sp.) y Dormidera (*Mimosa* sp.) (Figura 2).

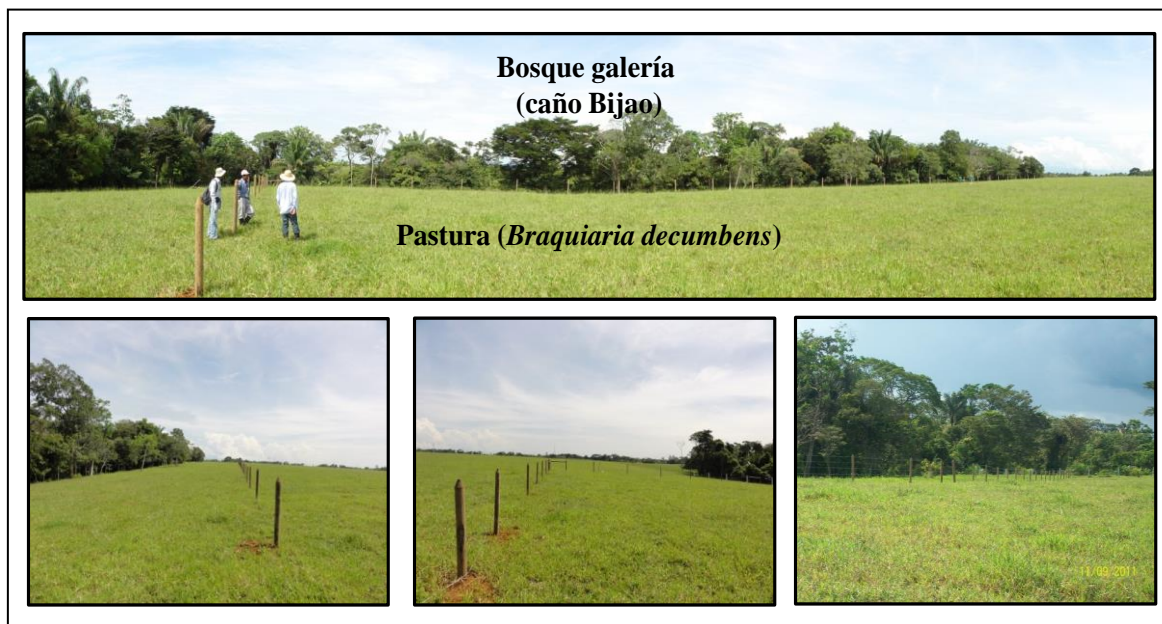


Figura 2. Área en Pastura (*Brachiaria decumbens*) donde se instalaron los tratamientos.

***Brachiaria decumbens* cv. Basilisk.**

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Liliopsida – (Monocotiedónea)
Subclase	: Commelinidae
Familia	: Poaceae
Género	: <i>Brachiaria</i>
Especie	: <i>Brachiaria decumbens</i>
Variedad Cultivada	: Basilisk
Nombres comunes	: Pasto amargo, pasto peludo, pasto braquiaria.

Es una gramínea tropical perenne, de origen africano, es una planta vigorosa y agresiva, que puede alcanzar hasta 1.2 m de altura cuando no se pastorea. Tiene los tallos rastreros y tendidos sobre el suelo, sus ápices se encuentran erguidos verticalmente y los nudos enraízan con facilidad. Es un cultivo adaptado a condiciones tropicales calientes y húmedas. Se adapta bien a suelos ácidos e infértiles, sin embargo, posee gran potencial de respuesta con mejoras del nivel de fertilidad del suelo. Tiene la capacidad de formar pastizales que toleran el pisoteo y pastoreo intenso y continuo, pero es muy susceptible al ataque del “mión o salivazo” (*aeneolamia sp*). Crece bien entre los 400 y 1800 msnm, con una precipitación de 1000 a 3500 mm/año y temperaturas superiores a 10 19° C. (Miles *et al.*, 1998; Rincón *et al.*, 2010).

***Piptadenia opacifolia* Ducke.**

Sinónimo	: <i>Piptadenia pteroclada</i> Benth
Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Fabales
Familia	: Leguminosae-Mimosoideae
Género	: <i>Piptadenia</i>
Especie	: <i>Piptadenia opacifolia</i>
Nombres comunes	: Yopo, yopa, falso yopo, guayacán yopo.

Yopo (*Piptadenia opacifolia* Ducke), árbol que crece hasta 25 m. y presenta un diámetro de 50 cm. Hojas bipinadas, alternas, helicoidales con estípula y sin exudado. Flores de colores blancos y dispuestas en espigas axilares. Fruto en legumbre aplanada y dehiscente; tiene corteza escamosa, es una especie muy común en potreros (ver Figura 3). El Yopo es considerado como una de las especies dendroenergéticas más importantes de los llanos orientales. Es una especie de rápido crecimiento, fijadora de nitrógeno que presenta rebrote radicular, característica muy importante para ser utilizada en la recuperación de suelos, en sistemas agroforestales, como sombrío y como cerca viva. Presenta una madera dura de color rojizo (Carvajal *et al.*, 2007).

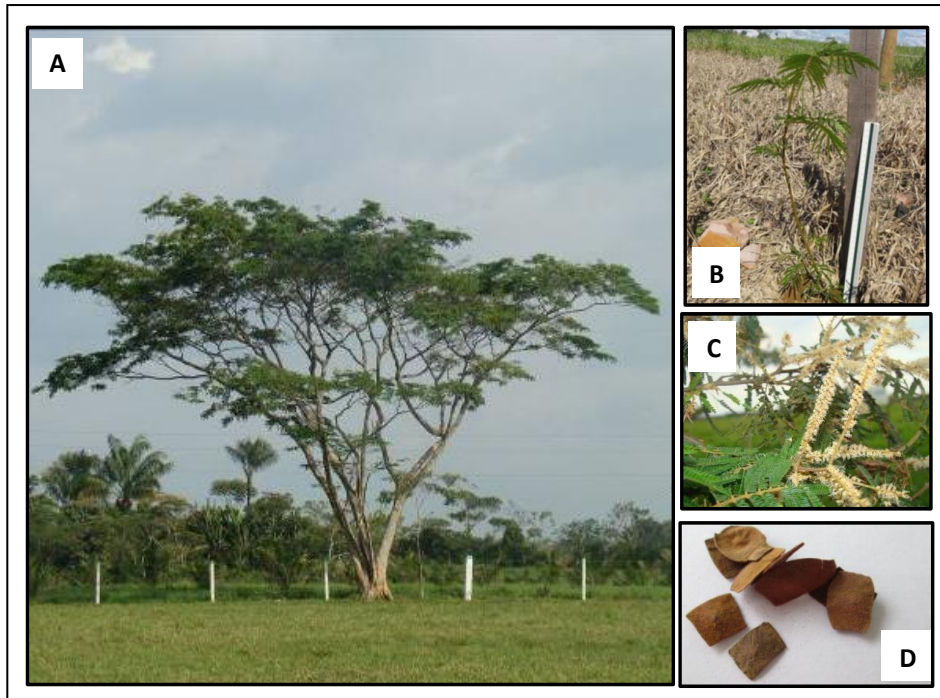


Figura 3. Yopo (*Piptadenia opacifolia* Ducke). A) Árbol, B) Plántulas establecidas en el experimento, C) Floración y D) Semillas.

***Cassia moschata* Kunth.**

- Reino : Plantae
- División : Magnoliophyta
- Clase : Magnoliopsida
- Orden : Fabales
- Familia : Caesalpiniaceae
- Género : Cassia
- Especie : *Cassia moschata*
- Nombres comunes : Carao amarillo, cañafistola, caña fistol llanero.

Cañafístol (*Cassia moschata* Kunth), árbol de 12 a 20 m. de altura y 60 a 80 cm de diámetro, de fuste redondo y copa aparasolada; hojas compuestas, paripinadas, alternas, helicoidales, con estipulas libres y de 8 a 20 pares de folíolos. Flores amarillas dispuestas en inflorescencias tipo racimo pendular. Frutos en legumbre indehisciente, cilíndrica de color negro y sabor dulzón. La madera es utilizada en la construcción de postes para cerca, columnas y botalones por su alta durabilidad natural; especie muy común en potreros para sombrío del ganado (Carvajal *et al.*, 2007); se encuentra creciendo en los bosques de galería o riparios.

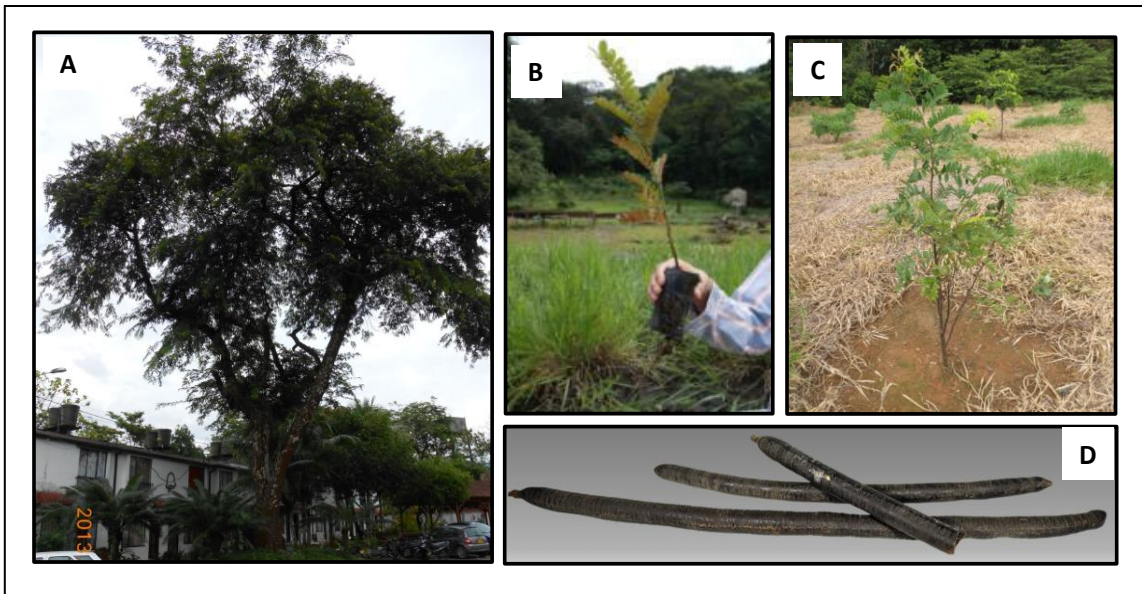


Figura 4. Cañafístol (*Cassia moschata* Kunth). A) Árbol, B) Plántulas vivero, C) Árbol en la parcela y D) frutos

***Inga edulis* Mart.**

Sinónimo	: <i>Feuilleea edulis</i> (Mart.) Kuntze, <i>Inga benthamiana</i> Meisn., <i>Inga edulis</i> var. <i>grenadensis</i> Urb., <i>Inga minutula</i> (Schery) T.S. Elias.
Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Fabales
Familia	: Leguminosae
Subfamilia	: Mimosoideae
Género	: <i>Inga</i>
Especie	: <i>Inga edulis</i>
Nombres comunes	: Guamo, rabo de mono, guamo churibo

Guamo (*Inga edulis* Mart.), árbol que crece hasta los 30 m. de altura y diámetro de 30 a 60 cm., presenta fuste recto y cilíndrico, la corteza color marrón claro lenticelada. Hojas compuestas, paripinadas, de 15 a 25 cm de longitud; raquis alado con glándulas en forma de cráter entre los foliolos. Las inflorescencias en racimos terminales, con flores de color blanco. Frutos son legumbres comestibles de 40 a 180 cm de largo, color café verduscas, profundamente estriadas, carnosas (Carvajal *et al.*, 2007).

Árbol adaptado a los climas tropicales y subtropicales en las zonas con temperaturas medias iguales o superiores a 20 °C y la precipitación entre 1.000 y más de 5.000 mm; también se adaptada a suelos ácidos con alta saturación de aluminio y un pH bajo (Villachica,

1996). Prolifera en suelos oxisoles pobres, resiste la sequía y el frío, y se encuentra en altitudes de hasta 1.500 metros en los Andes (Da Silva & Pastore, 2011).

Usada principalmente como árbol de sombra en diversos sistemas agroforestales, de fácil germinación por semilla, rápido crecimiento, capacidad de fijar nitrógeno, adaptabilidad a una amplia variedad de suelos incluyendo ácidos y mal drenados, producción de mulch de lenta descomposición (control de malezas, liberación lenta de nutrientes y conservación de la humedad del suelo), atracción de hormigas que defienden la planta contra herbívoros y la posibilidad de ser combinada con otras especies del género para producir diversidad. Se ha utilizado también para mejoramiento de pastos y en huertos caseros. La madera es usada como leña por su alto poder calórico, los frutos son consumidos por mamíferos y aves (Carvajal *et al.*, 2007; CATIE, 2003).



Figura 5. Guamo (*Inga edulis* Mart). A) Planta, B) Arboles en parcela en campo y C) Fruto

***Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray.**

Sinónimo	: <i>Mirasolia diversifolia</i> Hemsl
Reino	: <i>Plantae</i>
División	: <i>Magnoliophyta</i>
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Campanulales
Familia	: Compositae
Género	: <i>Tithonia</i>
Especie	: <i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) Gray
Nombres comunes	: Botón de oro, mirasol, Girasol forrajero

Tithonia o Girasol Forrajero (*Tithonia diversifolia* (Hemsl.)), hierba de hasta 4 m. de altura, de hojas alternas, pecioladas, de 7 a 20 cm de largo por 4 a 20 cm de ancho. Inflorescencia una cabezuela o capítulo, rodeado de un involucre de brácteas de color verde. Flores de la periferia unicelulares pistiladas y su fruto es un aquenio de 4 a 6 mm de largo. La dinámica de crecimiento de la especie en los sitios donde crece naturalmente se caracteriza por ser una especie heliófila, pionera, de sucesión temprana, con alta capacidad de absorción de fósforo (Figura 6). El Girasol Forrajero presenta una producción de forraje entre 7.098 a 18.374 kg/ha/año de biomasa seca, en suelos de sabana y vegas respectivamente; y presenta contenido de proteína entre el 12 y 15.3%. Teniendo en cuenta la alta producción, calidad y aceptación por el ganado esta especie se considera una excelente alternativa como fuente de alimentación para animales a través del año, dado que permite ser cosechado en promedio cada 60 días (Sánchez *et al.*, 2002).

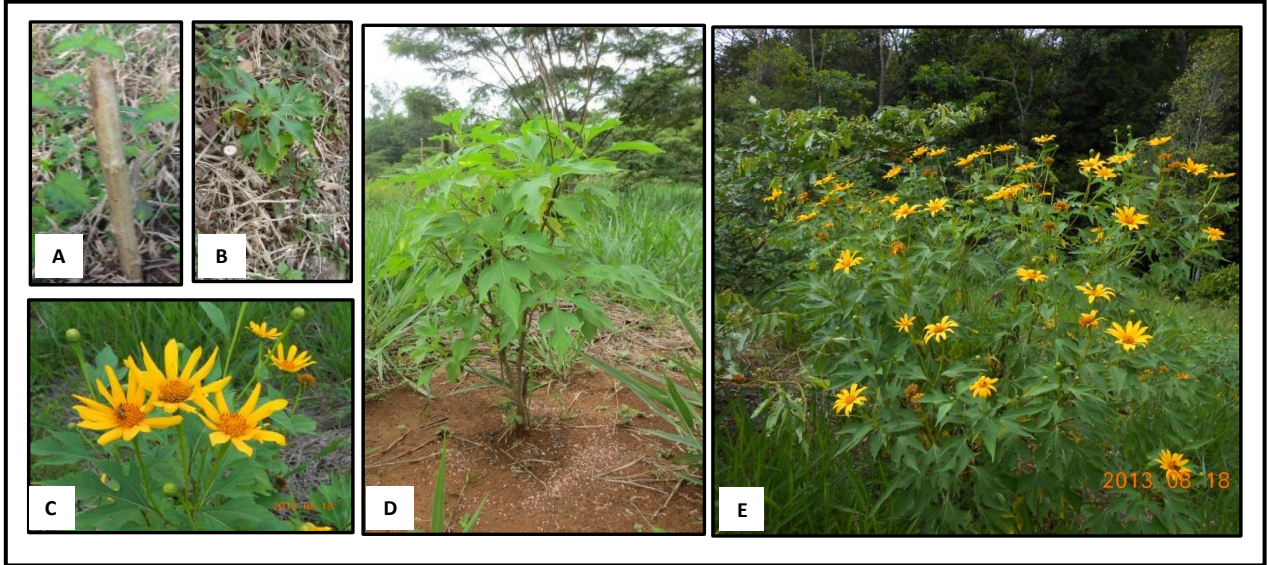


Figura 6. Botón de oro (*Tithonia diversifolia* (Hemsl) Gray). A y B: estacas, C: Flores y D y E: Plántulas establecidas en campo.

6.3 CALIDAD DEL SUELO

En este caso el concepto de calidad del suelo se define considerando sus propiedades intrínsecas, así como su capacidad productiva y de amortiguadores ambientales.

En este contexto, la calidad del suelo es la habilidad o capacidad del mismo para cumplir varias funciones y se puede representar por una serie de propiedades físicas, químicas y biológicas que a su vez promueven un medio para el crecimiento de las plantas y para la actividad biológica, regulan el flujo y el almacenamiento del agua en el ambiente y sirven como buffer en la formación y destrucción de compuestos ambientalmente riesgosos (Babbar & Zak 1995; Navarrete *et al.*, 2011; Stadtmüller, 1994; Wilson *et al.*, 2008).

Al emplear la calidad del suelo como herramienta para evaluar los servicios ecosistémicos es necesario tener en cuenta las escalas espacio temporales, las cuales dependen de las propiedades asociadas con los factores formadores y de las propiedades dinámicas, que pueden ser afectadas por acciones antrópicas, dado que el recurso suelo y los ecosistemas que soporta (ej. SAF), son dinámicos en el espacio y en el tiempo, lo cual acarrea limitaciones e incertidumbres acerca del conocimiento que de éstos suelos se tenga (García, 2008; Imaz *et al.*, 2010).

6.3.1 Indicadores de calidad del suelo

Un indicador de calidad de suelos es una herramienta de medición que suministra información sobre las propiedades, procesos y características del mismo. Los indicadores de la calidad del suelo, se centran en el estudio y observación de los cambios suscitados a nivel de los 10 cm superficiales del suelo, con relación al uso y manejo del mismo; y se miden con base en los comportamientos registrados de algunas propiedades físicas, químicas y biológicas, que pueden ser medidas cualitativa o cuantitativamente y que proveen pistas acerca de que tan adecuadamente un suelo responde a actividades de uso o intervenciones preestablecidas (Imaz *et al.*, 2010).

Las propiedades de los suelos no son estáticas sino que varían con el tiempo, debido a factores que determinan su formación como el clima, el material parental, los organismos que lo habitan, las actividades humanas, entre otros. Dichos cambios sobre el suelo se producen de manera progresiva en el tiempo. Por lo tanto, no existe una sola medida física, química o biológica para valorar el estado de salud y calidad de un suelo (García, 2008; Imaz *et al.*, 2010).

De acuerdo (Astier *et al.*, 2002 y Barrios *et al.*, 2001), un indicador de la calidad del suelo debe identificar un conjunto de propiedades del suelo, de acuerdo a los siguientes criterios: explicar los procesos del ecosistema; integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y sus procesos; ser sensible a los cambios de manejo en un período de tiempo relativamente corto y a variaciones climáticas; y cuando sea posible formar parte de una base de datos ya existente. Además deben ser relativamente económicos, precisos, fácil de medir e interpretar; prácticos y de utilidad para ser aplicados en diferentes condiciones.

Al estudiar la calidad de un suelo se debe fijar las funciones para las que se quiere evaluar su calidad. Un suelo destinado a uso agroforestal necesita: I) Características físicas adecuadas que permitan la infiltración del agua, la retención de humedad , el desarrollo de radicular, entre otras; II) Características químicas que determinan la fertilidad del suelos, con capacidad de suministrar los nutrientes necesarios para el desarrollo especies vegetales y III) Una adecuada biota (micro y macro fauna) del suelo, conformada por diversos organismos que colectivamente intervienen en los ciclos de nutrientes, regulan la dinámica de la materia orgánica, regulan la emisión de gases invernadero y modifican la estructura física del suelo (Melém-Junior, 2009; USDA, 1999). Por tanto, serán estas funciones que habrá de estudiar, y se deberá conocer cuáles son los parámetros o indicadores que reflejan la capacidad de un suelo para desempeñar o restablecer sus funciones (Imaz *et al.*, 2010; Navarrete *et al.*, 2011).

6.3.2 Indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo

6.3.2.1 Indicadores físicos de la calidad del suelo

Los indicadores físicos empleados en las evaluaciones de la calidad del suelo se relacionan, por un lado, con propiedades que muestren como el suelo acepta, retiene y proporciona agua a las plantas y por otro lado, a las condiciones que limitan el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración y el movimiento del agua dentro del perfil y promover el intercambio óptimo de gases; estos indicadores corresponden a las propiedades físicas tales como: textura, densidad aparente, agua disponible en el suelo, y porosidad (Navarrete *et al.*, 2011; Nortcliff, 2002).

Textura

Se refiere específicamente a las proporciones relativas en que se encuentran en una masa las partículas de diámetro menor a 2 mm; estas partículas, llamadas separados, se agrupan en tres clases: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar). La textura del suelo es una propiedad física usada como criterio importante para evaluar otras propiedades, como son la capacidad de retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo a partir de su influencia en el tipo de estructura, la cantidad y tamaño de poros (IGAC, 1990; Jaramillo, 2002; Montenegro y Malangón, 1990, Navarrete *et al.*, 2011).

Densidad aparente

La densidad del suelo se considera una característica física fundamental del suelo; y se entiende como, la relación entre una masa de suelo seca al horno de las partículas del suelo y el volumen total que ocupa dicho suelo incluyendo el espacio poroso. Esta medida tiene varios

usos entre los cuales se destacan transformar porcentajes de humedad gravimétrico a volumétricos, calcular la porosidad total, estimar el grado de compactación del suelo (Montenegro & Malagón, 1990).

Contenido de humedad en el suelo

El agua afecta intensamente muchas reacciones físicas y químicas del suelo, igualmente el contenido o la retención del agua en el suelo, afectan el crecimiento de las plantas (Barcelo *et al.*, 1992; Montenegro & Malagón, 1990). Otras propiedades mecánicas del suelo que también dependen de la humedad de este son: la compactación y la penetrabilidad; el contenido de aire en el suelo, está gobernado por el contenido de agua, lo que a su vez afecta los fenómenos de respiración, la actividad de microorganismos y el potencial de óxido reducción, entre otros.

Porosidad total

La porosidad total refleja las condiciones del suelo para retener y transmitir agua y permitir el movimiento del aire dentro del suelo; y esta a su vez se divide en: Macro, meso y microporos (Montenegro & Malagón, 1990). En donde: a) Los macroporos, son poros grandes que no retienen agua pero sirven para dar aireación al suelo, por ellos crecen las raíces; b) Los mesoporos, en estos se almacena el “agua aprovechable” por las plantas, por lo tanto de su presencia y abundancia depende la nutrición constante y equilibrada de los cultivos y c) Los microporos, no son importantes desde el punto de vista del agua porque son demasiado pequeños, pero en ellos se realizan las reacciones de reducción del Fe (Hierro) y del Mn (Manganeso), los cuales son esenciales y asimilables en forma reducida.

Los suelos mantienen la humedad de acuerdo al tamaño de poros y la tensión (Ψ) que sobre ellos se hace, que se relacionan con la biota del suelo como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación entre la porosidad, tamaño y los componentes del suelo.

ITEM	POROSIDAD		
	Microporos	Mesoporos	Macroporos
Tamaño	10-10 (Å) a 10-7 (nm)	10-7 (nm) a 10-5 (μm)	10-5 (μm) a 100 (mm)
Tensión	$\Psi > 15$ bar	15 bar $< \Psi < 0.1$ bar	$\Psi < 0.1$ bar
Agua en el suelo	Higroscópica	Agua disponible por las plantas (Capacidad de campo)	Agua gravitacional
Biota	Organismos moleculares Polisacáridos Sustancias húmicas Virus	Bacterias Hongos Hifas Raíces adventicias (cabellos)	Raíces Mesofauna Gusanos (lombrices de tierra)

Fuente: Adaptado y modificado de Horn & Lebert, 1994.

6.3.2.2 Indicadores químicos de la calidad del suelo

Las propiedades químicas propuestas como indicadores de la calidad de suelo, son aquellas que inciden en la relación suelo-planta como es la disponibilidad de nutrimentos para las plantas. Los indicadores que reflejan estándares de fertilidad son pH, MO, N, el fósforo (P) y potasio (K) importantes en términos de producción de cultivos; igualmente son importantes las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos como el Aluminio (Al) y Manganeseo (Mn) (Doran & Parkin, 1994; Navarrete *et al.*, 2011; Nortcliff, 2002).

Es importante considerar que una de las dificultades en la utilización de las propiedades químicas como indicadores de la calidad del suelo es su alta variabilidad estacional y espacial (Nortcliff, 2002).

6.3.2.3 Indicadores biológicos de la calidad del suelo

La importancia de la evaluación de las propiedades biológicas del suelo se relacionan estrechamente con la descomposición de la materia orgánica derivada de los residuos

vegetales y animales, así como del reciclaje de la misma, ya que los subproductos de su acción influyen de forma directa en las propiedades físicas y químicas de los suelos; generalmente se refieren a la abundancia y subproductos de los organismos, incluidos bacterias, hongos, nematodos, lombrices, anélidos y artrópodos (Astier-Calderon *et al.*, 2002).

Las propiedades biológicas del suelo son muy dinámicas por lo que tienen la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o de mejoría del suelo, su sensibilidad al estrés ambiental y su fácil de medición. Se consideran como indicadores biológicos: la macrofauna y la respiración del suelo; estos parámetros son valiosos en la interpretación de la dinámica de la materia orgánica y los procesos de transformación de los residuos orgánicos. Además, dan rápida respuesta a los cambios en el manejo del suelo (Doran & Parkin, 1994).

Macrofauna del suelo

Se determina como macrofauna del suelo al conjunto de organismos heterótrofos invertebrados, que viven en el suelo y cuyos tamaños superan los 2 mm. Su manera de vivir, sus hábitos alimenticios, sus movimientos en la tierra, las excreciones y su muerte tienen impactos directos e indirectos en su hábitat (suelo). Las actividades biológicas de la macrofauna regulan la fertilidad y procesos del suelo de una manera significativa (Ruiz *et al.*, 2008).

Estos se clasifican en grupos funcionales según sus hábitos del alimento y su distribución en el perfil del suelo. Los grupos que a continuación describen son uno de los componentes de la macrofauna del suelo más importante y son definidos como “los ingenieros ecológicos” o “diseñadores de ecosistemas” (Moreira *et al.*, 2012), entre estos se encuentran

las lombrices de tierra, termitas y hormigas, los cuales se distinguen por su capacidad de excavar la tierra y por la producción de una gran variedad de estructuras órgano-minerales, como las excreciones, los nidos, los montones de tierra, macroporos, galerías y cavernas las cuales se han descrito como “estructuras biogénicas”; y se argumenta que el papel funcional de estas es importante porque representan sitios dónde ciertos procesos pedológicos ocurren como son los estímulos de la actividad microbiana; la formación de estructura de la tierra; la dinámica de la materia orgánica del suelo (SOM_Soil Organic Matter); el intercambio del agua y gases (Lavelle et al. 1994; Moreira *et al.*, 2012; Ruiz et al. 2008; Swift & Bignell, 2001).

En la macrofauna se destacan:

1) Lombrices de tierra: Con su influencia sobre la porosidad del suelo y nutrición del suelo relacionada por la ingestión de materia mineral u orgánica.

2) Las termitas influyen a) la porosidad de la tierra y textura a través de los túneles, la ingestión y transporte de suelo y la construcción de galerías; b) El ciclo de nutrientes a través de transporte, disgregación y digestión de la materia orgánica (Ruiz et al. 2008).

3) Las hormigas modifican la estructura física del suelo, a través de la creación de sistemas de galerías y cámaras; esta actividad en el suelo influye en la porosidad, aeración, infiltración y drenaje interno del suelo y crean los hábitats para organismos más pequeños; las actividades de hormigas también pueden influir en la química del suelo aumentando las cantidades de materia orgánica, P, K y N en los montones de tierra (Ruiz et al. 2008).

Actividad microbiana

La biomasa microbiana⁴ del suelo es un componente que controla funciones claves como son la descomposición y acumulación de materia orgánica y la transformación de nutrientes para las plantas; la biomasa microbiana también representa una reserva considerable de nutrientes que continuamente es aprovechada en los ciclos de crecimiento de los componentes vegetales de un ecosistema (Melém-Junior, 2009).

La respiración es la producción de dióxido de carbono (CO₂) como resultado de la actividad biológica en el suelo, realizada por microorganismos, raíces vivas, y macroorganismos tales como lombrices, nemátodos o insectos. La actividad de organismos en el suelo es considerada como un atributo positivo para la calidad del suelo, por tanto la evolución del CO₂ en el sistema suelo se utiliza para determinar indirectamente índice de actividad microbiana, que permite la caracterización biológica de ecosistemas naturales e intervenidos (Ferreiro, 2006; García *et al.*, 2003; USDA, 1999).

6.3.3 Índices de calidad física, química y biológica del suelo.

Índice, es la expresión numérica de la relación entre dos o más indicadores, referentes a un mismo fenómeno. Se han desarrollado listas de indicadores e índices de uso "universal" pensando en todas las situaciones posibles y todos los suelos posibles (Doran & Parkin, 1994; FAO, 2001; SQI, 1996; USDA, 1999; Larson y Pierce, 1991).

⁴ La biomasa microbiana del suelo (BMS), es definida como la parte viva de la materia orgánica del suelo, compuesta por todos los organismos menores de 5x10³ μm³, como hongos, bacterias, actinomicetos, levaduras y otros componentes de la macrofauna (Baquero, 2009)

Entre los trabajos más recientes de investigación donde se han desarrollado indicadores e índices de calidad se tienen:

Cantú *et al.*, 2007 realizaron un trabajo cuyo objeto fue desarrollar y aplicar un set mínimo de indicadores del estado del recurso suelo para evaluar la calidad del suelo en agroecosistemas localizados en la cuenca del arroyo La Colacha provincia de Córdoba - Argentina. Las propiedades medidas y seleccionadas como indicadoras fueron (carbono orgánico, pH, saturación de bases, agregados estables en agua, velocidad de infiltración, densidad aparente y el espesor horizonte A). Para valorarlas establecieron cinco clases de calidad del suelo distribuidas entre (0.00 y 1.00) a partir de los cuales se normalizaron los indicadores. El índice de calidad del suelo obtenido mediante este set mínimo de indicadores fue de ICS: 0.47, y la variable con más influencia en este valor del el índice fue el carbono orgánico (CO).

Velásquez *et al.*, 2007 en una investigación realizada en una región de ladera de Nicaragua , con el mismo tipo de uso de la tierra generaron un indicador de la calidad del suelo que evaluó los servicios del ecosistema del suelo a través de un conjunto de 5 sub-indicadores (calidad física, la fertilidad química, existencias de materia orgánica, la agregación y la morfología del suelo y la biodiversidad de la macrofauna del suelo) y los combina en un solo índice general de la calidad del suelo (GISQ- por sus siglas en ingles). Utilizaron la información derivada de las 54 propiedades de uso común para describir los diversos aspectos de la calidad del suelo. Donde obtuvieron que las plantaciones de café, barbechos, pastizales y bosques tuvieron los valores más altos de GISQ de 1.00; 0.80; 0.78 y 0.77, respectivamente, en tanto que los cultivos de maíz y suelos erosionados con 0.19 y 0.10, presentaron los valores

más bajos. Igualmente los valores de los sub-indicador tales como: materia orgánica; agregación y la morfología del suelo y la biodiversidad de macrofauna; permitió la evaluación de los diferentes sistemas de producción teniendo los valores máximos en las plantaciones de café (0,89; 0.72 y 0.56, respectivamente), mientras que los suelos erosionados tuvieron los más bajos los valores para estos sub-indicadores (0.10; 0.31 y 0.33, respectivamente).

Campitelli *et al.*, en 2010 realizaron un trabajo cuyo objetivo fue determinar los indicadores que mejor representan la calidad de un suelo del área central de la provincia de Córdoba, donde evaluaron seis tratamientos, y utilizaron análisis de componente principales para evaluar la relación existente entre parámetros de suelo medidos. Los resultados de este estudio mostraron que los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos están relacionados con la fertilidad de los mismos en términos de: materia orgánica (MO y sus fracciones); nitrógeno total NT; fósforo extractable (PE) y de la susceptibilidad a la erosión de los suelos medida está en términos de: cambio en el diámetro medio ponderado de agregados (CDMP), profundidad del carbonato de calcio (CO₃Ca) y espesor del horizonte superficial (HzA). Estos autores encontraron que en la medida que se prolongan los años de agricultura y se incrementan las prácticas en monocultivo y siembra convencional de la soja, se evidencia el deterioro de la calidad del suelo por la disminución de los contenidos de CO y sus fracciones, macronutrientes (NT y PE) y el aumento en la susceptibilidad a la erosión hídrica del suelo, en relación a los sitios bajo bosque nativo que son los que presentan el máximo potencial.

En esta misma dirección, Rodríguez *et al.*, en 2013 desarrollaron un proyecto donde compararon los cambios de las propiedades físicas, químicas y biológicas en el suelo, la

emisión de gases de efecto invernadero y la producción de biomasa aérea, para lo cual construyeron 6 sub-indicadores (fertilidad química, funciones hídricas, estabilidad estructural del suelo, biodiversidad, regulación de emisiones y almacenamiento de carbono y regulación climática) utilizando el análisis de componentes principales (ACP), que permitieron evaluar la eco-eficiencia de cuatro sistemas productivos de la Altiplanura plana del departamento del Meta: palma, caucho, cultivos transitorios (arroz, maíz y soya) y pastura mejorada con respecto a la sabana natural. Ellos encontraron que cada sistema de uso tiene la capacidad de mejorar, por lo menos, uno de los servicios ecosistémicos medidos, cada uno de los indicadores generados separó los sistemas de uso de forma significativa; mientras que la pastura mejorada incrementa la biodiversidad de la macrofauna edáfica y la agregación del suelo, la palma de aceite favorece las funciones hídricas del suelo y el almacenamiento de carbono (C), y los cultivos anuales mejoran la calidad química del suelo.

La mayoría de los estudios sobre la calidad del suelo están centrados en la identificación de indicadores que permitan evaluar la calidad del suelo en un momento determinado. Sin embargo las investigaciones indican que esta temática es bastante compleja, ya que se necesita de la integración de propiedades físicas, químicas y biológicas, además de su dinámica en tiempo y espacio, así como el nivel de escala donde se aplicará (finca, cuenca, región, etc.). Siendo por lo tanto bastante complejo el seleccionar un conjunto de propiedades que permitan establecer indicadores con los cuales se cubran todas las condiciones para valorar adecuadamente la calidad del suelo a través de la construcción de un índice. De ahí que los indicadores seleccionados e índices generados no son extrapolables, ni comparables entre regiones, solo la metodología empleada para su selección puede ser utilizada con igual fin en cualquier lugar.

Es importante mencionar que el análisis de componentes principales ha sido empleado por diversos investigadores para obtener variables indicadoras e índices de calidad de suelo como por ejemplo: Velásquez *et al.*, (2007), Tasi *et al.*, (2007) y Wilson *et al.*, (2008), y Rodríguez *et al.*, (2013); quienes han trabajado en suelos de Cauca, Colombia y Entre Ríos, Argentina y Meta (Altillanura) respectivamente, pero es muy difícil tratar de comparar sus indicadores con los que se obtuvieron en esta investigación, ya que si se presenta algunos en común, otros no han sido seleccionados, o sencillamente han seleccionados otros que no fueron evaluados en este trabajo (ej. conductividad eléctrica, estabilidad de agregados, resistencia a la penetración). Estas diferencias se deben principalmente a las condiciones edafológicas y climáticas contrastantes de las zonas de estudio como al tipo de sistema de uso y al manejo agronómico. Por lo tanto los indicadores seleccionados no son extrapolables, ni comparables, solo la metodología empleada para su selección puede ser utilizada con igual fin en cualquier lugar.

6.4 ANALISIS FUNCIONAL DE CRECIMIENTO Y CONSUMO DE LEÑA, DENDROENERGIA

El análisis funcional de crecimiento según Hunt *et al.*, 2002 es una aproximación cuantitativa, que usa datos simples y básicos, para la descripción e interpretación de las plantas que crecen bajo ambiente natural. Este análisis usa medidas directas tales como altura, diámetro y tiempo, y medidas derivadas como son la tasa de crecimiento relativo (TCR), incrementos medios anuales (IMA), entre otras (Barrera *et al.*, 2010; Villar *et al.*, 2004).

El modelo de crecimiento se genera a partir de una curva ajustada a un modelo no lineal de tipo sigmoidea, logístico, entre otros. Los parámetros de elección del modelo

apropiado están dados por el grado de ajuste del modelo o R^2 . La determinación del modelo apropiado se procesa por medio de paquetes estadísticos (ej. CurveExpert). Una vez obtenida la curva ajustada o función, se procede a su derivación con lo cual se calculan los índices de crecimiento (Barrera *et al.*, 2010; Villar *et al.*, 2004).

El crecimiento en el campo es dependiente de la variación genética y de las condiciones ambientales (relación planta-suelo-atmósfera), por ello se requiere tomar alto número de muestras para acercarse a la medida real del crecimiento de las plantas en una población. Medidas de altura de la planta, diámetro del tallo, aumento de volumen, diámetro a la altura del pecho DAP, permitirán realizar el análisis de crecimiento (Barrera *et al.*, 2010).

6.5 CONSUMO DE LEÑA, DENDROENERGIA

De los combustibles vegetales el de mayor demanda a nivel mundial es la leña, el consumo de leña para Colombia en el 2009 fue de 10547 miles de m^3 (FAO, 2011) y el uso principal fue para cocción y calefacción (FAO, 2008; Prias, 2010). Específicamente en el departamento del Meta, se estima que en los asaderos en total se consume 30 (ha/año) de madera perteneciente a las especies de yopo (*Anadenanthera Peregrina* y *Piptadenia opacifolia*), la cual se obtiene de los bosques localizados en las riberas de los cauces de agua o de los bosques de galería (CORPOICA, 2010)

Lo anterior, supone una dependencia de los combustibles leñosos por parte de las comunidades rurales, que tiende a comprometer la seguridad energética de las mismas, en la medida que la base de los recursos forestales se agoten vertiginosamente, por ende, es menester concientizar a los pobladores rurales sobre la imperiosa necesidad de asegurar el

abastecimiento sostenido de leña mediante la siembra de árboles orientados a propósitos energéticos a través de esquemas domésticos, lo cual, de paso contribuye a reducir la presión existente sobre los bosques naturales o bosques de galería y sus consecuentes efectos sobre la biodiversidad, la regulación hídrica y las emisiones de gases de efecto invernadero (Aristizabal, 2008; FAO, 2008)

La producción de leña a escala domestica debe considerar ciertos criterios de planificación que garanticen la autosuficiencia de los núcleos familiares en determinado rango de tiempo, los cuales, se dan en función de la demanda anual de leña, el consumo promedio de leña es de 100 kg/ persona-mes, que es equivale 4.8 t/año para un grupo familiar de 4 personas (Aristizabal, 2008; FAO, 2008; Mejía, 2011).

Para determinar el marco temporal de productividad del banco dendroenergético, es esencial considerar aspectos cruciales como el ritmo de crecimiento de la especie forestal utilizada, puesto que se debe predecir en qué momento estará disponible la cantidad apropiada de leña a ser aprovechada por parte de la familia de tal manera que se garantice un aprovisionamiento sostenible en el tiempo. Otro aspecto a tener en cuenta es que el banco dendroenergético debe ser establecido lo más cerca posible a la vivienda del núcleo familiar, o en aquellas áreas marginales de la finca que no se dediquen a actividades productivas o en su defecto se recomienda analizar la incorporación del banco de leña en arreglos agroforestales, que puedan conciliar el uso agrícola ó pecuario con el componente silvícola.

La distribución del banco dendroenergético se encuentra supeditado a la disponibilidad de una superficie adecuada para este propósito. Dependiendo de la especie forestal a utilizar, el área requerida para la siembra de árboles puede fluctuar de 0.3 a 3 hectáreas.

7 MÉTODOLOGIA

7.1 LOCALIZACION Y CARACTERISTICAS AREA DE ESTUDIO

7.1.1 Localización

Se seleccionó el sitio en Centro de Investigaciones Área de Sostenibilidad Ambiental -ASA perteneciente a CORPOICA - ECOPETROL; el cual se localiza en la Inspección de San Isidro de Chichimene del municipio de Acacias en el Departamento del Meta. Su ubicación geográfica se encuentra entre las coordenadas $03^{\circ}53'36,74''$ - $03^{\circ}53'04,21''$ de latitud Norte y $73^{\circ}35'04,23''$ - $73^{\circ}35'35,89''$ de longitud Oeste, con una altura de 385 m.s.n.m. Al ASA se accede por varias rutas, siendo la más común la que conduce de la zona urbana de Acacias hacia la cabecera de la Inspección de San Isidro de Chichimene (Figura 7).

ECOPETROL con la necesidad de minimizar el efecto de la industria petrolera en el entorno natural en donde se localizan sus acciones, en alianza con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-CORPOICA, realizan actividades de investigación en la generación de recomendaciones de manejo para la utilización de las aguas asociadas a la producción de hidrocarburos en la producción agrícola, para lo cual se identifican y domesticar especies forestales con potencial de producción dendroenergética y agroindustrial; y el manejo predial aplicando principios de conservación y restauración ambiental de las áreas riparias de los bosque de galería, asociadas a los cursos de agua que circundan al predio. En este contexto se inscribe esta investigación, que si bien para efectos de este trabajo se concentra en indagar en el aspecto suelos y potencial dendroenergético de algunas especies

arbóreas en un lapso de tiempo, establecidas en el área riparia (bosque de galería) del caño Bijao.

7.1.2 Caracterización climática área de estudio

El predio se encuentra en un clima superhúmedo medio (Gobernación del Meta & IGAC, 2004), de acuerdo con los datos registrados en la estación climática localizada en el ASA⁵; en el predio se presenta una precipitación promedio de 2901 m.m de lluvia año, temperaturas medias multianual entre 21.8°C y 30.7°C, humedad relativa medias multianuales entre 97 y 57%; en cuanto al balance hídrico, la época de déficit (evaporación > precipitación), está comprendida entre mediados de diciembre hasta mediados de marzo y durante el resto del año (8 meses) se presentan excesos de lluvias (Figura 8).

7.1.3 Caracterización edáfica área de estudio

El área de estudio está localizada en un piedemonte deposicional, en paisaje de terrazas coluvio-aluviales en sedimentos mixtos aluviales, que recubren depósitos de cantos y gravas medianamente alterados, identificados con la unidad PVAa. El relieve es plano a ligeramente ondulado, la pendiente varía entre 0 al 7%, los suelos son profundos a superficiales, texturas medias a finas, bien a pobremente drenados, estos suelos son una asociación compuesta por los *Typic Hapludoxs*, *Oxic Dystrudepts* y *Plinthic Tropaquepts* (IGAC, 2004).

⁵ La estación climática en el ASA, entro en operación el 18/abril/2012.

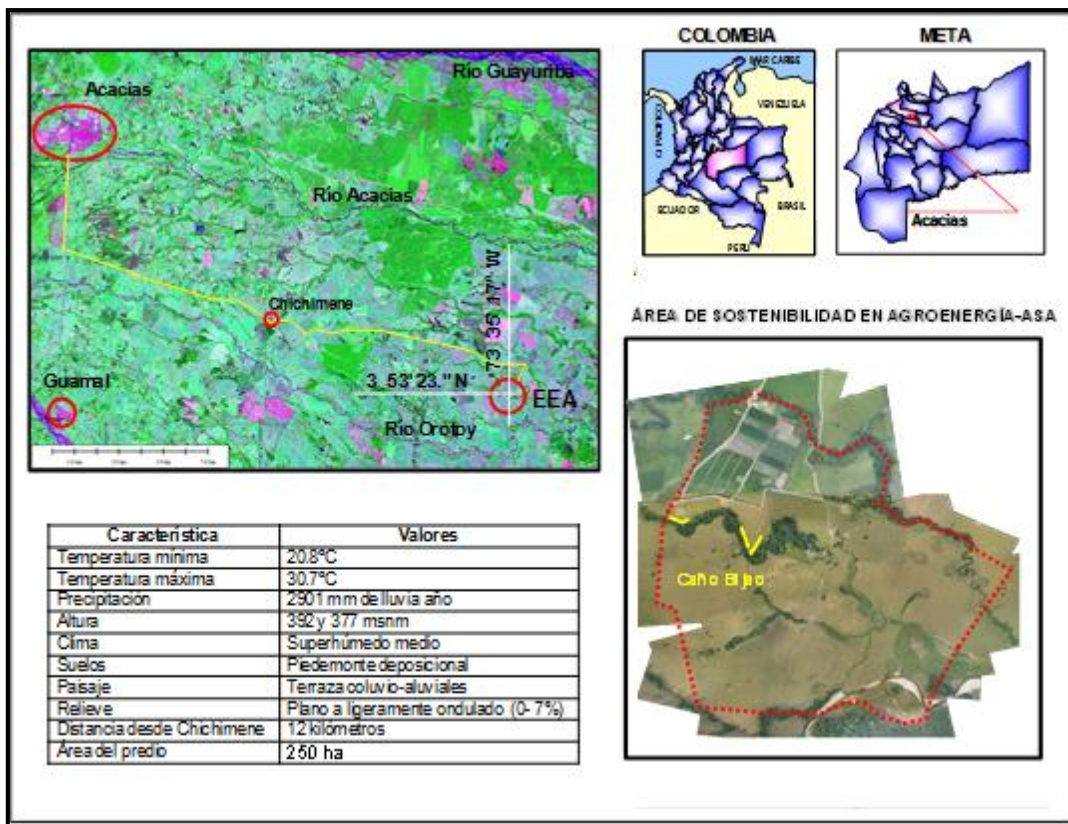


Figura 7. Localización geográfica del área de estudio en el ASA -Área de Sostenibilidad en Agroenergía. (CORPOICA – ECOPETROL), Meta.

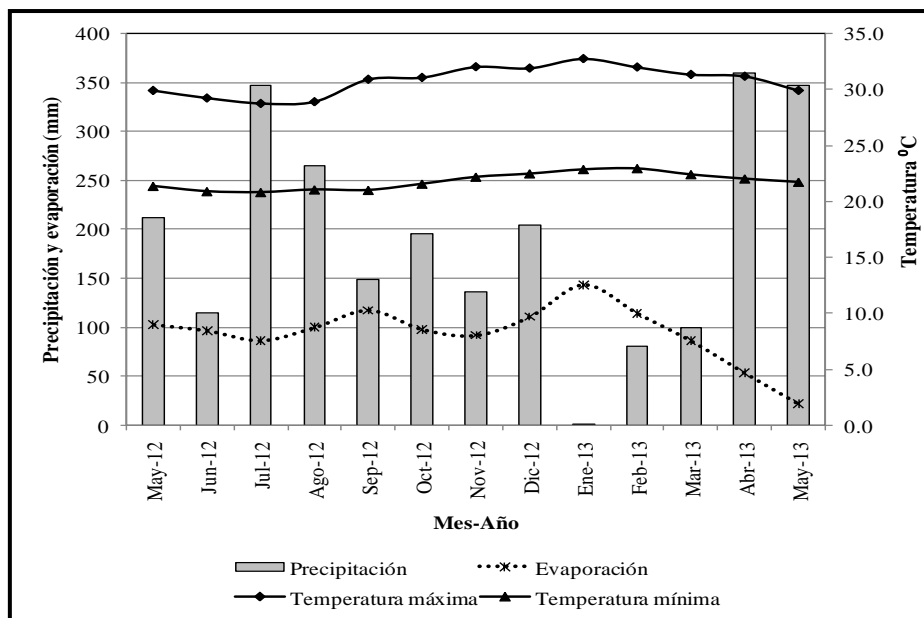


Figura 8. Datos climáticos mensuales. Estación climática ASA -Área de Sostenibilidad en Agroenergía. (CORPOICA – ECOPETROL), Meta.

7.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El área dentro del predio del ASA, determinada para establecer los diseños experimentales corresponde a la ronda del lado izquierdo, en un transepto aproximado de un 1km, aguas abajo del caño Bijao. Esta área se delimitó de acuerdo con el artículo 83 del CNRN (Código Nacional de Recursos Naturales), la ronda es: “*una faja paralela definida de la cota máxima de inundación del cauce permanente de ríos, caños, arroyos y lagos, hasta los treinta metros de ancho*”.

Dadas las características de los suelos, pendiente y el ancho de la vegetación presente en el bosque de galería, se determinó, establecer los ensayos en un arreglo de bloques completos al azar, dispuestos de acuerdo con un gradiente respecto a la vegetación presente en el bosque de ribera, cada uno con cinco (5) tratamientos por tres (3) repeticiones; los tratamientos fueron asignados al azar para cada uno de los bloques, como se observa en la tabla 3. Cada bloque tiene un área de 4650m² (155m x 30m) y cada tratamiento es de 625m² (25 x 25 m), separados por calles de 5m (Ver Figura 9).

Tabla 3. Distribución de tratamientos en los bloques. ASA – Meta

Bloque	Tratamientos				
1	T0	T3	T2	T4	T1
2	T3	T2	T0	T4	T1
3	T4	T0	T1	T2	T3

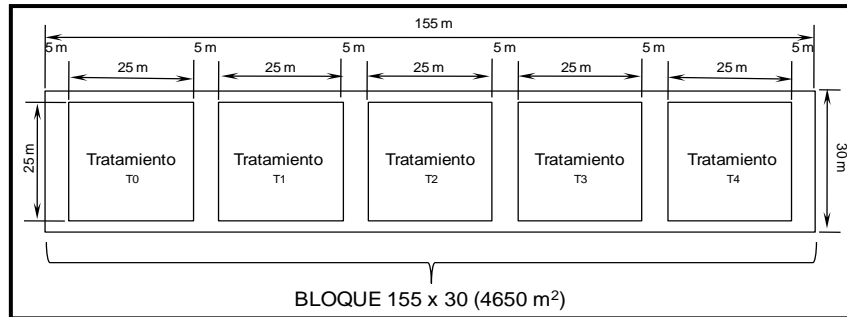


Figura 9. Distribución de los tratamientos en un bloque 1.

7.3 TRATAMIENTOS

Para la selección de las especies forestales y arbustivas en el presente trabajo, se tuvo como criterios: a) Que fuesen nativas, b) Potencial de aceptación por los productores rurales; c) Rápido crecimiento, d) Fijadoras de nitrógeno (leguminosas), e) Amplia cobertura de follaje, f) Alta tasa de renovación, g) Disponibilidad de semillas o plántulas, h) Fácil propagación y i) especies multipropósito: producción de madera y leña, alimento para los animales. En la tabla 4, se presenta las especies seleccionadas, cantidades y distancias de siembra de los diferentes materiales vegetales que se establecieron en el sitio experimental y en la figura 10, se presenta un esquema de distribución y distancias de siembra como fueron establecidas en campo para cada tratamiento.

Tabla 4. Cantidad y distancias de siembra de las especies a establecer en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Especies	Cantidad	Distancia	Total
T0	Pasto llanero (<i>Brachiaria decumbens</i> cv. Basilisk)			
T1	Yopo (<i>Piptadenia opacifolia</i> Ducke)	36	5 x 5 m	108
	Tithonia (<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl))	130	2 x 2 m	390
T2	Cañofistol (<i>Cassia moschata</i> Kunth)	36	5 x 5 m	108
	Tithonia (<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl))	130	2 x 2 m	390
T3	Guamo (<i>Inga edulis</i> Mart)	36	5 x 5 m	108
	Tithonia (<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl))	130	2 x 2 m	390
T4	Yopo (<i>Piptadenia opacifolia</i> Ducke)	12	Fila cada 15m intercalados	36
	Cañofistol (<i>Cassia moschata</i> Kunth)	12		36
	Guamo (<i>Inga edulis</i> Mart)	12		36
	Tithonia (<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl))	130	2 x 2 m	390

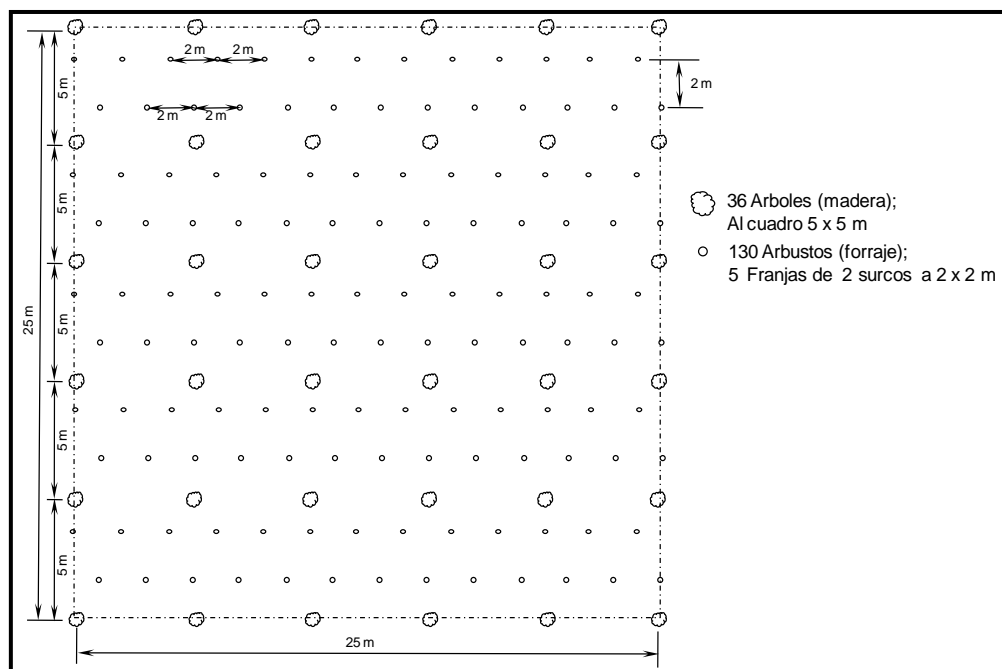


Figura 10. Cantidad, distribución y distancias de siembra de un tratamiento tipo.

7.3.1 Adecuación del área y materiales para el establecimiento de los tratamientos

Como el área destinada para la realización del experimento se encontraba en pastoreo y el ganado tenía acceso libre a todo el recorrido del caño; se procedió a realizar la protección de

los diferentes bloques con un cerco de púas; seguidamente se efectuó la localización y trazado de cada uno de los tratamientos en los bloques, como se observa en la figura 11. Es de anotar que, antes de realizar el ahoyado para el establecimiento de los tratamientos SAF, se realizó un control químico del pasto, excepto para los sitios de los tratamientos testigos T0 (*Brachiaria decumbens*).

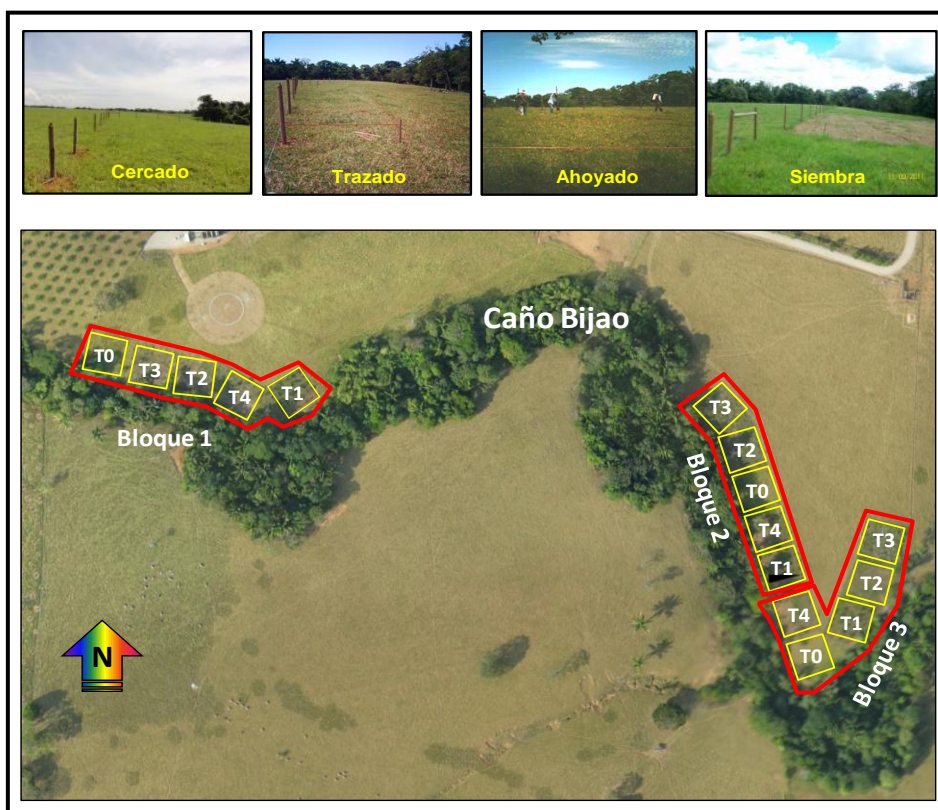


Figura 11. Adecuación del área: Cercado, trazado, ahoyado y siembra y localización de: bloques y sus respectivos tratamiento. ASA – Meta

7.3.2 Condiciones de manejo de los tratamientos

Luego de las labores de cercado, trazado, y ahoyado, en septiembre del 2011, se realizó la siembra de 1248 estacas de la especie Botón de oro (*Tithonia diversifolia* (Hemsl)) de

aproximadamente 30- 40 cm de largo y 144 plántulas de cada una de las especies, con las siguientes características: Yopo (*Piptadenia opacifolia* Ducke) plántulas con una altura de 25.8 ± 1.1 cm, Cañofistol (*Cassia moschata* Kunth) plántulas con una altura de 25.3 ± 1.3 cm y Saladillo (*Vochysia lehmannii* Hieron) plántulas con una altura de 11.4 ± 1.3 cm de altura; esta última se reemplazó por la especie Guamo (*Inga edulis* Mart) con plántulas 26.3 ± 1.1 cm, en julio de 2012, dado que la especie *Vochysia lehmannii* Hieron presentó una sobrevivencia menor del 37%.

A los seis meses de establecidos se realizó un control químico de arvenses y se complementó con un plateo con azadón alrededor de los árboles; posteriormente se les realizó una fertilización aplicada en forma de corona; con las siguiente dosificación: Los forestales, (dosis/planta) 200gr de cal Dolomita, 100gr Roca Fosfórica, 50gr de Yeso, 30gr de KCL, 30gr de Urea, 30gr DAP y 10gr de Borozinco y para el Botón de oro (*Tithonia diversifolia* (Hemsl)), (dosis/planta) 100gr de cal Dolomita, 50gr de roca fosfórica y 25gr de Yeso. Es de anotar y resaltar que, el testigo T0 (*B. decumbens*) no recibió fertilización durante el periodo de muestreo.

7.4 PARÁMETROS EVALUADOS Y TOMA DE INFORMACIÓN

Es de anotar y resaltar que antes del establecimiento de los materiales de los respectivos bloques y tratamientos, se tenía de trabajos anteriores la caracterización de las propiedades físicas y químicas (octubre 2011) de los suelos, que para el presente trabajo se consideran como línea base o las condiciones iniciales de partida (Anexo 1).

La toma de información de los diferentes parámetros evaluados, se realizaron desde el 22 de septiembre de 2011 al 26 de febrero del 2013, que corresponden a 523 días calendario (aproximadamente 17.4 meses). Para medir y cuantificar los estimadores de cambio en cada tratamiento, se realizó un muestreo sistemático y se tuvo en cuenta la temporalidad (periodicidad) y las escalas espaciales, como se describe a continuación:

1. Para los parámetros físicos del suelo (0 - 10 cm): Textura, humedad (curvas de retención) y densidad aparente se tomaron dos cilindros en la diagonal de cada tratamiento (figura 12); esta toma se realizó dos (2) veces, la primera en marzo/2012 inicio de las lluvias y la segunda octubre/2012 en temporada de lluvias.
2. Para el análisis completo de química suelos (0 – 10 cm); se recolectaron submuestras de suelo de 4 sitios en cada tratamiento (figura 12), posteriormente se homogenizó y se obtuvo una muestra compuesta de 1000gr; esta toma se realizó dos (2) veces, la primera en marzo/2012 y la segunda octubre/2012, la primera al inicio de las lluvias y la segunda en temporada de lluvias.
3. Para la cuantificar la actividad microbiana se recolectaron submuestras de suelo (0-10 cm) de 4 sitios en cada tratamiento (figura 12), posteriormente se homogenizó y se obtuvo una muestra compuesta de 1000 gr; esta toma se realizó tres (3) veces, la primera antes del establecimiento de los tratamientos octubre/2011, la segunda en marzo/2012 y tercera en octubre/2012; la primera y tercera en la temporada de lluvias y la segunda al inicio de lluvias.
4. Para cuantificar los macroinvertebrados se excavaron dos monolitos (20 x 20 x 10 cm) en la diagonal de cada tratamiento (figura 12), se realizó una sola vez durante el periodo de la investigación, durante la temporada de lluvias agosto y septiembre de 2012.

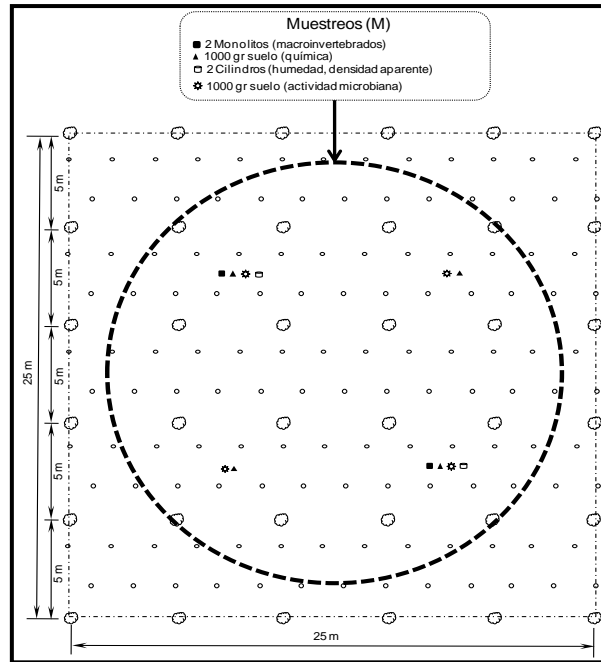


Figura 12. Distribución de especies y sitios de muestreo en un tratamiento.

7.5 ESPECIFICIDADES METODOLOGICAS DEL OBJETIVO 1: Evaluar la contribución de los arreglos agroforestales en la rehabilitación del suelo con base en indicadores e índices de calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas.

7.5.1 Parámetros asociados la calidad física del suelo.

En cada uno de los puntos donde se tomaron las muestras descritas en el numeral 7.4 (0-10 cm), se realizó el análisis para la determinación de los siguientes parámetros físicos del suelo (Tabla 5):

Tabla 5. Relación de análisis de características físicas analizadas del suelo y su metodología.

ANÁLISIS	MÉTODO	DETALLE
Curva hidrofísica	Ollas a Presión	Característica del suelo en muestras sin disturbar, recolectada en un cilindro
Densidad Aparente (DA)	Cilindro de volumen conocido	
Contenido de humedad en el suelo	Gravimétrico	Característica del suelo en muestras disturbadas, recolectada en bolsa
Textura por Bouyoucos	Hidrómetro	

La determinación de las variables descritas anteriormente se realizó en el laboratorio de física de suelos CORPOICA C.I. La Libertad. A partir de los resultados de laboratorio (Anexo 2), se realizó el cálculo de los siguientes parámetros así:

Contenido de humedad en el suelo

El porcentaje de Humedad Disponible (%HD), es la máxima cantidad de agua que la planta puede disponer para su absorción en determinado perfil (Montenegro & Malangón, 1990).

$$\%HD = \%CC - \%PMP$$

Dónde:

(%CC) Capacidad de Campo: Cantidad de agua retenida a una tensión de 1/10= 0.1 de Bares

(%PMP) Punto de Marchites Permanente: Cantidad de agua retenida a una tensión de 15 Bares.

Porosidad Total

La Porosidad Total (PT) y el porcentaje de distribución por tamaño de los mismos (macroporos, mesoporos y microporos), se realizaron los siguientes cálculos:

$$Macro = (\%SAT - \%CC) * DA$$

$$Meso = (\%CC - \%PMP) * DA$$

$$Micro = \%PMP * DA$$

$$PT = Macro + Meso + Micro$$

Dónde:

DA: Densidad aparente (g/cm^3); SAT%: porcentaje de humedad del suelo saturado; CC%: porcentaje de humedad del suelo a una tensión de 1 atmosfera “Capacidad de Campo”; PMP%: porcentaje de humedad del suelo a una tensión de 15 atmosfera “Punto de Marchitez Permanente”

7.5.2 Parámetros asociados a la calidad química de suelo.

En cada uno de los puntos donde se tomaron las muestras descritas en el numeral 7.4 (0-10 cm), se realizó el análisis para la determinación de los siguientes parámetros químicos del suelo (Tabla 6):

Tabla 6. Propiedades químicas analizadas y metodologías usadas

VARIABLE	METODO UTILIZADO
pH relación 1:1	Potenciómetro
S (mg/kg)	Azufre Extractable (Fosfato Ca) Turbidimetría.
P (mg/kg)	Fósforo Total Bray II Determinación Colorimétrica
Materia Orgánica	Walkley-Black – Espectrometría Molecular
K (cmol/kg)	Potasio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
Ca (cmol/kg)	Calcio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
Mg (cmol/kg)	Magnesio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
Al (cmol/kg)	Aluminio Cambiable (KCl 1M) Volumetría
Na (cmol/kg)	Sodio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
B (mg/kg)	Espectrometría Molecular
Fe (mg/kg)	Hierro Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica
Mn (mg/kg)	Manganeso Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica
Cu (mg/kg)	Cobre Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica
Zn (mg/kg)	Zinc Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica

La determinación de las variables descritas anteriormente se realizó en el laboratorio de suelos CORPOICA C.I. Tibaitatá. (Anexo 3)

7.5.3 Parámetros asociados a la calidad biológica del suelo

En cada uno de los puntos donde se tomaron las muestras descritas en el numeral 7.4 (0-10 cm), se realizó el análisis para la determinación de la macrofauna y el índice de actividad microbiana, los cuales se realizaron como se describe a continuación.

7.5.3.1 Macrofauna del suelo

La evaluación y seguimiento de los macroinvertebrados presentes en el suelo se realizó en los grupos de lombrices de tierra, termitas, hormigas y escarabajos; en cada uno de los tratamientos y se calculó la densidad (individuos/m²) de estos; siguiendo los procedimientos elaborados por Anderson e Ingram (1993), modificados y reportados por Ruiz et al., 2008 y Swift & Bignell, 2001, los cuales consisten en excavar monolitos de la tierra de dimensiones 20x20x10 cm. Así:

a. A cada uno de los sitios (ver numeral 7.4), se les retiró la hojarasca presente en un cuadrado 20 cm y posteriormente se demarcó la posición exacta del monolito con un cuadrante de metal de 20x20 cm.

b. Se aisló el monolito cortando abajo con una azada unos centímetros fuera del cuadrante y excavando un 10 cm.

c. Se empaquetó la tierra y fue llevada al laboratorio. La tierra empaquetada se conservó fuera de luz del sol directa y se clasificó lo más pronto posible (antes de las próximas 24 horas).

d. Para cada monolito, los macroinvertebrados de la tierra se extrajeron a mano y se conservaron en recipientes diferentes llenos del alcohol y se rotularon con el número del bloque y tratamiento; posteriormente se registró el número de individuos y se identificaron hasta grupo taxonómico.

e. Se realizó una lista de especies, agrupándolas en subfamilias o familias

f. Posteriormente se estimó la densidad (individuos/m²), por cada monolito, combinando los datos para todas las especies.

7.5.3.2 Parámetros de actividad microbiana

La evaluación y seguimiento de la actividad metabólica de los microorganismos heterótrofos aeróbicos del suelo, se determinó por medio de la “Cuantificación del metabolismo aeróbico del suelo” procedimiento propuesto por García, 1984 y adaptado según protocolo de investigación (CODIGO: IN-R-369, del 2008) del laboratorio de microbiología de CORPOICA C.I. La Libertad, para lo cual se realizó:

a. Se recolectaron en campo las muestras según procedimiento descrito anteriormente (Numeral 7.4)

b. Se preparó la muestra de suelo rizosférico y soluciones de trabajo.

c. Se instalaron las muestras de suelo y los frascos con NaOH y se incubaron (72 horas).

d. Posteriormente se titularon y se cuantificó la producción del CO₂ en kg/ha, por cada bloque y tratamiento, así:

$$\text{mlHCl (testigo)} - \text{mlHCl (muestra transformada en Na}_2\text{CO}_3) = \text{ml de NaOH}$$

$$\text{ml de NaOH} \times \text{N del HCl} \times 22 = \text{mg de CO}_2 \text{ (Molar)}$$

$$\text{kg/ha de CO}_2 = \text{mg de CO}_2 \times 20$$

$$\text{Peso Equivalente del CO}_2 = (\text{Peso molecular} / \text{N}^\circ \text{cargas}) = 22$$

7.6 ESPECIFICIDADES METODOLOGICAS DEL OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.

Para estimar la biomasa dendroenergética potencialmente útil para la producción de leña, se usó el modelo de análisis funcional de crecimiento en altura y diámetro para las especies forestales.

Con los índices de crecimiento en altura y diámetro para cada especie se realizó las proyecciones de biomasa total aérea seca a 10 años, lo anterior en consideración a programar una rotación corta para este tipo de plantación, cuyo uso es suplir la demanda de leña anual de una familia compuesta por cuatro personas; y se establece el sexto año para efectuar la primera entresaca, dado que lo ideal es encontrar un turno para obtener la mayor proporción y cantidad de leña gruesa de 7-12 cm de DAP (IDADE, 2007), lo cual se alcanza al sexto año para estas especies.

Posteriormente se estima la cantidad de árboles requeridos para lograr un autoabastecimiento sostenible de leña en una finca para cada año, los cuales se obtienen como resultado de dividir la demanda anual por núcleo familiar sobre la producción de biomasa total seca estimada para un individuo de la especie forestal en cada año; por último se calcula área ocupada y la producción de biomasa seca ($t/ha \cdot \text{año}$) producida por especies: Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*), establecidas en monocultivo o como un arreglo múltiple.

A continuación se presentan los parámetros a medir y las ecuaciones para realizar los cálculos.

Altura: Esta medida se tomó en centímetros desde el suelo (5.0 cm del suelo) hasta la yema apical de cada árbol plantado.

Diámetro del tallo: Esta medida se tomó a cada árbol a una distancia de 5 centímetros desde el suelo, con un calibrador digital (Digimatic Caliper Series 500).

Modelo de crecimiento: Con los datos de altura y diámetros registrados para cada una de las especies establecidas en los tratamientos, se determinan los modelos de crecimiento en altura y diámetro para las especies forestales usando la ecuación propuesta por (Gregorczyk, 1991).

$$Y_{(alt,dia)} = \frac{a}{(1 + \exp(-b * (x - c)))}$$

Dónde:

$Y_{(alt, dia)}$: Crecimiento en altura (alt) en metros o crecimiento diámetro (dia) en cm.

x: Tiempo (días).

a: Máximo valor de crecimiento en altura o diámetro.

b, c: parámetros constantes ($b > 0$, $c > 0$).

Tasa de Crecimiento Relativo (TCR): Se cuantifica el crecimiento por unidad de tiempo en altura $TCR_{(alt)}$ y diámetro $TCR_{(dia)}$ así:

$$TCR_{(alt,dia)} = \frac{b * x * (a - x)}{a * Y_{(alt,dia)}}$$

Dónde:

$TCR_{(alt, dia)}$: Tasa de crecimiento relativa en altura o diámetros cm/cm*día.

$Y_{(alt, dia)}$: Altura (alt) o diámetro (dia) estimado por la ecuación de crecimiento.

a: Máximo valor de crecimiento en altura o diámetro, obtenido de la curva de crecimiento.

x: Tiempo (días).

b, c: parámetros constantes (b>0, c>0).

Incrementos Medios Anuales (IMA): Se calculan los incrementos medios anuales en altura

$IMA_{(alt)}$ en (m/año) y diámetro $IMA_{(dia)}$ en (cm/año), a partir de las TRC en altura y diámetro,

así:

$$IMA_{(alt)} = TRC_{(alt)} * 12 \text{ y } IMA_{(dia)} = TRC_{(dia)} * 365$$

Estimación de la biomasa total aérea seca: Se estima con base en la fórmula propuesta por

Brown, (1997).

$$B_{ta} = V_f \times GE \times FEB$$

Dónde:

B_{ta} : biomasa aérea total (t Ms árbol⁻¹).

V_f : Volumen de fuste (m³ árbol⁻¹).

GE: gravedad específica o densidad básica de la madera (t m⁻³).

FEB: factor de expansión de biomasa = 1.76 (Burgos & Pérez, 2004)⁶

⁶ La biomasa del fuste a edades tempranas con relación a la biomasa del follaje y ramas es baja, presentando un valor de FEB alto (>1.76) que permanece constante para las primeras etapas de crecimiento.

Total de árboles a sembrar:

$$No. \text{ árboles} = \sum_{i=6}^{10} \left(\frac{D_{fw}}{B_{ta}} \right)$$

Donde;

D_{fw} : Demanda anual de leña del núcleo familiar en toneladas.

B_{ta} : Producción de biomasa seca leñosa estimado para un individuo de la especie ϕ en el año (i) en toneladas.

7.7 PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

En el tratamiento estadístico de la información del primer objetivo se procedió así:

El procesamiento estadístico de los datos se realizó con la ayuda de los paquetes estadístico SAS y R; en general, se realizó un análisis exploratorio de datos, para determinar datos anómalos se realizaron pruebas de normalidad (test de *Shapiro-Wilk*). Si un parámetro no cumple la distribución de normalidad, se transforma para aplicar tratamientos estadísticos de contraste.

Con los datos de laboratorio de propiedades físicas, químicas y biológicas se hizo un análisis estadístico de tipo descriptivo (medias y coeficientes de variación), con el fin de establecer tendencias, caracterizar y clasificar los parámetros.

Para interpretar los datos de la caracterización física se compararon con valores de referencia reportados por (FAO, 2009; Jaramillo, 2002; Montenegro & Malagón 1990); en tanto que su aptitud química para el uso agrícola, se compararon de acuerdo a los niveles de

interpretación estándar, reportados por diferentes autores entre ellos (Castro & Gómez, 2010; ICA, 1992; Rincón *et al.*, 2010).

Para la selección de las variables físicas, químicas y biológicas de mayor aporte se tuvo en cuenta la contribución de cada variable a la construcción de los dos primeros componentes del ACP. Se dividió por dos el mayor valor y se retuvieron las variables con valores iguales o superiores a este. (Velásquez, 2010). Las variables de mayor peso fueron seleccionadas como indicadores de calidad del suelo, porque son las que la mayor variabilidad contenida en los datos, de acuerdo al aporte (peso) de cada variable a la conformación de los dos primeros componentes (factor 1 y 2 del ACP) y posiblemente serán las más afectadas por los cambios del sistema suelo por efecto de los tratamientos.

Las variables seleccionadas como indicadores se procesaron con la prueba test de Monte Carlo del año 1944, para determinar cuánto de la variación total observada es atribuible (explicada) por los tratamientos, complementariamente se realizaron análisis de varianza con prueba de Duncan, con el fin de interpretar la influencia de los tratamientos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

En el tratamiento estadístico de la información del segundo objetivo en la construcción de las curvas de crecimiento en altura y diámetros se usó el software CurveExpert V. 1.37.

7.8 CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD EN LA VALORACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, Y BIOLÓGICAS DE LOS SUELOS.

Para la construcción de los índices de calidades físicas, químicas y biológicas del suelo por efecto de los tratamientos, se toman los valores de las variables seleccionadas como indicadores de calidad física, química y biológica resultado del Análisis de Componentes Principales (ACP) y se construyen los índices así: Los indicadores se redujeron a valores comprendidos entre 0.1 y 1 mediante transformación homotética propuestas por Rodríguez, *et al.*, 2012; Velázquez *et al.*, 2007 y se consideraron los valores altos y bajos de las variables, atendiendo a lo que sería más adecuado para el sistema suelo en las condiciones actuales.

Para valores altos la fórmula fue:

$$y = 0.1 + \left(\frac{X - b}{a - b} \right) * 0.9$$

Para valores bajos la fórmula fue:

$$y = 1.1 - \left(0.1 + \left(\frac{X - b}{a - b} \right) * 0.9 \right)$$

Dónde:

Y: Valor de la variable después de transformada,

X: Valor de la variable a transformar;

b: Mínimo valor obtenido para la variable en el muestreo y

a: Máximo valor alcanzado por la variable.

Las variables transformadas se multiplican una a una por su respectivo aporte (peso) a la formación de los dos primeros componentes y a la explicación de la varianza en el análisis de componentes principales, por tanto la variable transformada se multiplica por su aporte a la formación del factor uno y luego la variable transformada se multiplica por su aporte a la formación del factor dos y se suman para cada variable los resultados de dichas multiplicaciones.

Los valores así obtenidos son sometidos nuevamente a transformación homotética, resultados estos que se promedian por tratamiento. Estos últimos resultados son los índices, con los cuales se cuantifica y cualifica la influencia de los tratamientos en las calidades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

8 RESULTADOS

En un lote destinado inicialmente a pastoreo con una cobertura conformada en un 97% por la especie Braquiaria (*B. decumbens*) y el restante 3% por plantas de crecimiento espontáneo tales como Tote (*Cyperus sp.*) y Dormidera (*Mimosa sp.*); se procedió a delimitar y cercar las parcelas destinadas a los tratamientos propuestos en SAFs y testigo, así: T1 Yopo (*P. opacifolia*), T2 Cañafistol (*C. moschata*), T3 Guamo (*I. edulis*) y T4 Múltiple (*P. opacifolia* + *C. moschata* + *I. edulis*) y el Testigo: T0 (*B. decumbens*).

En las parcelas así constituidas se realizó un muestreo inicial de las condiciones físicas, químicas y biológicas (actividad microbiana) de los respectivos suelos: muestreo este que se constituyó en la línea base (LB_m0 octubre 2011). Seguidamente se establecieron los diferentes arreglos T0 Pastura (*B. decumbens*), T1 Yopo (*P. opacifolia*), T2 Cañafistol (*C. moschata*), T3 Guamo (*I. edulis*) y T4 Múltiple (*P. opacifolia* + *C. moschata* + *I. edulis*), es de anotar que el tratamiento testigo es T0 (*B. decumbens*).

8.1 RESULTADOS ESPECIFICOS DEL OBJETIVO 1: Evaluar la contribución de los arreglos agroforestales en la rehabilitación del suelo con base en indicadores e índices de calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas.

De acuerdo con lo establecido en la metodología para construir el indicador se seleccionaran las variables físicas, químicas y biológicas solo aquellas que expresan la mayor variabilidad, de acuerdo al aporte (peso) de cada variable a la conformación de los dos primeros componentes (factor 1 y 2 del ACP). El primer paso fue la caracterización de las variables

físicas, químicas y biológicas cuantificadas en la línea base (m0_octubre 2011), m1_marzo 2012 y m2_octubre_2012 y segundo fue la selección de variables y tercero la construcción de los índices.

8.1.1 Caracterización física, química y biológica de los tratamientos evaluados.

Con los datos de propiedades físicas, químicas y biológicas se hizo un análisis estadístico de tipo descriptivo (rangos y medias) para establecer tendencias y la variabilidad de los parámetros.

8.1.1.1 Caracterización física de los tratamientos

En la tabla 7, se reportan los promedios de las principales propiedades físicas para una profundidad de (0-10 cm), medidos en los tratamientos en las diferentes épocas de muestreo m0_octubre 2011 (temporada de lluvias), m1_marzo 2012 (inicio de lluvias) y m2_octubre2012 (temporada de lluvias).

En cuanto a los parámetros físicos iniciales (antes de la intervención) del suelo en el área de estudio, en general presenta valores característicos de los suelos sometidos a actividades ganaderas, en aspectos tales como: Tendencia a la compactación, baja porosidad y baja capacidad de retención de agua.

De acuerdo con la clasificación FAO, (2009); los suelos en el área de estudio presentaron en los primeros 10 centímetros tres categorías de densidades, la primera una DA “muy suelta”, con valores entre 1.20-1.27 gr/cm³ y contenidos de arcilla menores de 17%; la segunda, DA “suelta” con valores entre 1.28 – 1.38 gr/cm³ y contenidos de arcilla entre 17 –

24%; y la tercera con una DA “intermedia” con valores entre 1.39- 1.52 gr/cm³ y contenidos de arcilla entre 16 y 28%. En general los promedios de la DA en todos los tratamientos y en los tres muestreos están por debajo del 1.40g/cm³, considerados como ideal en un suelo con estas texturas (USDA, 1995).

Tabla 7. Variables físicas en el suelo. Evaluadas en línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012). (0- 10 cm)

Tratamiento	DA	ARE	LIM	ARC	SAT	CC	PMP	HD	MAC	MES	MIC	POR
	gr/cm ³	%										
LB_m0 (<i>B. decumbens</i>)	1.34	63.3	15.3	21.0	35.5	32.6	22.9	9.8	3.9	13.0	30.6	49.0
T0_m1 (<i>B. decumbens</i>)	1.45	60.0	19.3	21.7	35.7	29.8	19.5	10.3	8.6	14.8	28.2	45.3
T1_m1 (<i>P. opacifolia</i>)	1.41	60.7	19.7	20.7	38.7	31.5	21.0	10.5	10.2	14.9	29.5	46.7
T2_m1 (<i>C. moschata</i>)	1.45	60.7	20.3	20.0	36.6	31.6	21.7	9.9	7.3	14.4	31.4	45.3
T3_m1 (<i>I. edulis</i>)	1.43	60.7	18.7	21.3	36.7	30.9	19.8	11.0	8.3	15.7	28.4	46.0
T4_m1 (Múltiple)	1.35	58.7	21.0	21.3	40.6	32.7	21.6	11.1	10.7	15.1	29.2	49.3
T0_m2 (<i>B. decumbens</i>)	1.37	63.7	19.7	17.7	37.7	26.7	22.2	4.5	15.0	6.2	30.5	48.0
T1_m2 (<i>P. opacifolia</i>)	1.29	64.0	19.7	17.0	40.5	25.8	19.5	6.3	18.7	8.2	25.1	51.3
T2_m2 (<i>C. moschata</i>)	1.32	61.7	19.3	19.7	37.4	25.6	21.5	4.1	15.5	5.4	28.3	50.3
T3_m2 (<i>I. edulis</i>)	1.35	61.7	20.0	19.0	37.7	24.7	20.5	4.2	17.3	5.8	27.8	49.0
T4_m2 (Múltiple)	1.36	63.3	20.0	17.7	40.3	25.6	21.0	4.5	19.8	6.1	28.3	49.0

Verde: Alto (Ideal)

Amarillo: Medio

Rojo: Bajo

Dónde: DA: Densidad Aparente; ARE: Arena; LIM: Limo y ARC: Arcilla.; SAT: Saturación; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de Marchitez Permanente; HD: Humedad disponible; MAC: Macroporos; MES: Mesoporos; MIC: Microporos; POR: Porosidad

Con respecto a la densidad aparente en el muestreo m1, esta varió de 1.30 y 1.55 g/cm³, el valor promedio más alto lo presentó T0 (*B. decumbens*) y el más bajo T4 (Múltiple). Mientras que en el muestreo m2, variaron entre 1.17 y 1.51 g/cm³, el valor promedio más alto lo presentó T0 (*B. decumbens*) y el más bajo T1 (*P. opacifolia*).

Los valores para la Saturación (%SAT), Capacidad de Campo (%CC) y Punto de Marchitez Permanente (%PMP): De acuerdo con Arango, 1998; Montenegro & Malangón, 1990 todos los tratamientos y el testigo se consideran como una valoración media por presentar valores: SAT entre 35 y 45%, CC entre 25 – 30% y un PMP entre 18 – 25 %.

Los contenidos de humedad retenidos a 0.1 bares de tensión (%CC) en el muestreo m1, variaron entre 25.0 y 38.6%, el valor promedio más alto lo presentó el T4 (Múltiple) y el más bajo T0 (*B. decumbens*). Mientras que en el muestreo m2, variaron entre 20.3 y 32.0%, el valor promedio más alto lo presentó el T0 (*B. decumbens*) que es similar al inicial y el más bajo T3 (*I. edulis*).

En cuanto los contenidos de humedad retenidos a 15 bares de tensión (%PMP), en el muestreo m1, variaron entre 13.1 y 25.3%, el valor promedio más alto lo presentó el T2 (*C. moschata*) y el más bajo T0 (*B. decumbens*). Mientras que en el muestreo m2, variaron entre 16.7 y 25.2%, el valor promedio más alto lo presentó el T0 (*B. decumbens*) y el más bajo T1 (*P. opacifolia*).

En cuanto a la Humedad Disponible (%HD) en el suelo varió en el muestreo m1, entre 7.2 y 15.8%, el valor promedio más alto lo presentó el T4 (Múltiple) y el más bajo T2 (*C. moschata*). Mientras que en el muestreo m2, varió entre 2.6 y 10.9%, el valor promedio más alto lo presentó el T1 (*P. opacifolia*) y el más bajo T2 (*C. moschata*). Las diferencias observadas en la disponibilidad de humedad en suelo en los diferentes muestreos dependen del contenido de humedad inicial del suelo al momento del muestreo, considerando que el muestreo m1 hecho a finales de la época seca (marzo/2012) y el muestreo m2 finalizando la

época de lluvias (octubre/2012). Esta diferencia se debe al fenómeno de la histéresis⁷ que corresponde a que el contenido de humedad a una tensión dada es diferente en proceso de humedecimiento (m1) al momento del proceso de secado (m2).

El mayor contenido de humedad (%HD) en el T4 (Múltiple) puede estar relacionado con el efecto que tiene la porosidad en la humedad del suelo; el tratamiento T4 (Múltiple) presentó el mayor porcentaje en macroporos, de acuerdo con (Jaramillo, 2002) esta distribución de poros hace que el suelo, por encima de la capacidad de campo, suministre volúmenes de agua fácilmente.

En relación al porcentaje de macroporos (%MAC), en el muestreo m1, variaron entre 4.6 y 15.5%, el valor promedio más alto lo presentó el T4 (Múltiple) y el más bajo T2 (*C. moschata*). Mientras que en el muestreo m2, cambiaron entre 10.1 y 28.9%, el valor promedio más alto lo presentó el T4 (Múltiple) y el más bajo T0 (*B. decumbens*) (figura 13).

Lo anterior debido muy posiblemente al desarrollo de las especies *P. opacifolia* y *I. edulis* que presentaron los mayores desarrollos en los parámetros de diámetro y altura, lo cual implica un mayor desarrollo de las raíces en los primeros centímetros del suelo (0-20 cm), que a la vez está relacionado con la densidad aparente más baja (DA) y la macroprosidad del suelo (Montenegro & Malagón, 1990).

⁷ Histéresis: Es un fenómeno que se presenta en la naturaleza, debido a que, el suelo está sometido constantemente a ciclos de secado y humedecimiento, antes, durante y después de las lluvias o por las fluctuaciones de nivel de las aguas subterráneas; durante estos ciclos, existen diferencias entre los procesos de llenado y vaciado de los poros del suelo, lo que resulta en que la curva descrita por un suelo durante una fase de humedecimiento no es la misma que la observada en la fase de secado. Es decir que para un mismo contenido de humedad en el suelo, el agua está retenida con energía distinta según se trate de una fase de secado o de rehidratación. (Russell & Wild, 1992; Arango, 1998)

El porcentaje de mesoporos (%MES), en el primer muestreo tomaron valores entre 10.6 y 20.6%, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y el más bajo T0 (*C. moschata*). Mientras que en el segundo muestreo, variaron entre 3.8 y 15.5%, el valor promedio más alto lo presentó el T1 (*P. opacifolia*) y T2 (*C. moschata*) el más bajo, lo anterior puede estar relacionado con el desarrollo de la especie (*C. moschata*), que presentó las tasa de crecimiento en altura y diámetro más bajas, lo cual implica que un menor desarrollo de las raíces y menor área explorada de suelo (figura 13).

En el porcentaje de microporos (%MIC), su variación fue muy similar para ambas épocas de muestreo; en el muestreo m1, variaron entre 20.3 y 35.8%, el valor promedio más alto lo presentó el T2 (*C. moschata*) y el más bajo T0 (*B. decumbens*). Mientras que en el segundo muestreo, tomo valores entre 21.8 y 32.6%, el valor promedio más alto lo presentó el T0 (*B. decumbens*) y T1 (*P. opcifolia*) el más bajo (figura 13).

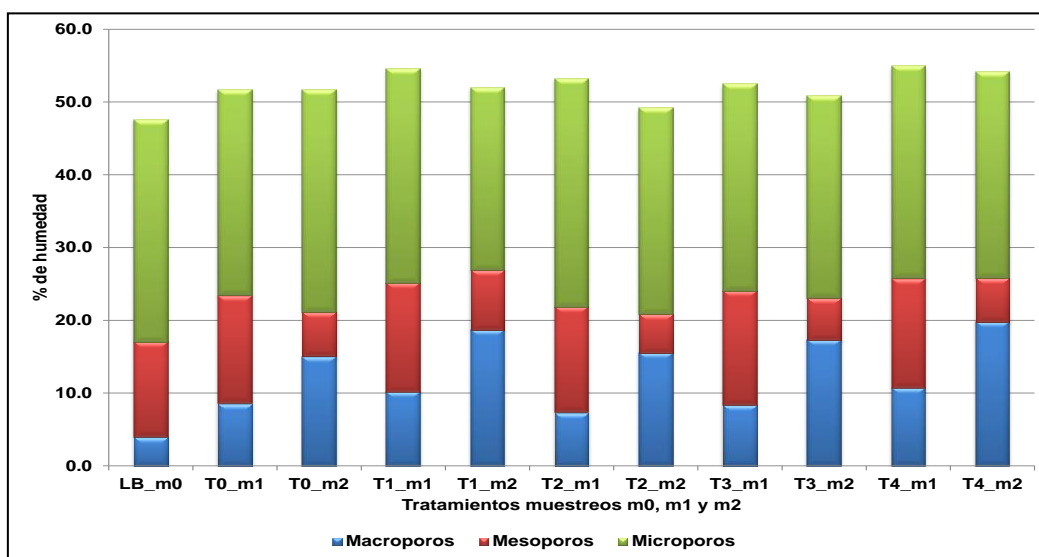


Figura 13. Porcentajes de porosidad (macro, meso y micro), con respecto a los contenidos de humedad, presentes en los suelos en los tres muestreos Línea Base LB (mo_octubre2011), (m1_marzo 2012) y (m1_octubre 2012), para cada uno de los tratamientos. (0 – 10 cm)

La porosidad total (%POR) su variación fue muy similar para ambas épocas de muestreo (figura 13); en el muestreo m1, varió entre 42 y 51%, el valor promedio más alto lo presentó el T4 (Múltiple) y el más bajo T0 (*B. decumbens*). Mientras que en el muestreo m2, varió entre 44 y 58%, el valor promedio más alto lo presentó el T1 (*P. opacifolia*) y T0 (*B. decumbens*) el más bajo.

Esto puede estar relacionado con el contenido de arcillas que facilita una mayor microporosidad en el tratamiento T2 (*B. decumbens*), que presenta un 2.0 % más en el contenido de arcilla en comparación con el T4 (Múltiple), lo cual para una porosidad total similar implica menor disponibilidad de agua para la planta (Montenegro & Malagon, 1990). Por otra parte la macroporosidad como se advirtió anteriormente es el componente más influenciado por la época de muestreo, debido al fenómeno de la histéresis (Arango, 1998; Russell & Wild, 1992). Es de anotar que la Porosidad (%POR) de acuerdo con (Montenegro & Malagón, 1990), en los tres muestreos, presentaron una porosidad total ideal, cercana al 50%.

8.1.1.2 Caracterización química de los tratamientos

En la tabla 8 se observan los contenidos medios obtenidos para cada propiedad química del suelo, medidas en los tratamientos en las diferentes épocas de muestreo m0_octubre 2011, m1_marzo 2012 y m2_octubre2012, de: pH, los porcentajes (%) en saturación de aluminio (SAT_Al) y materia orgánica (MO); los contenidos en mg/kg de suelo de fósforo (P) y Azufre (A); los elementos mayores calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) en $\text{Cmol}_{(+)}\text{/kg}$ y los contenidos en mg/kg de suelo de los elementos menores: hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn) y boro (B).

El estado inicial (línea base), antes del establecimiento de los tratamientos, las características químicas de los suelos (0 – 10 cm) en el área de estudio presentó las siguientes valoraciones según ICA, 1992: pH ácido, una saturación de aluminio alta (30 – 60%), los contenidos de materia orgánica (MO%) fueron altos >3% y el contenido de fósforo (P) y azufre (S) fueron muy bajos con >5.0 mg/kg y > 4.0 mg/kg respectivamente. Los contenidos de elementos mayores fueron muy bajos: calcio (Ca) >2.0 cmol/kg, el magnesio (Mg) > 0.25 cmol/kg, Potasio (K) >0.12 cmol/kg y sodio (Na) >0.15 cmol/kg. Los contenidos de elementos menores presentaron las siguientes valores: Hierro (Fe) alto (80-100 mg/kg), el cobre (Cu), Manganeseo (Mn), medio (19 - 10 mg/kg), el Zinc (Zn) y el Boro (B) bajo contenido (<0.1 mg/kg).

Tabla 8. Variables asociadas a las propiedades químicas y biológicas. Evaluadas en línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012) (0-10 cm)

Tratamiento	pH	MO	P	S	SAT_AL	Ca	Mg	K	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	B	CO ₂
		%	mg/kg	mg/kg	%	Cmol(+)/kg				mg/kg					mg
LB_m0 (<i>B. decumbens</i>)	4.63	5.0	4.7	3.8	47.5	0.65	0.24	0.10	0.07	108	1.03	13.0	0.68	0.13	4.90
T0_m1 (<i>B. decumbens</i>)	4.60	3.5	1.2	5.3	69.1	0.39	0.12	0.05	0.07	118	0.35	6.4	0.20	0.18	10.60
T1_m1 (<i>P. opacifolia</i>)	4.30	3.5	1.2	4.0	70.3	0.34	0.10	0.04	0.06	135	0.32	3.83	0.16	0.26	6.53
T2_m1 (<i>C. moschata</i>)	4.47	3.6	1.3	4.1	64.3	0.42	0.13	0.05	0.09	114	0.36	5.0	0.16	0.14	7.23
T3_m1 (<i>I. edulis</i>)	4.63	3.8	1.5	8.7	64.7	0.48	0.14	0.07	0.07	107	0.47	6.7	0.27	0.14	9.07
T4_m1 (Múltiple)	4.33	3.7	1.0	5.8	68.1	0.37	0.12	0.05	0.06	127	0.35	4.1	0.19	0.27	7.77
T0_m2 (<i>B. decumbens</i>)	4.67	2.8	1.5	6.6	62.1	0.43	0.13	0.09	0.04	172	0.63	6.4	0.63	0.18	4.47
T1_m2 (<i>P. opacifolia</i>)	4.27	2.5	1.9	9.8	63.1	0.43	0.15	0.08	0.03	186	0.53	5.3	0.57	0.18	5.80
T2_m2 (<i>C. moschata</i>)	4.37	2.7	6.2	8.5	54.9	0.63	0.22	0.09	0.03	149	0.64	6.9	0.96	0.14	4.77
T3_m2 (<i>I. edulis</i>)	4.43	3.0	6.8	8.2	50.2	0.72	0.24	0.10	0.03	130	0.73	9.2	0.84	0.15	5.60
T4_m2 (Múltiple)	4.33	2.5	1.2	8.3	63.1	0.39	0.13	0.07	0.02	160	0.56	5.1	0.51	0.18	4.63

Verde: Alto

Amarillo: Medio

Rojo: Bajo

Dónde: pH, MO: Materia orgánica, P: Fósforo; S: Azufre; SAT_AL: Saturación de aluminio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; K: Potasio; Na: Sodio; Fe: Hierro; Cu: Cobre; Mn: Manganeseo; Zn: Zinc; B: Boro y CO₂: Actividad microbiana (mg CO₂/ 100 gr de suelo).

Para los tratamientos los suelos del área de estudio presentaron un pH ácido, ($\text{pH} < 5.0$) IGAC *et al.*, 2002; en el muestreo (m1) varió entre 4.24 y 4.71%, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, el pH presentó valores entre 4.24 y 4.80%, el valor promedio más alto lo presentó el T0 (*B. decumbens*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo.

La saturación de aluminio es alta 30 – 60% (IGAC *et al.*, 2002), en el muestreo m1 se cuantificaron valores entre 59.10 y 76.51%, el valor promedio más alto lo presentó el T0 (*B. decumbens*) y T2 (*C. moschata*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, varió entre 59.10 y 76.51%, el valor promedio más alto lo presentó el T4 (Múltiple) y T2 (*C. moschata*) el más bajo.

Los contenidos de Materia orgánica (MO%) varían entre media y alta (ICA, 1992), en el muestreo m1 son altos $>3\%$, en el fluctuaron entre 3.04 y 4.16%, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, fluctuaron entre 2.00 y 3.51%, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo.

Los contenidos de fósforo (P) en los muestreos m1 y m2, son muy bajos $\text{P} < 20.0 \text{ mg/kg}$ (ICA, 1992), la disponibilidad de fósforo puede ser muy baja en suelos con $\text{pH} < 4.5$ debido a la alta fijación de este elemento que lo lleva a formar compuestos completamente insolubles (Guerrero, 1990; Jaramillo, 2002). En el muestreo m1 fluctuaron entre 0.77 y 1.87 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, variaron entre 0.36 y 10.75 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó

el T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) el más bajo. Las variaciones en el contenido de fósforo pueden ser debidas: a) Los valores bajos pueden estar relacionados por el mayor crecimiento en altura y diámetro que presentó la especie *P. opacifolia* (tratamientos T1 y T4), dado que el fósforo es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas; b) los valores altos pueden estar relacionados en que la especie *I. edulis* puede elevar los niveles de fósforo según los reportes de Brienza Jr. et al., 2000; Da Silva & Pastore, 2011 y de Lojka *et al.*, 2012.

Los contenidos de azufre (S) en los muestreos m1 y m2, son muy bajos ($S < 10.0 \text{ mg/kg}^8$); en el muestreo m1 fluctuaron entre 1.96 y 11.45 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, varió entre 5.67 y 11.48 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T1 (*P. opacifolia*) y T0 (*B. decumbens*) el más bajo. Este aumento en el Azufre es debido a las fuentes agrícolas (Roca fosfórica y Yeso) aplicadas en a la adecuación de los suelos las cuales contienen Azufre.

Los contenidos de elementos mayores (cationes extractables) en los muestreos m1 y m2 son muy bajos; con los valores⁹ siguientes: Calcio (Ca) $< 3.0 \text{ Cmol}_{(+)}/\text{kg}$, Magnesio (Mg) $< 1.5 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$, Potasio (K) $< 0.2 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$. Por tanto la suma de bases de intercambio (Ca+Mg+K) es también muy baja $< 3 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$.

Los contenidos de Calcio (Ca), en el muestreo m1, estuvieron entre 0.29 y 0.60 $\text{Cmol}_{(+)}/\text{kg}$, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más

⁸*Ibid*

⁹*Ibid.*

bajo. Mientras que en el muestreo m2, fluctuaron entre 0.33 y 1.02 Cmol₍₊₎/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) el más bajo.

Los contenidos de Magnesio (Mg), en el muestreo m1 variaron entre 0.08 y 0.21 Cmol₍₊₎/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, fluctuaron entre 0.10 y 0.34 Cmol₍₊₎/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y el T0 (*B. decumbens*) y T4 (Múltiple) el más bajo.

Los contenidos de Potasio (K), en el muestreo m2 variaron entre 0.03 y 0.11 Cmol₍₊₎/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, varió entre 0.06 y 0.13 Cmol₍₊₎/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T2 (*C. moschata*) y el T1 (*P. opacifolia*) y T4 (Múltiple) el más bajo.

Los contenidos de elementos menores en muestreos m1 y m2, en el predio presentaron las siguientes tendencias, según valores índice¹⁰: Hierro alto (Fe) > 50mg/kg; Cobre bajo (Cu) < 1.0 mg/kg; Manganeso (Mn), medio (5 - 10 mg/kg); Zinc bajo (Zn) < 1.5 mg/kg, y Boro bajo (B) <0.2 mg/kg.

Los contenidos de Hierro (Fe), en el muestreo m1 variaron entre 84.4 y 160.8 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T1 (*P. opacifolia*) y el más bajo T3 (*I. edulis*). Mientras que en el muestreo m2, los valores estuvieron entre 127.2 y 220.8mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T1 (*P. opacifolia*) y el más bajo T3 (*I. edulis*). En general los

¹⁰*Ibid.*

contenidos de (Fe) son altos, posiblemente porque las condiciones extremas de acidez ($\text{pH} < 5$) en el suelo inhiben la actividad de la Eubacteria género *Thiobacillus*, muy importante en los procesos de oxidación del hierro, del ácido sulfhídrico, del azufre elemental, de la pirita y del cobre (Jaramillo, 2002).

Los contenidos de cobre (Cu), en el muestreo m1 variaron entre 0.16 y 0.56 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, varió entre 0.40 y 0.84 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo.

Los contenidos de manganeso (Mn), en el muestreo m1 fluctuaron entre 3.20 y 10.00 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, se encontraron valores entre 3.76 y 10.92 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) el más bajo.

Los contenidos de Zinc (Zn), en el muestreo m1, se encontraron valores entre 0.36 y 1.60 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T3 (*I. edulis*) y T1 (*P. opacifolia*) y T2 (*C. moschata*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, variaron entre 0.08 y 0.31 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T2 (*C. moschata*) y T4 (Múltiple) el más bajo.

Los contenidos de Boro (B), en el muestreo m1, alcanzaron valores entre 0.05 y 0.38 mg/kg, el valor promedio más alto lo presentó el T0 (*B. decumbens*) y el T1 (*P. opacifolia*) y T2 (*C. moschata*) el más bajo. Mientras que en el muestreo m2, fluctuaron entre 0.07 y 0.22 mg/kg, el valor promedio el más bajo fue T2 (*C. moschata*).

8.1.1.3 Caracterización biológica de los tratamientos

De acuerdo con la metodología para construcción del indicador biológico se consideró la densidad (individuos/m² de suelo) de macroinvertebrados y la actividad microbiana cuantificada por la producción de mg de CO₂ por 100 gr de suelo.

Macroinvertebrados

Para el cuantificación de la densidad de individuos presente por metro cuadrado (individuos/m²) de macroinvertebrados se identificaron hasta a nivel de orden, familia y grupo funcional, se contabilizaron y se agruparon en grandes unidades taxonómicas (UT), tales como Himenóptera (hormigas), Isóptera (termitas), Haplotaxida (lombriz de tierra), Coleóptera (escarabajos), Lepidóptera, Diplópoda, entre otras (tabla 9).

Tabla 9. Grupos taxonómicos encontrados en el área de estudio, 2012. ASA – Meta

Orden	Familia	Grupo Funcional
Coleóptera	Carabidae	Depredador
	Chrysomelidae	Herbívoro
	Coccinellidae	Depredador
	Curculionidae	Herbívoro
	Elateridae	Herbívoro
	Staphylinidae	Depredador
	Tenebrionidae	Detritívoro
Collembola	Entomobryidae	Detritívoro
Dermáptera	Forficulidae	Depredador
<i>Clase</i> Diplópoda ¹¹	ND (No Determinada)	Detritívoro
Díptera	Phoridae	Detritívoro
Haplotaxida/Oligochaeta	Glossoscolecidae	Detritívoro
Hemíptera	Coccidae	Depredador
	Cydnidae	Depredador
	Reduviidae	Depredador
Hymenóptera	Formicidae	Herbívoro
Isóptera	Rhinotermitidae	Detritívoro
Lepidóptera	Gelechidae	Fitófaga
Orthoptera	Blattidae	Herbívoro
	Gryllidae	Herbívoro
Thysanoptera	Thripidae	Depredador
Araneida	Araneidae	Depredador

¹¹ No se clasificó, dado que la taxonomía de los diplópodos es compleja y controvertida; según Myers, *et. al.* 2008.

En la tabla 9 y figura 14, se observa que el grupo taxonómico con mayor número de familias registradas fue el orden Coleóptera con siete (7) familias pertenecientes a los grupos funcionales de detritívoros, herbívoros y depredadores (Moreira *et al.*, 2012), seguidos del orden Hemíptera con tres (3) familias del grupo funcional depredadores y el orden Orthoptera con dos (2) familias del grupo funcional herbívoro; los demás orden taxonómicos presentaron una familia.

En la figura 14, los tratamiento T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) presentaron la mayor riqueza taxonómica y número de familias reportadas (10) cada uno, seguido de los tratamientos T1 (*P. opacifolia*) y el testigo T0 (*B. decumbens*) con (9) y por último el tratamientos T2 (*C. moschata*) con (7).

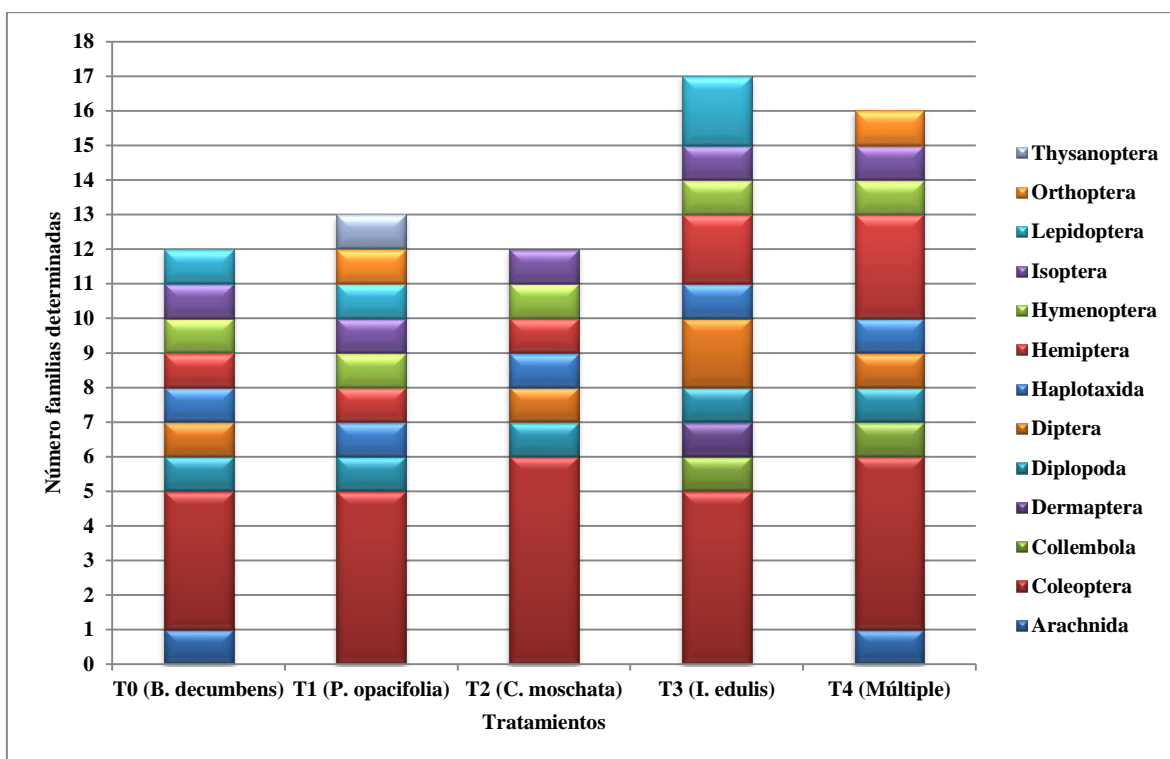


Figura 14. Riqueza taxonómica de la macrofauna, número de familias presentes del suelo en cada tratamiento.

Las unidades taxonómicas encontradas 13 U.T (tabla 9) en el área de estudio, las más representativas fueron de los órdenes Isóptera (termites); Hymenóptera (hormigas) Haplotaxida/Oligochaeta (lombriz de tierra) y Coleóptera (escarabajos); las tres primeras se consideran especies de gran valor económico y ecológico pues son considerados como los ingenieros del ecosistema (Lavelle *et al.*, 1994; Moreira *et al.*, 2012; Ruiz *et al.*, 2008; Swift & Bignell. 2001). Esta cantidad de Unidades Taxonómicas (13 UT) encontradas, se consideran bajas al compararse con otros sistemas naturales con cierto grado de conservación como los bosques de galería (35 UT) y un pastizal (*B. decumbens*) (26 UT) y pastizal (*B. decumbens* + *Kudzu*) (32 UT) (Decaëns *et al.*, 1994), o un bosque secundario de tres años (29 UT) y Sistema de multiestratos (Bactris/Cedrelinga/Inga/Collubrina) (31 UT) (Pashanasi, 2001).

La comunidad total por m² de macroinvertebrados encontrada fue de 10404 especímenes; los de mayor representatividad en densidad en todos los tratamientos fueron los representados por el orden Isóptera (termitas) con 6858 individuos/m², que corresponde al 66% del total de individuos encontrados, seguido por el orden Hymenóptera (hormigas) con 1954 individuos/m² con (19%), y por el orden Haplotaxida (lombrices) con 708 individuos/m² (7%). Estos tres órdenes suman 9520 individuos que representan cerca del 90% en total de los individuos registrados; que de acuerdo a la clasificación de los grupos funcionales de la biota del suelo (Moreira *et al.*, 2012) son los ingenieros del suelo y transformadores (tabla 10 y figura 15).

Tabla 10. Valores de densidad (individuos/m²) de macroinvertebrados según tratamientos. (0-10cm). ASA- Meta

Tratamiento	Isóptera (termitas)	Hymenóptera (hormigas)	Haplotaxida (lombriz)	Coleóptera (escarabajos)	Otras	Total	(%)
T0 (<i>B. decumbens</i>)	1738	750	225	54	21	2788	26.8
T1 (<i>P. opacifolia</i>)	1504	325	88	79	163	2158	20.7
T2 (<i>C. moschata</i>)	1283	458	121	54	96	2013	19.3
T3 (<i>I. edulis</i>)	1292	242	200	108	108	1950	18.7
T4 (Múltiple)	1042	179	75	54	146	1496	14.4
Total	6858	1954	708	350	533	10404	100.0
(%)	65.9	18.8	6.8	3.4	5.0	100.0	

El grupo funcional de predadores y plagas representados por el orden Coleóptera (escarabajos) con 350 individuos/m² (3%) y por último los grupos funcionales de herbívoros, descomponedores agrupados bajo el ítem de otras (Lepidóptera, y la clase Diplopoda, etc.) con 533 individuos/m² con (5%) (Tabla 10).

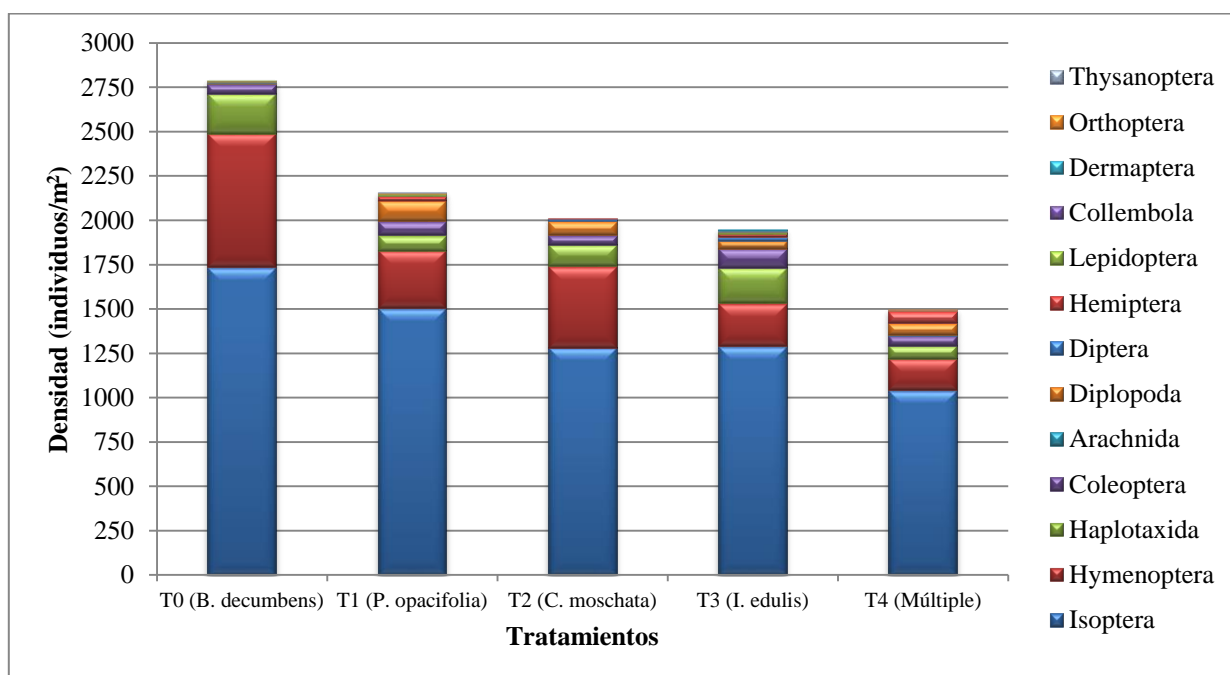


Figura 15. Densidad de macroinvertebrados (individuos/m²) presentes en los tratamientos. (0-10 cm). ASA- Meta.

Por tratamientos se observa en la tabla 10 y figura 15, que el testigo T0 (*B. decumbens*) presentó la mayor densidad (2788 individuos/m²), que representa 27% del total de macroinvertebrados reportados en el experimento; seguido en su orden de los tratamientos, T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple); la mayor presencia de macroinvertebrados en el testigo es debido, a que en este no se realizaron labores adecuación (trazado, control de pastos, control de plagas, ahoyado y siembra, ni la aplicación de insumos de síntesis química), dado que los macroinvertebrados responden a las perturbaciones ocasionadas por el manejo que favorecen la presencia de algunos organismos y disminuyendo la de otros (Delgado *et al.*, 2011; Marín & Feijoo, 2007; Velásquez *et al.*, 2007).

En general, la densidad de termitas es relativamente alta, al compararlo con lo reportado por Decaens *et al.*, 1994; que encontraron en una pastizal sin asociación (*B. decumbens*) y pastizal asociado (*B. decumbens* + *Kudzu*) 992 y 1034 individuos/m² respectivamente, esto es posiblemente a que los experimentos se establecieron paralelos al de bosque de galería (franja de protección de los 30 m) donde en general es alta la presencia de la especie Isóptera (2806 individuos/m²), reportado por los mismos autores.

El orden Isóptera (termitas) se encontraron en todos los tratamientos, siendo ligeramente mayor en el T0 (*B. decumbens*) (1738 individuos/m²) que en los otros tratamientos (agroforestales) que variaron de 1504 a 1283 individuos/m² en las especies forestales establecidas como monoespecie y las multiespecie T4 (mezcla) que presentaron el menor valor (1042 individuos/m²); En general, la densidad de termitas es relativamente alta, al compararlo con lo reportado por Decaens *et al.*, 1994; que encontraron en una pastizal sin asociación (*B. decumbens*) y pastizal asociado (*B. decumbens* + *Kudzu*) 992 y 1034

individuos/m² respectivamente, esto es posiblemente a que los experimentos se establecieron paralelos al de bosque de galería (franja de protección de los 30 m) donde en general es alta la presencia de la especie Isóptera (2806 individuos/m²), reportado por los mismos autores.

El orden Hymenóptera (hormigas) se encontró en todos los tratamientos, siendo mayor en el tratamiento testigo T0 (*B. decumbens*) con 750 individuos/m², que en los otros tratamientos (agroforestales) que variaron de 458 a 242 individuos/m² en las especies forestales establecidas como monoespecie y las multiespecie T4 (Múltiple) que presentaron el menor valor (179 individuos/m²); el valor encontrado en el testigo T0 (*B. decumbens*), es mayor al reportado por (Jiménez *et al.*, 1998) en un trabajo realizado sobre comunidades de lombrices en pastizales asociados (*B. decumbens* + *Kudzu*), ellos obtuvieron 534 individuos/m²; con respecto a los otros tratamientos los valores corresponden a los reportados por (Pashanasi, 2001) en un trabajo realizado en Yurimaguas y Pucallpa – Perú; que encontró en promedio 238 y 245 individuos/m² en un sistema agroforestales (*Bactris* / *Cedrelinga* / *Inga* / *Collubrina*) y (plantación de *Hevea*) respectivamente.

El orden *Haplotaxida* (lombriz de tierra) se encontró en todos los tratamientos, la densidad (individuos/m²) varió de así: T0=225, T3=200, T2=121, T1=88 y T4= 75 (tabla 21); igual comportamiento lo reporta en trabajos realizados en Colombia por (Decaens *et al.* 2004; Feijoo *et al.*, 1994) en diferentes sistemas de producción así: en un selva secundaria (bosque de galería, 210 individuos/m²), en pastos (*B. humidícola*, *B. decumbens* y *B. decumbens* + *Kudzú*), encontraron 363, 213 y 139 individuos/m² respectivamente; en una sabana nativa de suelo de altillanura 157 individuos/m².

El orden *Coleóptera* (escarabajos) se encontró en todos los tratamientos, la mayor densidad (individuos/m²) se presentó en el tratamiento T3 (*I. edulis*) con 108 individuos/m², seguido del T1 (*P. opacifolia*) con 79 individuos/m² y los otros tratamientos presentaron 54 individuos/m² cada uno, la mayor presencia de escarabajos en esta especie se puede deber a que los árboles del género inga son visitadas por especies benéficas y predadores entre las que se encuentran: abejas, avispas, hormigas y mariposas, lo anterior debido a que, las hojas de la especie *I. edulis* segregan un néctar extrafloral que atrae a los insectos (Falcão & Clement, 2000; Koptur, 1983; Villachica, 1996). Igualmente dentro de las familias encontradas en presente trabajo se reportan las Chysomelidae, que es una plaga para el *I. edulis* (Villachica, 1996), y las familias Carabidae y Staphylinidae, Baloriani *et al.*, 2009, estos autores mencionan la importancia de la cantidad de alimento disponible en la selección de sus hábitats y que además son especies consumidoras principalmente de huevos, larvas y adultos de otros pequeños insectos.

Actividad microbiana

En la tabla 11 se observa que la actividad microbiana expresada como la producción de mg CO₂ de la biomasa microbiana por 100 gr de suelo es muy baja en las tres épocas de muestreo porque están cerca o por debajo de 10 mg de CO₂ de acuerdo con (USDA, 1999); lo anterior puede estar relacionado con la acidez del suelo para las épocas de muestreo pH ácidos (4.25 – 4.65) (ver *ítem* caracterización química de los tratamientos). De acuerdo con (Hernández, 2002 ; Ibáñez, 2007; Jaramillo, 2002) los valores de pH ácidos (4.24 – 4.80) son una limitante para la actividad microbiana de bacterias y microorganismos de vital importancia en el ciclo de los nutrientes, principalmente de las bacterias que están relacionadas con procesos de fijación simbiótica y asimbiótica del nitrógeno, con la solubilización del fósforo y las que

están involucradas en los procesos de nitrificación, las cuales por lo general, para su normal funcionamiento necesitan que el medio edáfico presente un pH mayor a 5.5.

Es de anotar que con respecto a la línea base (LB_m0 octubre de 2011) con un registro promedio de 9.9 mg de CO₂ se presentó un descenso en los dos muestreos subsecuentes m1_marzo 1012 y m2_octubre 2012, que pasaron de 8.2 a 5.1 mg de CO₂ respectivamente.

Tabla 11. Valores medios del seguimiento a la actividad microbiana, producción de mg de CO₂ por cada 100 gr de suelo, en los tratamientos en tres temporadas de muestreo. ASA – Meta.

Tratamiento	mg de CO ₂ / 100 gr de suelo		
	Oct/2011 (m0)	Mar/2012 (m1)	Oct/2012 (m2)
T0 (<i>B. decumbens</i>)	9.9 (línea base)	10.6	4.5
T1 (<i>P. opacifolia</i>)		6.5	5.8
T2 (<i>C. moschata</i>)		7.2	4.8
T3 (<i>I. edulis</i>)		9.1	5.6
T4 (Múltiple)		7.8	4.6
Promedio	9.9	8.2	5.1

En cuanto a la actividad microbiana, los datos de producción de CO₂ son bajos, comparados con los reportados en un trabajo realizado por IGAC, 1993, que encontraron que, la producción de CO₂ en un paisaje de piedemonte sobre un relieve de abanico (Oxic Dystropepts¹²) con una cobertura de pastos braquiaria es de 47.8 mg CO₂/100 g. de suelo.

En el anterior trabajo (IGAC, 1993), se encontró que, la producción de CO₂ es mayor en los suelos de bosque primario intervenido que en los bosques totalmente intervenidos; en estos últimos los valores de CO₂ encontrados se sitúan entre 24 y 45 mg CO₂/100 g. de suelo.

¹²Igual unidad taxonómica a la de los suelos de la CPA

Igualmente (Mora, 2006) en un estudio de actividad microbiana en la rizosfera de un cultivo de Cacao (Agroforestal) en el Valle del Cauca, encontró que la cantidad de bióxido de carbono (CO₂) oscilo, entre 39 y 24 mg /100 g. suelo.

8.1.2 Selección de variables indicadoras de la calidad y construcción de índices de calidad física, química y biológica de los tratamientos evaluados.

Utilizando el Análisis de Componentes Principales (ACP) se identificaron las diferencias entre las variables físicas, químicas y biológicas caracterizadas de la línea base y los monitores, lo cual permitió establecer en qué momento se manifestó la mayor diferencia entre los tratamientos y seleccionar las variables para la construcción de los índices de calidad física, química y biológica de los tratamientos en el suelo.

El análisis multivariado (ACP - Análisis de Componentes Principales), muestra que los dos primeros componentes principales explican el 60% de la variabilidad de los datos, el primer componente el 37% y el segundo el 23% de la varianza. (Figura 16).

La variabilidad del 60 % de la línea base y los tratamientos en cada uno de los períodos monitoreados es significativa en un 61.1% con $p < 0.001$ (prueba de Monte Carlo) por efecto de cambios en los valores de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo; permitiendo diferenciar entre período de monitoreo y las variables explicativas dentro de cada monitoreo (Figura 17).

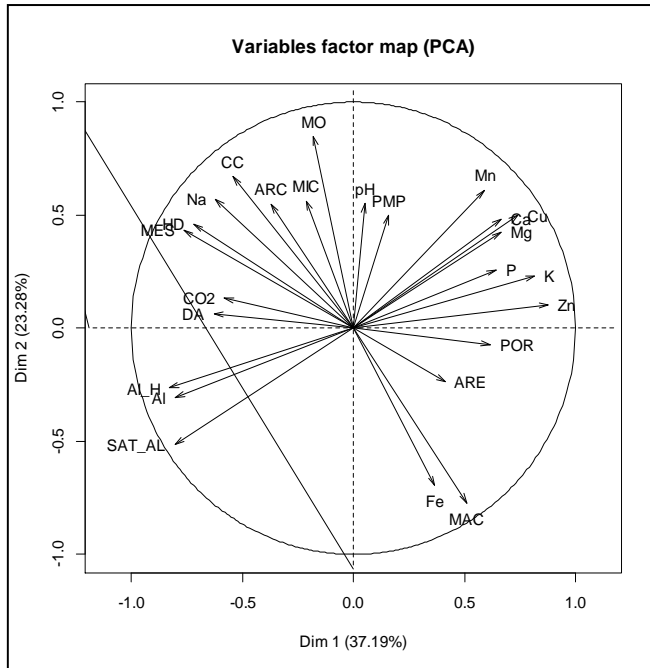


Figura 16. Proyección de las variables físicas, químicas y biológicas evaluadas en el círculo de correlación en los componentes Dim 1 y Dim 2, para los monitoreos línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012)

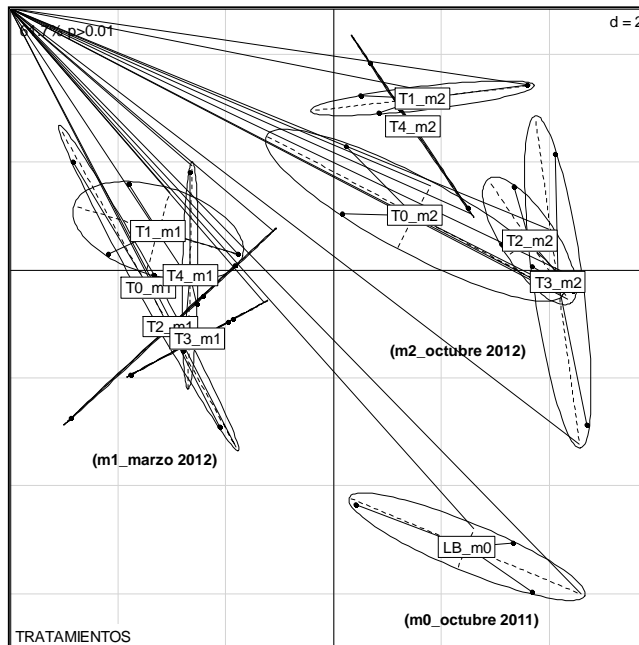


Figura 17. Proyección de las variables físicas, químicas y biológicas evaluadas en cada muestreo; línea base LB (m0_octubre 2011) y tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4 (m1_marzo 2012 y m2_octubre 2012)

Por diferencia en período se presentan tres conglomerados así: uno de la línea base Lb-m0 (octubre 2011), el segundo correspondiente a los tratamientos en el monitoreo (m1_marzo 2012) y el tercero en el monitoreo (m2_octubre 2012). Este distanciamiento entre línea base (m0_octubre 2011) y el monitoreo (m1_marzo 2012), puede ser debido al proceso de aislamiento (evitar pastoreo) y del manejo agronómico inicial para el establecimiento de los tratamientos (figura 16).

Tabla 12. Análisis de varianza para las propiedades físicas, monitoreo (m1_marzo 2012)

Parámetro	Pr > F	Media	CV	Tratamientos				
				T0	T1	T2	T3	T4
				(<i>B. decumbens</i>)	(<i>P. opacifolia</i>)	(<i>C. moschata</i>)	(<i>I. edulis</i>)	(<i>Mutiestrata</i>)
DA (gr/cm ³)	n.s	1.42	3.7	1.45 ^a	1.41 ^a	1.45 ^a	1.43 ^a	1.35 ^a
SAT (%)	n.s	37.6	5.0	35.67 ^a	38.73 ^a	36.57 ^a	36.67 ^a	40.60 ^a
CC (%)	n.s	31.3	5.1	29.80 ^a	31.47 ^a	31.57 ^a	30.87 ^a	32.73 ^a
PMP (%)	n.s	20.7	8.1	19.47 ^a	20.97 ^a	21.67 ^a	19.83 ^a	21.60 ^a
HD (%)	n.s	10.6	12.9	10.33 ^a	10.50 ^a	9.90 ^a	11.03 ^a	11.13 ^a
MAC (%)	n.s	9.0	19.8	8.57 ^a	10.17 ^a	7.33 ^a	8.30 ^a	10.67 ^a
MES (%)	n.s	15.0	13.6	14.83 ^a	14.90 ^a	14.43 ^a	15.70 ^a	15.07 ^a
MIC (%)	n.s	29.3	7.4	28.20 ^a	29.50 ^a	31.40 ^a	28.43 ^a	29.17 ^a
POR (%)	n.s	46.5	4.5	45.33 ^a	46.67 ^a	45.33 ^a	46.00 ^a	49.33 ^a
ARE (%)	n.s	60.1	5.0	60.00 ^a	60.67 ^a	60.67 ^a	60.67 ^a	58.67 ^a
LIM (%)	n.s	19.8	11.2	21.67 ^a	20.67 ^a	20.00 ^a	21.33 ^a	21.33 ^a
ARC (%)	n.s	21.0	12.2	45.33 ^a	46.67 ^a	45.33 ^a	46.00 ^a	49.33 ^a

FV: Factor de variación; CV: Coeficiente de variación; * Diferencia significativa; n.s: no significancia; Promedios con letras iguales en una misma fila no difieren significativamente (Duncan P<0.05)

Por diferencia entre las variables en cada monitoreo se observa que en el conglomerado del monitoreo (m1_marzo 2012) no se presentan diferencias significativas entre el testigo y los tratamientos en la mayoría de los parámetros físicos, químicos y biológicos (Tabla 12 y 13), excepto para el pH, dado que se encuentran relativamente juntos a diferencia del conglomerado correspondiente al monitoreo (m2_octubre 2012) en el que se comienza a apreciar un distanciamiento entre los diferentes tratamientos y el testigo.

Tabla 13. Análisis de varianza para las propiedades químicas y biológico, monitoreo (m1_marzo 2012)

Parámetro	Pr > F	Media	CV	Tratamientos				
				T0	T1	T2	T3	T4
				<i>(B. decumbens)</i>	<i>(P. opacifolia)</i>	<i>(C. moschata)</i>	<i>(I. edulis)</i>	<i>(Mutiestrata)</i>
pH	*	4.46	2.9	4.60 ^a	4.30 ^b	4.47 ^{ba}	4.63 ^a	4.33 ^b
MO (%)	n.s	3.59	13.4	3.47 ^a	3.47 ^a	3.60 ^a	3.77 ^a	3.67 ^a
P (mg/kg)	n.s	1.25	24.5	1.23 ^a	1.23 ^a	1.30 ^a	1.50 ^a	1.00 ^a
S (mg/kg)	n.s	5.58	82.6	5.27 ^a	4.00 ^a	4.10 ^a	8.73 ^a	5.80 ^a
AL_H (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	2.36	11.3	2.40 ^a	2.50 ^a	2.30 ^a	2.37 ^a	2.27 ^a
AI (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	2.03	12.2	2.10 ^a	2.13 ^a	1.93 ^a	2.03 ^a	1.93 ^a
SAT_AL (%)	n.s	67.29	6.5	69.13 ^a	70.30 ^a	64.30 ^a	64.67 ^a	68.07 ^a
Ca (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	0.4	24.5	0.39 ^a	0.34 ^a	0.42 ^a	0.48 ^a	0.37 ^a
Mg (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	0.12	22.5	0.12 ^a	0.10 ^a	0.13 ^a	0.14 ^a	0.12 ^a
K (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	0.05	41.2	0.05 ^a	0.04 ^a	0.05 ^a	0.07 ^a	0.05 ^a
Na (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	0.07	31.8	0.07 ^a	0.06 ^a	0.09 ^a	0.07 ^a	0.06 ^a
Fe (mg/kg)	n.s	120	16.9	118 ^a	135 ^a	114 ^a	107 ^a	127 ^a
Cu (mg/kg)	n.s	0.37	13.5	0.35 ^a	0.32 ^a	0.36 ^a	0.47 ^a	0.35 ^a
Mn (mg/kg)	n.s	5.2	33.2	6.37 ^a	3.83 ^a	5.03 ^a	6.67 ^a	4.10 ^a
Zn (mg/kg)	n.s	0.19	40.6	0.20 ^a	0.16 ^a	0.16 ^a	0.27 ^a	0.19 ^a
CO ₂ (mg)	n.s	8.2	25.9	10.60 ^a	6.53 ^a	7.23 ^a	9.07 ^a	7.77 ^a

FV: Factor de variación; CV: Coeficiente de variación; * Diferencia significativa; n.s: no significancia; Promedios con letras iguales en una misma fila no difieren significativamente (Duncan P<0.05)

De acuerdo con lo anterior se procedió del monitoreo (m2_ octubre 2012), a seleccionan las variables físicas, químicas y biológicas para la construcción de los índices de calidad de los suelos, como complemento en este período a la parte biológica se le adiciona los datos del monitoreo de macroinvertebrados.

8.1.3 Selección de variables indicadoras de calidad física, química y biológica para la construcción de los índices.

Cada especie vegetal en los tratamientos hace un uso diferencial del suelo de acuerdo a sus necesidades nutricionales, de agua y de anclaje y a través de su biomasa que cae le devuelve parte de los nutrientes extraídos, presentándose una dinámica de recirculación de elementos entre el suelo y la vegetación. De acuerdo a lo anterior se puede deducir que los suelos de cada

tratamiento poseen su propia calidad, que se puede estimar seleccionando variables físicas, químicas y biológicas como indicadoras, que permitan valorar cambios cuantitativos en el uso y de las prácticas de manejo.

8.1.3.1 Selección de variables físicas indicadoras de la calidad del suelo

Las variables físicas analizadas en cada uno de los bloques y tratamientos para una profundidad 0-10 cm en el monitoreo m2_octubre 2012 fueron: Saturación (SAT), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), Humedad Disponible (HD), Densidad Aparente (DA), Porosidad Total (POR), %Arena (ARE), %Limo (LIM), %Arcilla (ARC), Macroporos (MAC), Mesoporos (MES) y Microporos (MIC).

Se realizó el ACP con todas las variables y se excluyó para un siguiente análisis el % Limos (LIM), dado que esta variable se localizan cerca al centro del círculo de correlaciones, lo que indica un aporte bajo a la variabilidad de los datos.

El ACP mostrado en la Figura 18 separó los tratamientos en función de la compactación y del agua en el suelo; los dos primeros factores explican el 63% de la variabilidad de los datos, explicando el primer factor (F1= 35%) de la varianza y el segundo (F2=28%). El primer factor separó los tratamientos en función de los Macroporos (MAC), Microporos (MIC), Saturación (SAT), Porosidad Total (POR) y Densidad Aparente (DA); el segundo factor los separó de acuerdo al Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Capacidad de Campo (CC). Siendo la Densidad Aparente (DA) opuesta a la Porosidad Total (POR).

El primer componente separó el tratamiento T1 (*P. opacifolia*) con el mayor valor de Macroporos (MAC) de 18.7%, Saturación (SAT) de 40.5% y Porosidad Total (POR) de 51.3%, de los tratamientos T0 (*B. decumbens*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) con altos valores Microporosidad (MIC) mayor de 25.1% y Densidad aparente (DA) mayores a 1.29 gr/cm³. El segundo factor separó el tratamiento testigo T0 (*B. decumbens*) con mayor valor de Capacidad de Campo (CC) de 26.7%, Punto de Marchitez Permanente (PMP) de 22.2% de los tratamientos T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple), con menores valores en estas variables (figura 19 y tabla 14).

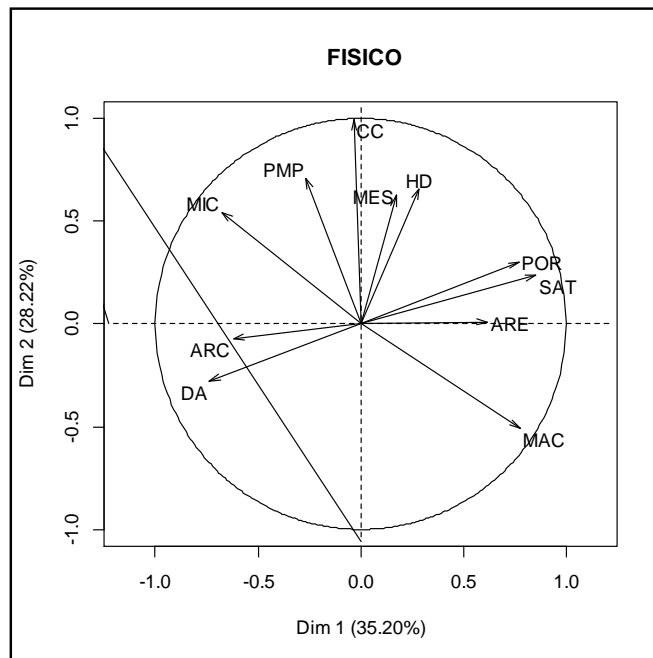


Figura 18. Proyección de las variables físicas evaluadas (m2_octubre 2012) en el círculo de correlación en función de sus aportes a la conformación de los factores F1 y F2 del ACP.

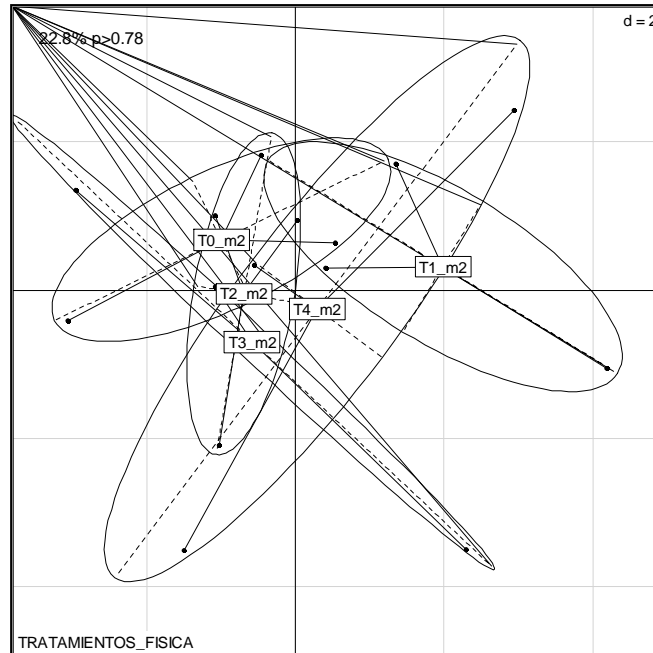


Figura 19. Distribución de los tratamientos T0 (*B. decumbens*), T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) en función del aporte de las variables físicas a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP, en el muestreo (m2_octubre 2012).

Tabla 14. Análisis de varianza para las propiedades físicas, (m2_octubre 2012)

Parámetro	Pr > F	Media	CV	Tratamientos				
				T0	T1	T2	T3	T4
				(<i>B. decumbens</i>)	(<i>P. opacifolia</i>)	(<i>C. moschata</i>)	(<i>I. edulis</i>)	(Múltiple)
DA (gr/cm ³)	n.s	1.34	5.6	1.37 ^a	1.29 ^a	1.32 ^a	1.35 ^a	1.36 ^a
SAT (%)	n.s	38.7	10.4	37.7 ^a	40.5 ^a	37.4 ^a	37.7 ^a	40.3 ^a
CC (%)	n.s	25.7	9.5	26.7 ^a	25.8 ^a	25.6 ^a	24.7 ^a	25.6 ^a
PMP (%)	n.s	20.9	9.8	22.2 ^a	19.5 ^a	21.5 ^a	20.5 ^a	21.0 ^a
HD (%)	n.s	4.7	30.4	4.5 ^a	6.3 ^a	4.1 ^a	4.2 ^a	4.5 ^a
MAC (%)	n.s	17.2	23.3	15.0 ^a	18.7 ^a	15.5 ^a	17.3 ^a	19.8 ^a
MES (%)	n.s	6.31	31	6.2 ^a	8.2 ^a	5.4 ^a	5.8 ^a	6.1 ^a
MIC (%)	*	28	6.9	30.5 ^a	25.1 ^b	28.3 ^{ba}	27.8 ^{ba}	28.3 ^{ba}
POR (%)	n.s	49.5	5.8	48.0 ^a	51.3 ^a	50.3 ^a	49.0 ^a	49.0 ^a
ARE (%)	n.s	62.8	3.6	63.7 ^a	64.0 ^a	61.7 ^a	61.7 ^a	63.3 ^a
LIM (%)	n.s	19.7	7.1	19.7 ^a	19.7 ^a	19.3 ^a	20.0 ^a	20.0 ^a
ARC (%)	n.s	18.2	11.2	17.7 ^a	17.0 ^a	19.7 ^a	19.0 ^a	17.7 ^a

FV: Factor de variación; CV: Coeficiente de variación; * Diferencia significativa; n.s: no significancia; Promedios con letras iguales en una misma fila no difieren significativamente (Duncan P<0.05)

El ACP muestra tendencias de diferencia entre los tratamientos, una prueba de Monte Carlo (22.8% con p<0.78) complementada con el análisis de varianza y la prueba de Duncan

indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos para la mayoría de las variables físicas excepto para la microporosidad (MIC), (Tabla 14).

No obstante a lo anterior, en la selección de las variables físicas indicadoras de la calidad del suelo, se utilizó la contribución (peso) de cada variable a la formación de los factores 1 y 2 (Tabla 15), dados por el análisis de componentes principales (ACP). De acuerdo con lo anterior las variables que más contribuyeron a la explicación de la diferenciación de los tratamientos son: Saturación, Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente, Humedad Disponible, Densidad Aparente, Porosidad Total, contenidos de Arena y Arcilla, Macroporos, Mesoporos y Microporos. Por tanto las anteriores variables serían las más propicias para ser empleadas para la construcción del índice de la calidad física de los tratamientos.

Tabla 15. Contribución de cada variable física a la construcción de los factores 1 y 2

Variables Físicas	Factor 1	Factor 2
Saturación (SAT)	1875	181
Capacidad de Campo (CC)	3	3186
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	183	1626
Densidad Aparente (DA)	1403	251
Porosidad (POR)	1538	294
Arena (ARE)	979	0
Arcilla (ARC)	995	16
Macroporos (MAC)	1553	831
Mesoporos (MES)	76	1264
Microporos (MIC)	1184	954
Humedad Disponible (HD)	211	1397

Las anteriores variables físicas seleccionadas como indicadoras de calidad del suelo han sido propuestas por (Astier-Calderon, 2002; Doran & Parkin, 1994; Larson y Pierce 1994;

Orjuela, 2009; Rodríguez *et al.*, 2013; USDA, 1999; Velásquez *et al.*, 2007) para comparar y monitorear la calidad física de los suelos.

8.1.3.2 Selección de variables químicas indicadoras de la calidad del suelo.

Se realizó el ACP con todas las variables químicas y se excluyó para un siguiente análisis el Boro (B); dado que estas variable se localizan cerca al centro del círculo de correlaciones, lo que indica un aporte bajo a la variabilidad de los datos.

Los variables químicas analizadas en cada uno de los bloques y tratamientos para una profundidad 0-10cm en el monitoreo m2_octubre 2012 son: pH, Materia orgánica (MO), Fósforo (P), Azufre (S), Aluminio (AL_H), Aluminio intercambiable (AI), Saturación de aluminio (SAT_Al), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Sodio (Na), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeso (Mn) y Zinc (Zn).

Un análisis multivariado (figura 20) separó los tratamientos de acuerdo al pH, a la acidez del suelo (AL_H, AI y SAT_Al), Materia orgánica (MO) y el contenido de elementos mayores Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na) y elementos menores como Manganeso (Mn) y Cobre (Cu).

Los dos primeros componentes o factores explican el 62% de la variabilidad de los datos; el primer factor aporta a la varianza $F1=37\%$ y el segundo $F2=25\%$. El primer factor separó significativamente los tratamientos en función de la acidez del suelo (AL_H, AI y SAT_AL) y los contenido elementos mayores (Ca, Mg y K) y de elementos menores (Cu, Mn y Zn) y el contenido de materia orgánica (MO); el segundo factor los separó de acuerdo con el

pH y los contenidos de azufre (S) y sodio (Na) (Figura 19). Siendo la saturación de aluminio (SAT_AL) y el contenido de calcio (Ca) variables opuestas.

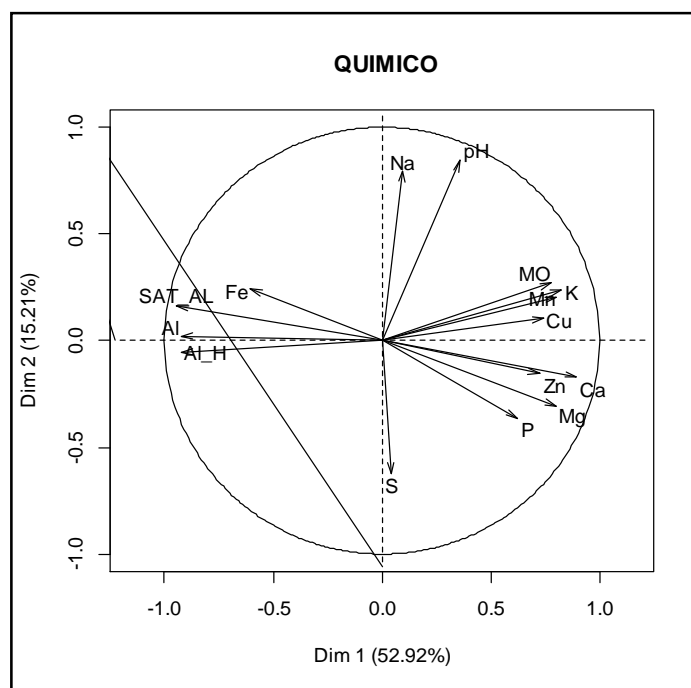


Figura 20. Proyección de las variables químicas evaluadas (m2_octubre 2012) en el círculo de correlación en función de sus aportes a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP.

En un análisis de los tratamientos T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple), se observa la separación con el testigo T0; además, se evidencia dos conglomerados o clúster: uno donde se agrupan el tratamiento T1 (*P. opacifolia*) y T4 (Múltiple) y otro correspondiente a los tratamientos T2 (*C. moschata*) y T3 (*I. edulis*) (Figura 21).

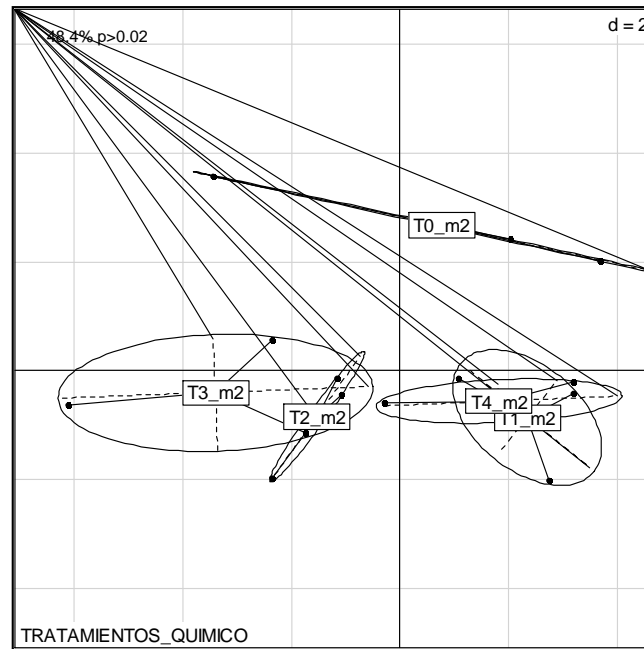


Figura 21. Distribución de los tratamientos T0 (*B. decumbens*), T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) en función del aporte de las variables químicas a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP, en el muestreo (m2_octubre 2012).

El primer componente separó significativamente el tratamiento T1 (*P. opacifolia*) con el mayor valor de Saturación de aluminio (SAT_AL) de 63.1%, Acidez intercambiable (AI) de 1.73 (Cmol₍₊₎/kg) de los tratamientos T2 (*C. moschata*) y T3 (*I. edulis*), con altos valores de elementos mayores tales como Calcio (Ca) mayor de 0.43 (Cmol₍₊₎/kg), Magnesio (Mg) mayor de 0.15 y Potasio (K) mayor de 0.8 (Cmol₍₊₎/kg) y de elementos menores como el Cobre (Cu) mayor de 0.53 (mg/kg) y Manganeso (Mn) mayor de 5.3 (mg/kg). El segundo factor separó el tratamiento T0 (*B. decumbens*) con valores altos de pH de 4.67 y contenido de Sodio (Na) de 0.048 (Cmol₍₊₎/kg) de los tratamientos T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple), que presentaron valores altos en contenidos de Azufre (S) mayor 6.56 (mg/kg) (Figura 21 y tabla 16).

La variabilidad del 62% entre los tratamientos monitoreados en (m2_octubre2012) es significativa en un 48% con $p < 0.02$ (prueba de Monte Carlo), complementada con el análisis de varianza y la prueba de Duncan ($p < 0.05$) indican que hay diferencias significativas entre tratamientos para las variables pH, fósforo (P), Azufre (S), aluminio intercambiable (AI), Contenidos de calcio (Ca), sodio (Na), hierro (Fe) y Manganeso (Mn) (tabla 16).

Tabla 16. Análisis de varianza para las propiedades químicas (m2_octubre 2012)

Parámetro	Pr > F	Media	CV	Tratamientos				
				T0	T1	T2	T3	T4
				<i>(B. decumbens)</i>	<i>(P. opacifolia)</i>	<i>(C. moschata)</i>	<i>(I. edulis)</i>	(Múltiple)
pH	*	4.41	1.75	4.67 ^a	4.27 ^b	4.37 ^b	4.43 ^b	4.33 ^b
MO (%)	n.s	2.68	11.2	2.76 ^a	2.47 ^a	2.73 ^a	2.97 ^a	2.50 ^a
P (mg/kg)	*	3.5	72.6	1.50 ^b	1.86 ^{ba}	6.20 ^{ba}	6.80 ^{ba}	1.16 ^b
S (mg/kg)	*	8.28	18.9	6.56 ^b	9.77 ^a	8.53 ^{ba}	8.23 ^{ba}	8.33 ^{ba}
AL_H (Cmol ₍₊₎ /kg)	*	1.89	6.85	1.97 ^{ba}	2.10 ^a	1.80 ^{bc}	1.67 ^c	1.93 ^{ba}
AI (Cmol ₍₊₎ /kg)	*	1.57	9.31	1.63 ^{ba}	1.73 ^a	1.50 ^{ba}	1.40 ^b	1.60 ^{ba}
SAT_AL (%)	n.s	58.7	11.5	62.1 ^a	63.1 ^a	54.9 ^a	50.2 ^a	63.1 ^a
Ca (Cmol ₍₊₎ /kg)	*	0.51	29.8	0.43 ^{ba}	0.43 ^{ba}	0.63 ^{ba}	0.72 ^a	0.39 ^b
Mg (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	0.17	32.4	0.13 ^a	0.15 ^a	0.22 ^a	0.24 ^a	0.13 ^a
K (Cmol ₍₊₎ /kg)	n.s	0.09	23.9	0.09 ^a	0.08 ^a	0.09 ^a	0.10 ^a	0.07 ^a
Na (Cmol ₍₊₎ /kg)	*	0.03	30.5	0.04 ^a	0.03 ^{ba}	0.03 ^{ba}	0.03 ^{ba}	0.02 ^b
Fe (mg/kg)	*	159	13.3	172 ^b	186 ^a	149 ^{ba}	130 ^b	160 ^{ba}
Cu (mg/kg)	n.s	0.62	16.2	0.63 ^a	0.53 ^a	0.64 ^a	0.73 ^a	0.56 ^a
Mn (mg/kg)	*	6.59	12.2	6.4 ^{cb}	5.3 ^{cb}	6.9 ^b	9.2 ^a	5.1 ^c
Zn (mg/kg)	n.s	0.7	51.2	0.63 ^a	0.57 ^a	0.96 ^a	0.84 ^a	0.51 ^a

CV: Factor de variación; CV: Coeficiente de variación; * Diferencia significativa; n.s: no significancia; Promedios con letras iguales en una misma fila no difieren significativamente (Duncan $P < 0.05$)

En consideración a lo anterior en la selección de las variables químicas indicadoras de la calidad del suelo, se utilizó la contribución (peso) de cada variable a la formación de los factores 1 y 2 (Tabla 17), dados por el análisis de componentes principales (ACP); en consecuencia las variables con mayor contribución a la explicación de la diferenciación de los tratamientos son: pH, Materia Orgánica, Azufre, Acidez del suelo, contenidos de Calcio, Magnesio, Potasio, Sodio, Cobre, Manganeso, Zinc. Por tanto las anteriores variables serían

las más propicias para ser empleadas en la construcción del índice de calidad químico de los tratamientos.

Tabla 17. Contribución de cada variable química a la construcción de los factores 1 y 2 del ACP.

Variabales Químicas	Factor 1	Factor 2
pH	164	3118
Materia orgánica (MO)	763	319
Fósforo (P)	487	576
Azufre (S)	2	1702
Al_H	1078	14
Aluminio Intercambiable (AI)	1073	2
Saturación Aluminio (SAT_AL)	1125	113
Calcio (Ca)	1004	125
Magnesio (Mg)	808	408
Potasio (K)	858	244
Sodio (Na)	11	2785
Hierro (Fe)	461	255
Cobre (Cu)	695	48
Manganeso (Mn)	809	185
Zinc (Zn)	662	106

Las anteriores variables químicas seleccionadas como indicadoras de la calidad del suelo han sido propuestas por (Astier-Calderon, 2002; Barrios *et al.*, 2011; Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994; Orjuela, 2009; Rodríguez *et al.*, 2013; USDA, 1999; Velásquez *et al.*, 2007), para comparar y monitorear la calidad química de los suelos.

Es importante resaltar que el calcio y el magnesio son indicadores de impacto, es decir, causan efectos sobre algunas propiedades del suelo cuando se aplican, por lo tanto son inherentes al manejo, siendo dependientes del aporte realizado mediante cal dolomita, con el fin de corregir la baja saturación de bases que caracteriza a estos suelos. Mientras que el pH, la materia orgánica, la acidez intercambiable y el hierro son los indicadores que resultan afectados por cambios en el uso y por el manejo. El pH y la acidez intercambiable son

afectados positivamente cuando se aplica cal dolomita. El pH se incrementa reduciéndose la acidez intercambiable y por consiguiente el nivel de toxicidad del aluminio para las plantas disminuye, lo que permite un aumento significativo en la productividad (Jaramillo, 2002; Rincón *et al.*, 2010; Zapata, 2004).

8.1.3.3 Selección de variables biológicas indicadoras de la calidad del suelo.

De acuerdo a la caracterización las variables biológicas analizadas en cada uno de los bloques y tratamientos para una profundidad 0-10 cm en el monitoreo m2_octubre 2012 fueron: la densidad (individuos/ m²) de macroinvertebrados de los órdenes Isóptera (termitas), Hymenóptera (hormigas), Haplotaxida (lombrices), Coleóptera (escarabajos), la Clase Diplopoda (milpiés) y la producción de CO₂ como respuesta a la actividad microbiana.

El ACP (figura 22), separó los tratamientos en función de los macroinvertebrados (transformadores de material vegetal muerto y de ingenieros del ecosistema); los dos primeros factores explican el 57% de la variabilidad de los datos, el primer factor aporta a la varianza F1=30% y el segundo F2=27%. El primer factor, separó los tratamientos en función de la densidad (individuos/m²) de la clase Diplopoda (milpiés) y los órdenes Isóptera (termitas) y Coleóptera (escarabajos); el segundo factor, separó por la cantidad de individuos presentes del orden Hymenoptera (hormigas), Haplotaxida (lombrices) y la actividad microbiana medida como producción de mg de CO₂ por 100 gr de suelo.

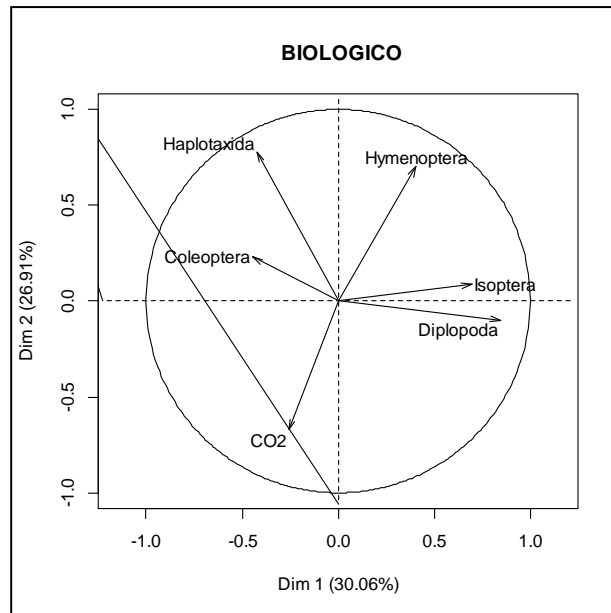


Figura 22. Proyección de las variables biológicas evaluadas (m2_octubre 2012) en el círculo de correlación en función de sus aportes a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP.

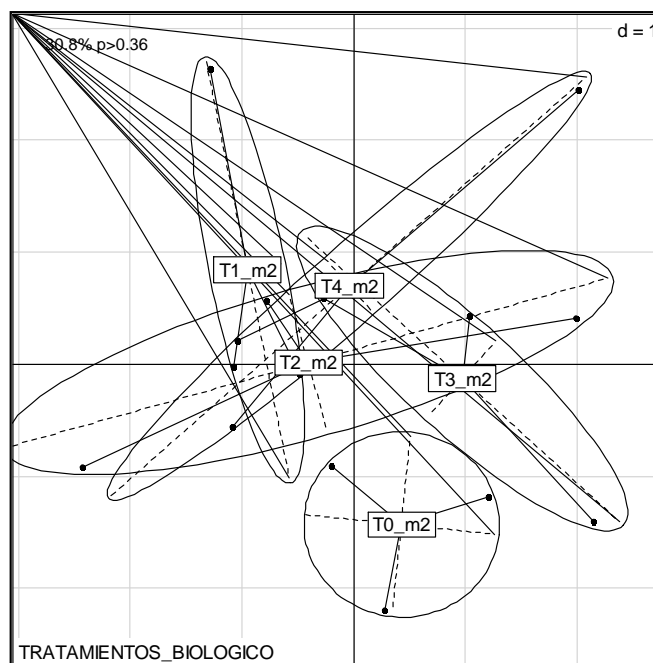


Figura 23. Distribución de los tratamientos T0 (*B. decumbens*), T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple) en función del aporte de las variables biológicas a la conformación de los componentes F1 y F2 del ACP, en el muestreo (m2_octubre 2012).

El primer componente separó el tratamiento T1 (*P. opacifolia*) con la mayor densidad promedio de individuos de la clase Diplopoda (milpiés) y el orden Isóptera (termitas) con 38 y 501 individuos/m² respectivamente, de los otros tratamientos quienes presentaron menores densidades de individuos de la clase Diplopoda y el orden Isóptera. El segundo factor separó el tratamiento T0 (*B. decumbens*) que presentó la mayor densidad de individuos de los órdenes Haplotaxida (lombrices) 74 individuos/m² y Hymenoptera (hormigas) 250 individuos/m², de los otros tratamientos que presentaron menor densidad de individuos en dichos órdenes (Figura 23 y tabla 19).

No obstante que el ACP mostro tendencias diferenciales entre los tratamientos, una prueba de Monte Carlo (30% con $p < 0.36$) complementada con un análisis de varianza y la prueba de Duncan, indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos para las variables biológicas evaluadas (Tabla 18).

No obstante a lo anterior, para la selección de las variables biológicas indicadoras de la calidad del suelo, se utilizó la contribución (peso) de cada variable a la formación de los factores 1 y 2 (Tabla 19), dados por el análisis de componentes principales (ACP). Por tanto se incluyeron todas las variables para generar el índice de calidad biológica de los tratamientos, debido a que presentaron un peso significativo en uno o el otro factor.

Las anteriores variables biológicas seleccionadas como indicadoras de calidad del suelo han sido propuestas por (Astier-Calderon, 2002; Rodríguez *et al.*, 2013; USDA, 1999; Velásquez *et al.*, 2007).

Tabla 18. Análisis de varianza para la propiedades biológicas, de acuerdo con la densidad (individuos/ m²) de macroinvertebrados presentes en los tratamientos (m2_octubre 2012) (0 – 10 cm)

Parámetro	Pr > F	Media	CV	Tratamientos				
				T0	T1	T2	T3	T4
				(<i>B. decumbens</i>)	(<i>P. opacifolia</i>)	(<i>C. moschata</i>)	(<i>I. edulis</i>)	(<i>Mutiestrata</i>)
Isóptera (termitas)	n.s	5.6 (457)	26.6	5.5 ^a (579)	6.2 ^a (501)	5.9 ^a (428)	5.4 ^a 430	5.0 ^a 347
Hymenóptera (hormigas)	n.s	130 (4.5)	18.5	5.2 ^a (250)	4.7 ^a (108)	4.3 ^a (152)	4.2 ^a (80)	3.9 ^a (59)
Haplotaxida (lombrices)	n.s	47 (3.7)	14.0	4.2 ^a (74)	3.3 ^a (29)	3.6 ^a (40)	4.2 ^a (66)	3.2 ^a (25)
Coleóptera (escarabajos)	n.s	23 (3.0)	25.2	2.8 ^a (18)	2.8 ^a (26)	2.8 ^a (18)	3.6 ^a (36)	2.9 ^a (18)
Diplopoda (milpiés)	n.s	21 (2.1)	52.9	0.5 ^a (1)	3.3 ^a (38)	2.4 ^a (26)	1.8 ^a (15)	2.2b ^a (22)
Producción CO ₂ / 100 gr	n.s	5.1	16.2	4.5 ^a	5.8 ^a	4.8 ^a	5.6 ^a	4.6 ^a

Medias con la misma letra en sentido horizontal no presentan diferencias significativas (Duncan, $\alpha=0.05$); medias transformadas LN (y+1) (Medias originales)

Tabla 19. Contribución de cada variable biológica a la construcción de los factores 1 y 2 del ACP.

VARIABLES QUÍMICAS	Factor 1	Factor 2
Isóptera (termitas)	2672	48
Hymenóptera (hormigas)	907	3032
Haplotaxida (lombrices)	1000	3743
Coleóptera (escarabajos)	1100	325
Diplopoda (milpiés)	3954	63
Producción CO ₂ / 100 gr	368	2789

8.1.4 Construcción de índices de calidad física, química y biológica

En la construcción de los índices de calidad física y química y biológica se utilizaron tanto las variables con significancia estadística, como aquellas que contribuyen con mayor peso en la formación de los factores 1 y 2 del ACP.

Siguiendo la metodología descrita en la construcción de indicadores, se obtuvieron los índices de calidad física, química y biológica del suelo para cada tratamiento, tal como se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Índices de calidad física, química y biológica del suelo de los diferentes tratamientos evaluados, monitoreo (m2 _octubre 2012).

Tratamiento	Índices de Calidad		
	Física	Química	Biológica
T0_m2 (<i>B. decumbens</i>)	0.45	0.35	0.69
T1_m2 (<i>P. opacifolia</i>)	0.65	0.25	0.80
T2_m2 (<i>C. moschata</i>)	0.44	0.57	0.68
T3_m2 (<i>I. edulis</i>)	0.41	0.68	0.78
T4_m2 (Múltiple)	0.53	0.28	0.50

Los valores de los índices expresados en la tabla 20, se sometieron a pruebas de varianza y pruebas de Tukey y Duncan, encontrando que entre los mismos no existen diferencias estadísticas significativas, por lo tanto estos índices se evalúan desde un enfoque descriptivo así:

El tratamiento T1 (*P. Opacifolia*) presentó el valor más alto en el índice de calidad física del suelo 0.65, seguido del T4 (Múltiple) 0.53 y los demás tratamientos presentaron valores más bajos en el índice de calidad física menores a 0.45. El tratamiento T1 (*P. Opacifolia*) fue el mejor en cuanto a calidad física, en razón a que presentó el valor más bajo de densidad aparente 1.29 gr/cm³, los más altos de porcentaje de saturación 40.5 %, (retención de agua), porosidad total 51.3% y humedad disponible 6.3%, en tanto que los restantes tratamientos presentaron valores en sus índices más bajos de calidad física.

El tratamiento T3 (*I. edulis*) presentó el valor más alto en el índice de calidad química del suelo 0.68, seguido del tratamiento T2 (*C. moschata*) 0.57, posteriormente el tratamiento T0 (*B. decumbens*) con 0.35 y por último los tratamientos T4 (Múltiple) y T1 (*P. Opacifolia*) que presentaron los más bajos valores 0.28 y 0.25 respectivamente. El tratamiento T3 (*I. edulis*) fue el mejor en cuanto a calidad química, en razón a que presentó los valores más bajo de Saturación de aluminio 50.23%, acidez intercambiable 1.40 (Cmol₍₊₎/kg) y los contenidos más altos de materia orgánica 3.0%, fósforo 6.80 (mg/kg), calcio 0.72 (Cmol₍₊₎/kg), magnesio 0.24 (Cmol₍₊₎/kg) y el cobre 0.73 (mg/kg), en tanto que los restantes tratamientos presentaron valores más bajos en su índices de calidad química.

Respecto al índice de calidad biológica (tabla 20), el tratamiento T1 (*P. Opacifolia*) y T3 (*I. edulis*) presentaron los mayores valores 0.80 y 0.78 respectivamente, seguido de los tratamientos T0 (*B. decumbens*) y T2 (*C. moschata*) con valores de 0.69, 0.68 respectivamente y por último el tratamiento T4 (Múltiple) con el valor más bajo 0.50. Los tratamiento T1 (*P. Opacifolia*) y T3 (*I. edulis*) fueron los mejores en cuanto al índice de calidad biológica, en razón a que presentaron una mayor actividad microbiana 5.8 y 5.6 mg CO₂ por cada 100 gr de suelo respectivamente. Se destaca en los tratamientos T1 (*P. Opacifolia*) y T3 (*I. edulis*) la presencia de la mayor densidad de macroinvertebrados así: En el T1 (*P. Opacifolia*) con el mayor número de individuos de la clase Diplopoda (milpiés) 38 individuos/m²; el tratamiento T3 (*I. edulis*) se destacó por presentar la mayor densidad de individuos del orden Coleóptera (escarabajos) 36 individuos/m².

Es de anotar que los índices de calidad biológica de todos los tratamientos presentan valores por encima de 0.5, valores a considerar en una escala de cero a uno.

En términos generales al observar la tabla 20 se tiene que los tratamientos con el mayor índice de calidad física son los que tienen el menor índice de calidad química y viceversa, como es el caso de los tratamientos T1 (*P. Opacifolia*) y T4 (Múltiple) con los índices más altos de calidad física y los índices más bajos de calidad química. Comportamientos atribuibles a los mejores desarrollos vegetativos de los tratamientos, en cuanto a biomasa acumulada, por el consumo de mayores niveles de calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) del suelo (Barcelo et al., 1992).

8.2 RESULTADOS ESPECIFICOS DEL OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.

De acuerdo con lo establecido en la metodología para estimar la biomasa dendroenergética potencialmente útil para la producción de leña, inicialmente se realizó el análisis funcional de crecimiento en alturas y diámetros para cada una de las especies establecidas en los tratamientos y obtener las curvas de crecimiento, seguidamente se calculó la tasa de crecimiento relativa (TCR) para los parámetros altura y diámetro, posteriormente se calcularon los incrementos medios anuales (IMA) en altura y diámetro, y así disponer con los insumos para elaborar las proyecciones de biomasa total a 10 años, proyección que permitió suplir la demanda de leña anual de una familia, al igual que cuantificar el número de árboles y área ocupada por especies las Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*), establecidas en monocultivo o como un arreglo múltiple.

8.2.1 Curvas de crecimiento en altura y diámetros

Con los datos bimestrales de seguimiento (Anexo 4), de crecimiento en altura y diámetro a las especies Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*), establecidas en monocultivo y en arreglo múltiple; se calcularon los parámetros para las curvas de crecimiento en altura y diámetro por especie (tabla 21), de acuerdo con la ecuación $y=a/(1+\exp(-b*(x-c)))$ (Gregorczyk, 1991), obteniendo los siguientes parámetros:

El mayor crecimiento en altura y diámetro lo presentó la especie Yopo (*Piptadenia opacifolia*) en monocultivo y en el arreglo múltiple; mientras el Cañafistol (*Cassia moschata*) en establecimiento múltiple y en monocultivo presentó la menor altura y el menor crecimiento en diámetro (ver figura 24 y 25).

Tabla 21. Parámetros obtenidos para las curvas de crecimiento de las especies Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*). (503 días de evaluación)

Parámetro	Yopo (<i>P. opacifolia</i>)		Cañafistol (<i>C. moschata</i>)		Guamo (<i>I. edulis</i>)	
	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro
monocultivo						
a	3.57	5.88	1.38	3.40	2.15	5.11
b	0.0070	0.0096	0.0045	0.0058	0.0068	0.0090
c	416.2	368.6	411.6	512.0	318.3	319.2
R²	0.85	0.89	0.90	0.87	0.94	0.96
múltiple						
a	2.61	5.57	0.80	2.51	2.07	4.07
b	0.0072	0.0087	0.0067	0.0061	0.0060	0.0089
c	385.7	392.0	195.2	425.0	333.6	278.0
R²	0.97	0.97	0.92	0.79	0.95	0.92

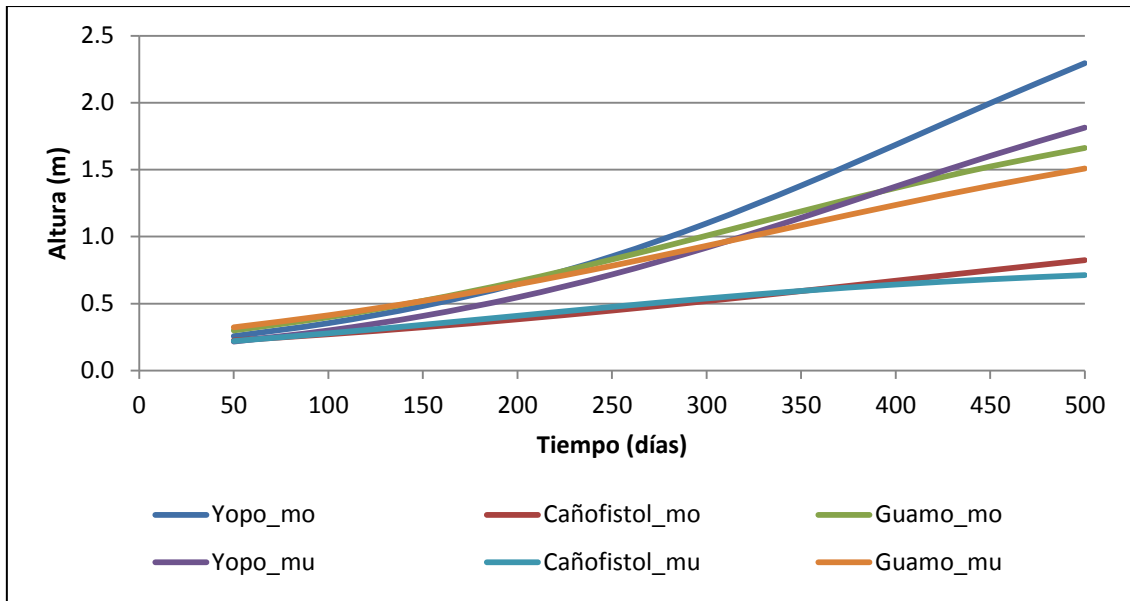


Figura 24. Curvas de crecimiento en altura de las especies Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*), establecidas en monocultivo (mo) o como un arreglo múltiple (mu).

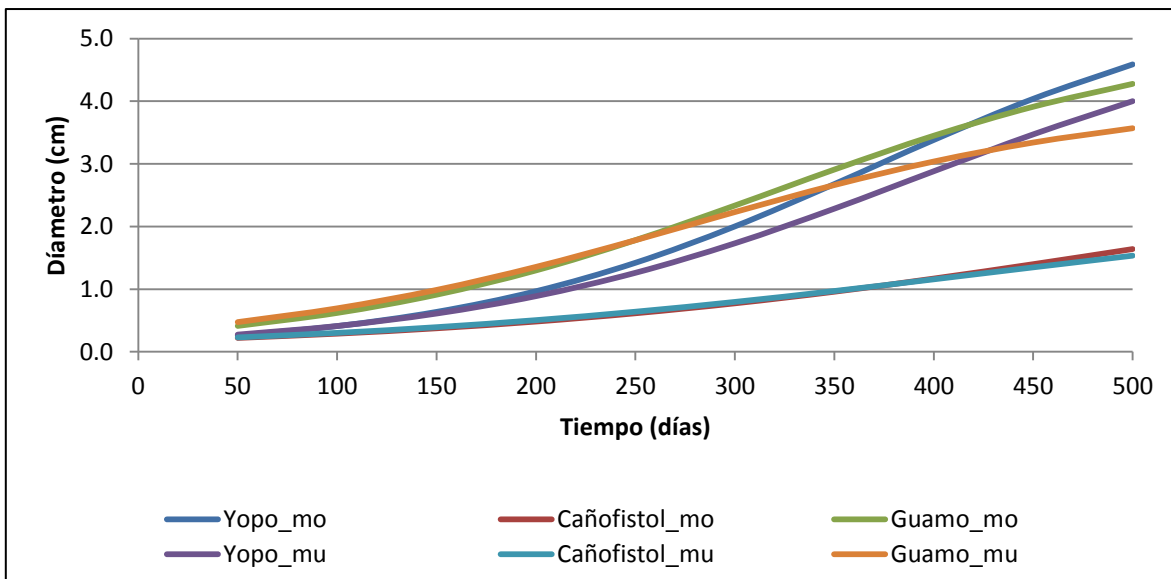


Figura 25. Curvas de crecimiento en diámetro de las especies Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*), establecidas en monocultivo (mo) o como un arreglo múltiple (mu).

8.2.2 Cálculo de la Tasa de crecimiento relativo $TCR_{(alt,dia)}$ e Incrementos medios

Anules $IMA_{(alt,dia)}$.

De acuerdo con la metodología expuesta, se estimaron las tasas de crecimiento relativas $TCR_{(alt,dia)}$ e incrementos medios anuales $IMA_{(alt,dia)}$, para la altura y el diámetro de las especies Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*), establecidas en monocultivo (mo) o como un arreglo múltiple (mu) (Ver tabla 22).

El mayor crecimiento en altura y diámetro lo presentó la especie Yopo (*Piptadenia opacifolia*) en monocultivo y en el arreglo múltiple; mientras el Cañafistol (*Cassia moschata*) en establecimiento múltiple y en monocultivo presentó la menor altura y el menor crecimiento en diámetro (ver figura 24 y 25).

Tabla 22. Tasas de crecimiento relativo e incrementos medios anuales en altura y diámetro de las especies evaluadas

Especies	Arreglo	$TRC_{(alt)}$	$TRC_{(dia)}$	$IMA_{(alt)}$	$IMA_{(dia)}$	Gravedad Específica (g/cm^3)
		Altura (m/mes)	Diámetro (cm/mes)	Altura (m/año)	Diámetro (cm/año)	
Yopo (<i>P. opacifolia</i>)	mo	0.147	0.192	1.76	2.30	0.77 ¹
	mu	0.143	0.179	1.72	2.15	
Cañafistol (<i>C. moschata</i>)	mo	0.087	0.134	1.04	1.61	0.71 ²
	mu	0.080	0.127	0.96	1.52	
Guamo (<i>I. edulis</i>)	mo	0.115	0.157	1.38	1.88	0.51 ³
	mu	0.10	0.136	1.25	1.63	

¹ Acero, (2005); ² Reyes *et al.*, (1992); ³ Baker *et al.*, (2004)

8.2.3 Estimación de la biomasa dendroenergética potencialmente útil para la producción de leña

Se calculó la biomasa total área en peso seco proyectada a 10 años para suplir la demanda de leña anual de una familia de 4,8 t/año (Aristizabal, 2008¹³; FAO, 2008), se establece el sexto año para realizar la primera entresaca y así cuantificar el número de árboles, área ocupada y producción de materia seca (t/ha*año) por las especies Yopo (*Piptadenia opacifolia*), Cañafistol (*Cassia moschata*) y Guamo (*Inga edulis*), establecidas en monocultivo o como un arreglo múltiple para suplir esta demanda de leña.

Calculo de la biomasa total en peso seco.

De acuerdo con la metodología con el incremento medio anual (IMA) en altura y en diámetro se estimó el volumen individual por árbol proyectado a 10 años. En la tabla 23 se observa el modelo de crecimiento calculado para el Yopo (*P. opacifolia*).

Tabla 23. Modelo de crecimiento estimado en altura, diámetro, volumen y biomasa total en peso seco por árbol de la especie Yopo (*P. opacifolia*)

años	Altura proyectada a partir de IMA (m)	DAP proyectado a partir de IMA (cm)	Volumen proyectado por árbol (m ³)	Biomasa total por árbol (t)
1	1.76	2.30	0.0004	0.0005
2	3.52	4.60	0.0029	0.0040
3	5.28	6.90	0.0099	0.0134
4	7.04	9.20	0.0234	0.0317
5	8.80	11.50	0.0457	0.0619
6	10.56	13.80	0.0790	0.1070
7	12.32	16.10	0.1254	0.1700
8	14.08	18.40	0.1872	0.2537
9	15.84	20.70	0.2665	0.3612
10	17.60	23.00	0.3656	0.4955

¹³ Demanda anual de leña calculada para un grupo familiar en el desarrollo de un proyecto en el corredor de conservación Guantiva – La Rusia – Iguaque Cundinamarca.

Con las estimaciones de volumen de materia seca se calculó el número de árboles requeridos de la especie *Yopo* (*P. opacifolia*), dividiendo la demanda anual de leña por familia (4.8 t/año) sobre biomasa total en peso seco por árbol a partir del sexto año, obteniéndose los siguientes resultados.

$$\begin{aligned} \text{No. arb.} &= (4.8/0.0790)+(4.8/0.1254)+(4.8/0.1872)+(4.8/0.2665)+(4.8/0.3656) \\ &= 115.0 \text{ individuos.} \end{aligned}$$

Los 115 árboles establecidos a una distancia de 5x5 ocupan un área de 0.29 ha, con una producción promedio anual de 8.35 t/ha de materia seca. Realizando el procedimiento anterior para las otras especies se obtuvo los resultados observados en la tabla 24.

Tabla 24. Cantidad estimada de árboles, área requerida y producción de materia seca para el suministro de 4.8t/año de leña.

Especies	Arreglo	Arboles (Cantidad)	Área requerida* (ha)	Producción materia seca (t/ha*año)
<i>Yopo</i> (<i>P. opacifolia</i>)	monocultivo	115	0.29	8.35
Cañafistol (<i>C. moschata</i>)	monocultivo	431	1.08	2.23
Guamo (<i>I. edulis</i>)	monocultivo	311	0.83	2.90
<i>Yopo</i> (<i>P. opacifolia</i>)	múltiple	88	0.66	3.64
Cañafistol (<i>C. moschata</i>)		88		
Guamo (<i>I. edulis</i>)		88		

*Distancia de siembra 5*5

De acuerdo con la tabla 24, se tiene que la extensión de un banco de leña para suplir una demanda de 4.8 t/año de leña, puede variar en función del tipo de especie utilizada y el arreglo, encontrándose que la especie *Yopo* (*P. opacifolia*) requieren 115 árboles y una superficie inferior a 3000 m² (0.29 ha) en monocultivo, mientras que en un sistema múltiple (*P. opacifolia* + *C. moschata* + *I. edulis*) requiere de 264 árboles (88 de cada especie) y ocuparían una superficie de 6600 m², con la especie Guamo (*I. edulis*) 311 árboles para 8300

m² en monocultivo y con la especie Cañafistol (*C. moschata*) requiere más de una (1) hectárea y 431 árboles en monocultivo.

Con los indicadores de la tabla 24, se tiene que para un suministro continuo de leña con la especie Yopo (*P. opacifolia*) en monocultivo se requiere el establecimiento de un área de 6000 m² en el cual se establece inicialmente una superficie de 3000 m² hectáreas y a los 5 años que se inicia el aprovechamiento se establece una nueva área de 3000 m², con lo cual se garantiza un suministro continuo de leña.

Nota: Inicialmente estaba previsto hacer una valoración del parámetro de producción de forraje, representado en la mezcla de *Brachiaria decumbens* y *Tithonia diversifolia*, el que no fue posible realizar debido a la imposibilidad de recoger material; pues el cultivo de *Tithonia diversifolia* fue atacado reiterativamente por la larva *Chelosyne sp* de la familia *Nymphalidae*. (Figura 26), plaga que la defoliaba completamente. A pesar de que se realizaron controles químicos y biológicos de la plaga, no fue posible durante la fase experimental, obtener material representativo para evaluar y estimar este parámetro de producción de biomasa.

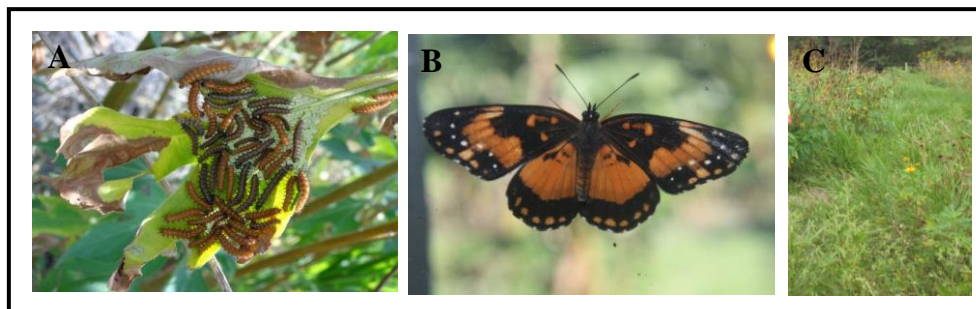


Figura 26. Ataque ocasionado *Chelosyne sp* en planta de *Tithonia*; A: Larva, B: Adulto y C: Apariencia plántulas después de consumidas.

9 DISCUSION DE RESULTADOS

9.1 DISCUSION OBJETIVO 1: Evaluar la contribución de los arreglos agroforestales en la rehabilitación del suelo con base en indicadores e índices de calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas.

Los resultados indican que los tratamientos (arreglos agroforestales) evaluados contribuyen a la rehabilitación ecosistémica de las áreas riparias de los bosque de galería que se encontraban en uso de pasturas, desde el punto de vista analizado en cuanto al comportamiento de las variables físicas, químicas y biológicas, utilizadas como indicadores de calidad del suelo, las cuales se integran cuantitativamente en índices de calidad física, química y biológica valorados entre cero y uno, que expresan la condición del suelo.

En términos estrictos se encontró que las mayores variabilidades con significancia estadística ($p < 0.05$) entre tratamientos fueron las variables individuales seleccionadas como indicadores de la calidad química del suelo como pH, fosforo, azufre, aluminio intercambiable, calcio, sodio y hierro y en la variable física de microporosidad). En tanto que en las variables biológicas no se presentaron diferencias estadísticas significativas.

En cuanto a los cambios en los parámetros físicos y químicos del suelo evaluados algunos variaron de acuerdo con las diferentes épocas de muestreo m0_octubre 2011 (temporada de lluvias), m1_marzo 2012 (inicio de lluvias) y m2_octubre2012 (temporada de lluvias).

En propiedades físicas evaluadas, tal es el caso de la macroporosidad del suelo (figura 27_B) que aumentó mientras que disminuyeron la meso y microporosidad (figura 27_C, D), lo anterior con respuesta a la disminución de la densidad aparente del suelo (Montenegro & Malagón, 1990) como se observa en la figura 27_A.

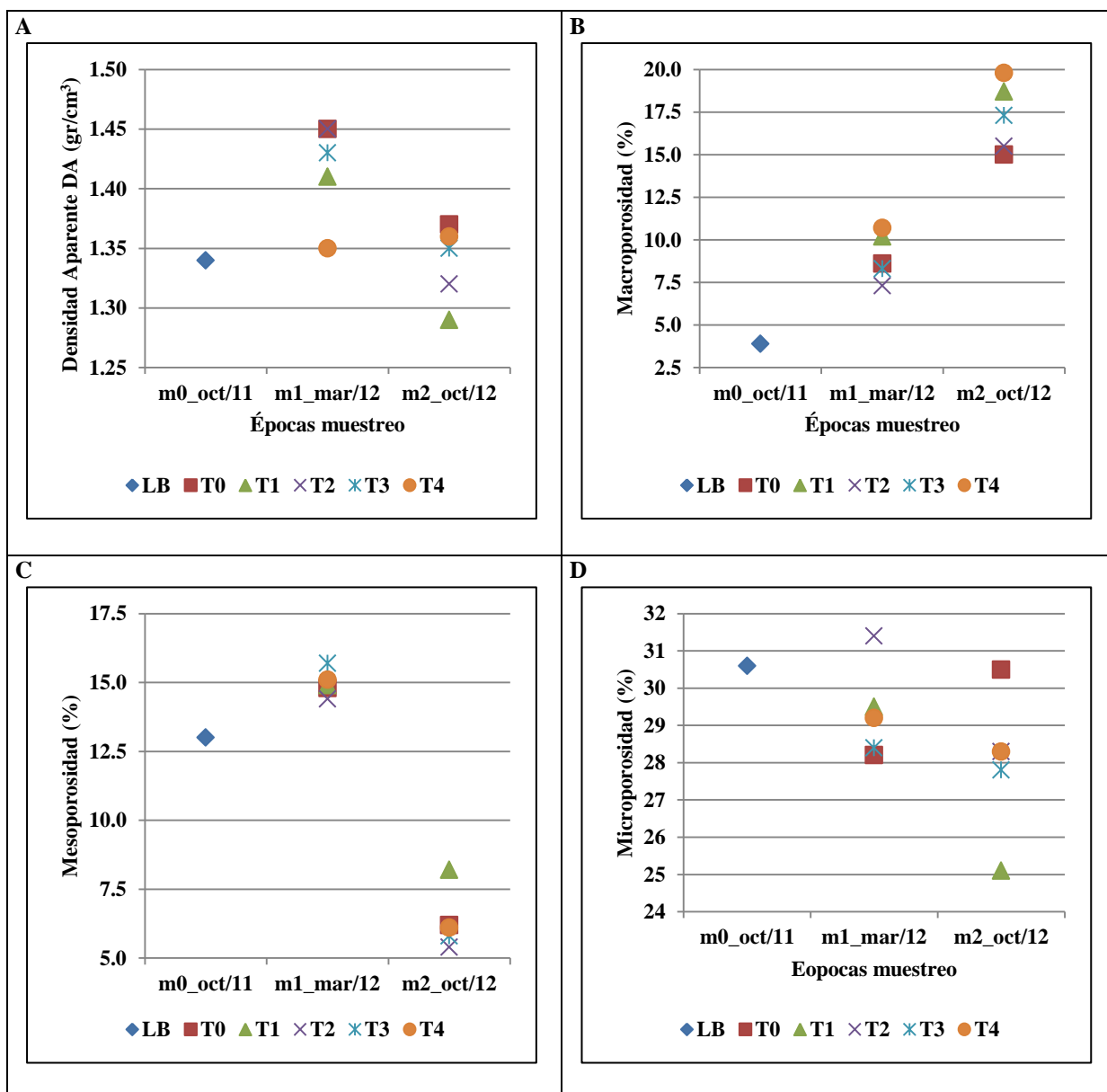


Figura 27. Comportamiento de las variables físicas, A: Densidad Aparente; B: Macroporosidad; C: Mesoporosidad; D: Microporosidad. Entre los tratamientos y diferentes épocas de muestreo. Línea base (LB), T0 (*B. decumbens*), T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple).

En la figura 28 se destaca los cambios presentados en las variables químicas entre las diferentes épocas de muestreo tales como, en pH donde se observa una diferencia entre los tratamientos y el testigo T0 en el muestreo m2 (figura 28_A); también se observa un descenso en la saturación de aluminio (figura 28_B) como respuesta al aumento en los contenidos de calcio (figura 28_C) (Jaramillo, 2002); igualmente se observa un aumento en los contenidos de cobre (figura 28_D) pero que se consideran normales para la región.

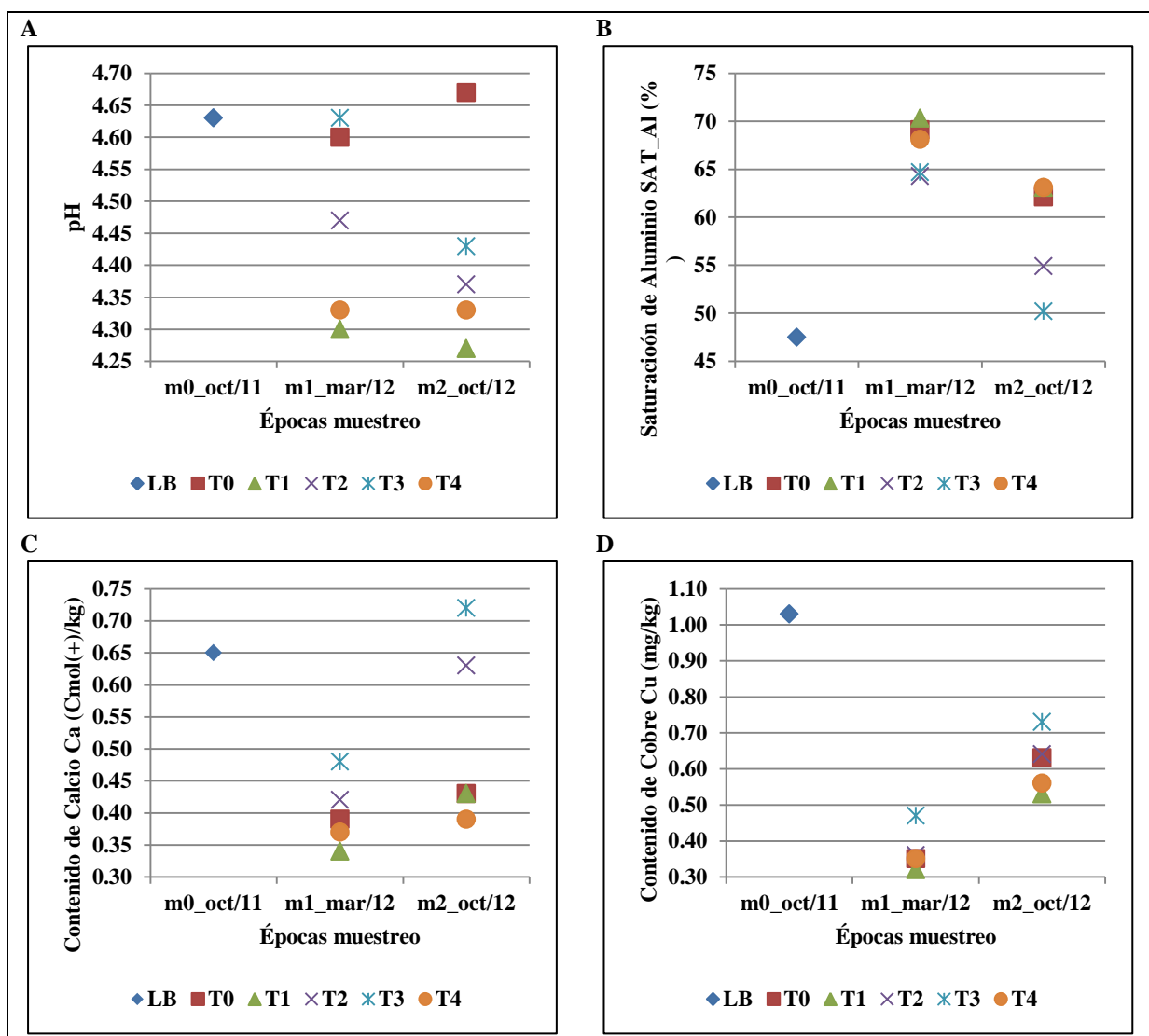


Figura 28. Comportamiento de las variables químicas, A: pH; B: Saturación de Aluminio (SAT_Al); C: Contenido de calcio Ca (Cmol(+)/kg); D: Contenido de cobre Cu (mg/kg). Entre los tratamientos y diferentes épocas de muestreo. Línea base (LB), T0 (*B. decumbens*), T1 (*P. opacifolia*), T2 (*C. moschata*), T3 (*I. edulis*) y T4 (Múltiple).

Con base en los ACP utilizados para construir los índices de calidad física, química y biológica del suelo, dichos índices no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Para la interpretación de los índices se utilizó una escala propuesta por Cantú et al., 2007, que clasifica los índices de acuerdo al puntaje total obtenido, en: 0.00 - 1.19 muy baja calidad; 0.20 – 0.39 baja calidad; 0.40 – 0.59 moderada calidad; 0.60 - 0.79 alta calidad y 0.80 – 1.00 muy alta calidad. De acuerdo con la calificación para todos los tratamientos, el índice de calidad biológica con valores de 0.5 a 0.80 se considera de moderado a muy alto, el índice de calidad física con valores 0.41 a 0.65 se considera de moderado a alto y el índice de calidad química con valores 0.25 a 0.68 se considera de bajo a alto (ver tabla 25).

Tabla 25. Resumen de índices y variables indicadoras de la calidad física, química y biológica del suelos de acuerdo con los tratamientos.

Índices y Variables indicadoras	Tratamientos				
	T0	T1	T2	T3	T4
	(<i>B. decumbens</i>)	(<i>P. opacifolia</i>)	(<i>C. moschata</i>)	(<i>I. edulis</i>)	(<i>Múltiple</i>)
Índice Calidad Física	0.45	<u>0.65*</u>	0.44	0.41	0.53
DA (gr/cm ³)	1.37	<u>1.29</u>	1.32	1.35	1.36
SAT (%)	37.7	<u>40.5</u>	37.4	37.7	40.3
POR (%)	48.0	<u>51.3</u>	50.3	49.0	49.0
HD (%)	4.5	<u>6.3</u>	4.1	4.2	4.5
Índice Calidad Química	0.35	0.25	0.57	<u>0.68</u>	0.28
MO (%)	2.76	2.47	2.73	<u>2.97</u>	2.50
P (mg/kg)	1.50	1.86	6.20	<u>6.80</u>	1.16
AI (Cmol ₍₊₎ /kg)	1.63	1.73	1.50	<u>1.40</u>	1.60
SAT_AL (%)	62.1	63.1	54.9	<u>50.2</u>	63.1
Ca (Cmol ₍₊₎ /kg)	0.43	0.43	0.63	<u>0.72</u>	0.39
Mg (Cmol ₍₊₎ /kg)	0.13	0.15	0.22	<u>0.24</u>	0.13
Cu (mg/kg)	0.63	0.53	0.64	<u>0.73</u>	0.56
Índice Calidad Biológica	0.69	<u>0.80</u>	0.68	<u>0.78</u>	0.50
Actividad microbiana (mg CO ₂ / 100 g suelo)	4.5	<u>5.8</u>	4.8	<u>5.6</u>	4.6
Clase Diplopoda (individuos/ m ²)	1	<u>38</u>	26	15	22
Orden Coleóptera (individuos/ m ²)	18	<u>26</u>	18	<u>36</u>	18
Dendroenergía					
Producción materia seca (t/ha*año)	8.02	<u>8.35</u>	2.23	2.90	3.64

* Los valores subrayados y en negrilla corresponden en cada tratamiento a los índices de calidad mayores con las respectivas variables que aportaron a la construcción del índice.

De la tabla 25 se destaca el tratamiento T1 (*P. opacifolia*) que presentó los valores más altos en el índice de calidad física y biológica del suelo 0.65 y 0.80 respectivamente, en comparación con el tratamiento testigo T0 (*B. decumbens*) que presentó índices de 0.45 y 0.69 respectivamente, en contraste el tratamiento T1 (*P. opacifolia*) presentó el más bajo valor en el índice de calidad química 0.25, comportamiento atribuible al mejor desarrollo vegetativo (mayor IMA en diámetro y altura) de la especie Yopo (*P. opacifolia*), en cuanto a biomasa acumulada por el consumo de mayores niveles de calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) del suelo (Barcelo *et al.*, 1992).

Los valores más altos de los índices de calidad física y biológica que presentó el tratamiento T1 (*P. opacifolia*) es el resultado de tener las mejores propiedades físicas y biológicas de los suelos tales como: baja densidad aparente 1,29 gr/cm³, alto porcentaje retención de agua (40.5%), porosidad total (51.3%) y humedad disponible (6.3%), mayor actividad microbiana relacionada con la producción de CO₂ (5.8 mg CO₂/100 g suelo) y el mayor número de individuos de la clase Diplopoda (38 individuos/m²) representados por los milpiés (tabla 25).

Igualmente en la tabla 25 se observa que el tratamiento T3 (*I. edulis*) presentó un índice de calidad biológica alto de 0.78, el cual se obtuvo por presentar una mayor actividad microbiana 5.6 mg CO₂/100 g suelo y la mayor densidad de individuos del orden Coleóptera (escarabajos) 36 individuos/m²; la mayor presencia de escarabajos en esta especie se puede deber a que las hojas de la especie *I. edulis* segregan un néctar extrafloral que atrae a los insectos (Falcão & Clement, 2000; Koptur, 1983; Villachica, 1996).

En tanto, el tratamiento T3 (*I. edulis*) presentó un índice de calidad química de los suelos alto 0.68, en comparación con los otros tratamientos y el testigo T0 (*B. decumbens*) que presentó un índice de calidad bajo 0.35 (tabla 25). El índice que presentó el T3 (*I. edulis*) es el resultado de los contenidos más altos de materia orgánica 3.0% y fósforo 6.80 (mg/kg), valores más bajo de acidez intercambiable 1.40 (Cmol₍₊₎/kg) y saturación de aluminio 50.23% y altos contenidos de calcio 0.72 (Cmol₍₊₎/kg), magnesio 0.24 (Cmol₍₊₎/kg) y el cobre 0.73 (mg/kg). Estos altos contenidos pueden ser debidos a lo que reportan varios autores (Brienza Jr. *et al.*, 2000; Da Silva & Pastore, 2011; Lojka *et al.*, 2012), quienes señalan que áreas enriquecidas con *I. edulis*, junto con otras leguminosas herbáceas pueden elevar los niveles de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y el magnesio en suelo, y además la cantidad de hojarasca que produce esta especie aumenta los niveles de materia orgánica del suelo.

De acuerdo con lo anterior de las tres especies evaluadas, el Yopo (*P. opacifolia*) y Guamo (*I. edulis*) presentaron índices de calidad física, química y biológica del suelo dentro de una escala de altos a muy altos (0.65 - 0.80), por tanto tienen potencial para ser establecidas en arreglos agroforestales en las áreas riparias de los bosques de galería del piedemonte, puesto que han mostrado potencialidad en la contribución en la rehabilitación ecosistémica de estas áreas.

9.2 DISCUSION OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.

Los resultados indican que los sistemas agroforestales en las zonas riparias de los bosque de galería, pueden ser una alternativa dendroenergetica viable para el abastecimiento de leña de

4.8 t/año para un grupo familiar de cuatro personas con la especie Yopo (*P. opacifolia*). Aristizabal, 2008, en un estudio encontró que la producción de biomasa leñosa seca calculada a partir del volumen fustal utilizando tanto la altura como el diámetro, la cantidad de árboles requeridos para conformar un banco dendroenergético con eucalipto (*E. glóbulos*) para una producción de 4.8 t/año de leña en un periodo de 10 años es 165 árboles, mientras que en este estudio para la especie yopo (*P. opacifolia*) se requieren 115 árboles.

Es de considerar que de las 3 especies dendroenergéticas evaluadas en el presente estudio, el Yopo (*P. opacifolia*) es de mayor gravedad específica 0.77 g/cm^3 ; superior a la del eucalipto de 0.55 g/cm^3 reportada por Ariztizabal, 2008. Además considerando que el Yopo (*P. opacifolia*) presenta mayor IMA en diámetro y altura, lo cual permite con menos árboles y menos área suplir la demanda de 4.8 t/año de materia seca de leña.

De otra parte, la producción de materia seca de la especie Yopo (*P. opacifolia*) de 8.02 t/ha*año (tabla 25), es comparable a la pastura en *Brachiaria (B. decumbes)* del testigo, cuya producción de materia seca anual es de 8 y 10 t/ha con 6 a 10 cortes, con una reducción en la producción de forraje del 53% en el período de mínima precipitación para el piedemonte del Meta (Pérez & Cuesta, 1994). De acuerdo con lo anterior, las áreas riparias de los bosques de galería que se han establecido con pasturas es posible promover su rehabilitación con la especie Yopo (*P. opacifolia*) en diferentes arreglos agroforestales en razón a que en términos de producción no hay pérdida apreciable en la cantidad de biomasa seca para uso de los productores, además permite generar procesos de recuperación de los suelos de las áreas riparias en términos de su calidad física, química y biológica.

No obstante que el Yopo (*P. opacifolia*) presenta mejores rendimientos en crecimientos dentro de las especies estudiadas en suelos de piedemonte, se ha encontrado que en esta especie establecida con fines de reforestación-protección (CORPOICA-PACIF RUBIALES, 2012) alcanzó un desarrollo en el diámetro de tallo 161.14 mm y en altura 2.44 m a los 423 días de establecidos en campo; en tanto que en este estudio, para este mismo periodo alcanzo 33.94 mm de diámetro en el tallo y 1.73 m en altura. Esta diferencia puede estar influenciada por mayores prácticas tecnológicas de manejo del suelo como son: mecanización del suelo (subsolador y rastra), incorporación de enmiendas (cal y yeso) y fertilización (rocas fosfórica). Lo anterior indica que la especie Yopo (*P. opacifolia*) con adecuadas prácticas de manejo del cultivo se pueden obtener mayores rendimientos productivos en las áreas riparias de los bosques de galería ofreciendo un potencial productivo y sostenible para estas áreas.

Respecto a la especie Cañafístol (*C. moschata*) comparativamente su crecimiento fue mayor en el área del proyecto que lo reportado para el establecimiento de esta especie con fines de reforestación-protección en los suelos de altillanura, en donde se encontró que a los 520 días después de establecidos en campo alcanzó un diámetro al cuello 16.93 mm y una altura de 0.76 m, en tanto que, en los suelos de la altillanura a los 720 días alcanzó 8.86 mm de diámetro al cuello y una altura de 0.69 m (CORPOICA-PACIF RUBIALES, 2012). Se nota que en menor tiempo la especie cañafístol alcanza mayores rendimientos que en los suelos de la altillanura, no obstante que para el establecimiento de esta especie en la altillanura se utilizaron las practicas tecnologías realizadas a la especie Yopo (*P. opacifolia*).

Igualmente, el crecimiento en altura de la *C. moschata* en el presente estudio fue mejor en comparación con el estudio de seguimiento y supervivencia de varias especies de arbustos y

árboles con posibilidad de introducirlas en la ganadería, realizado en Cuba, por Febles *et al.*, 2005, quienes encontraron que la *C. moschata* se desarrollaba en altura 20.0 y 40.0 cm, a los 180 y 360 días respectivamente, dado que para esos mismos periodos, en este estudio la *C. moschata* el crecimiento medio en altura fue de 34.0 y 60.0 cm respectivamente.

El crecimiento del Guamo (*I. edulis*) fue más lento comparado con los estudios de Da Silva *et al.*, 2011, quienes reportan desarrollo en diámetro de tallo 5.49 y 8.83 mm y en alturas 53.67 y 53.83 cm a los 60 y 120 días respectivamente; en el estudio actual, para estos períodos, se tiene 3.88 y 6.86 mm para el diámetro de tallo y alturas 25.7 y 44.8 cm, respectivamente. En contraste, en un experimento en Pucallpa, Amazonia peruana, los árboles de *I. edulis* alcanzaron diámetros de tallo 8.0 mm y una altura 73.2 cm, a los 17 meses después de establecidos (Lojka *et al*, 2012), mientras en el presente estudio, en menos tiempo (9.6 meses) los árboles de *I. edulis* habían alcanzado en promedio 21.5 mm de diámetro y 92 cm de altura.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 PARA EL OBJETIVO 1: Evaluar la recuperación del ecosistema con base en indicadores de la calidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Los SAF establecidos en los tratamientos y las prácticas de manejo con fines de restauración ecológica de las áreas riparias, muestran efectos cuantitativos y cualitativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, y por tanto en su calidad.

La cualificación de la calidad de suelos mediante la construcción de indicadores e índices es una herramienta técnica de carácter analítico para apoyar la selección e identificación de los sistemas de uso (como los agroforestales) y manejos específicos (arreglos, especies), para aportar a la recuperación de los ecosistemas en el país.

Para continuar los procesos de rehabilitación de las áreas riparias asociadas a los bosque de galería, considerando la calidad de los suelos, las variables indicadoras en las etapas iniciales de establecimiento de los SAF, que mostraron una tendencia de cambio (aunque no estadísticamente significativa) más sensibles al uso y manejo, en términos de calidad física son: densidad aparente, el almacenamiento del agua en el suelo y la porosidad; y con respecto a las variables químicas se tienen: pH, la saturación de aluminio, contenidos de materia orgánica, calcio, magnesio, hierro y cobre.

En relación con la macrofauna como variable de calidad biológica del suelo para promover los procesos de rehabilitación de los suelos de las áreas riparias por sus efectos benéficos en los procesos pedológicos de ellos y en razón a que la densidad (individuos/m²) es comparativamente baja, frente a otros agroecosistemas de la región, se sugiere en futuros proyectos de restauración, considerar el aumento y evaluación de esta macrofauna, a través de la incorporación y manejo de la materia orgánica.

De las especies leñosas evaluadas, mostraron diferencias entre ellas en relación con sus aportes en los procesos de rehabilitación de los suelos, es de resaltar que el Yopo (*P. opacifolia*) es el que presenta mayores contribuciones en las calidades físicas y biológicas del suelo, en tanto que el Guamo (*I. edulis*) contribuye en mejorar calidades químicas y biológicas, siendo el Cañafistol (*C. moschata*) el de menores aportes. Lo anterior señala la necesidad de investigación de un SAF con las especies Yopo (*P. opacifolia*) y Guamo (*I. edulis*) por ser las especies que mostraron mayores aportes en las calidades físicas químicas y biológicas del suelo.

10.2 PARA EL OBJETIVO 2: Cuantificar la biomasa potencialmente útil con fines dendroenergéticos a través de un proceso de análisis funcional de la biomasa seca en los sistemas agroforestales establecidos.

La producción dendroenergetica en áreas riparias con sistemas agroforestales es una opción viable desde el punto de vista ecológico, económico y social.

En volúmenes de biomasa seca para usos dendroenergéticos, la *Piptadenia Opacifolia* Ducke, presentó el mejor comportamiento en tasas de crecimiento en diámetro, y altura en la etapa juvenil, seguida de las especie *Inga edulis* Mart y por último la especie *Cassia moschata* Kunth; de ahí que para la región y en atención a las demandas dendroenergéticas de la misma, lo ideal sería promover el establecimiento de bancos dendroenergéticos en arreglos de SAF, privilegiando la especie Yopo (*P. Opacifolia*), que supera la producción de eucaliptos (*Eucaliptus sp.*) y acacias (*Acacia sp.*), que son las especies más utilizadas para producir carbón vegetal y leña.

En términos generales:

La producción biológica la especie Yopo (*P. opacifolia*) en materia seca es de 8.02 t/ha*año, la cual guarda similitudes proporcionales a las obtenidas con una pastura en *Brachiaria (B. decumbes)* que es de 8 y 10 t/ha*año (Rincón *et al.*, 2010); por tanto con el establecimiento de este arreglo, fuera de ser una actividad productiva importante, trae, beneficios adicionales representados en el mejoramiento de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, más la rehabilitación de servicios ecosistémicos.

Los resultados obtenidos en este trabajo lleva a sugerir la continuidad de estos estudios, y la evaluación de otros parámetros, tales como: distribución de raíces, producción de hojarasca, evolución de la compactación en el suelo, cambios en los grupos funcionales de la biota del suelo, niveles de fijación simbiótica de nitrógeno, entre otros, que pueden aportar o explicar más claramente la eficacia de las especies plantadas en SAF para realizar una rehabilitación ecológica asistida en áreas riparias.

11 REFERENCIAS

ACERO, D. 2005. Plantas útiles de la Cuenca del Orinoco. Parte D especies útiles del clima cálido. Bogotá: Ecopetrol y Corporinoquia, 2005. p. 113.

ALMEIDA, P.; IZURIETA, X.; CORTÉS, K.; MENÉNDEZ, P.; BAUZ, E.; RODRÍGUEZ, M.; TOAZA, G.; ÁLVAREZ, U.; PINOS, G.; YUMISEVA, C.; SÁNCHEZ, L & LARA, M. (2003). Identificación de áreas prioritarias para la conservación en la Cordillera Real Oriental Colombia-Ecuador-Perú. Pág. 92 a 102.

ANDRADE, H. & IBRAHIM, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. Agroforestería de las Américas. Vol. 10 No 39-40. 109-116 p.

ARANGO, J. (1998). Relación agua suelo planta. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4787/>

ARCOS, I.; JIMÉNEZ, F.; HARVEY, C.; CAMPOS, J.; CASANOVES, F. & LEÓN A. (2006). Efecto del ancho del bosque ribereño en la calidad del agua en la microcuenca del río Sesesmiles, Copán, Honduras. Recursos Naturales y Ambiente. 48, 29-34 p.

ARENAS C., ROCÍO. (2006). Noemágico. La investigación experimental [Versión electrónica], consultado: 30 de diciembre de 2011. Disponible en: <http://noemagico.blogia.com/2006/092201-la-investigacion-experimental.php>

ARISTIZABAL, J. (2008). Producción sostenible y manejo eficiente de leña como estrategia de reducción de la deforestación en ecosistemas asociados al Roble. Fase I: Diagnostico y adopción de tecnologías. Informe final. Fundación Natura subdirección de conservación e investigación. Bogotá. 48 p.

ARIZPE, D.; MENDES, A. & RABACA, J. (2010) (coordinadores). Áreas de ribera sostenibles. Una guía para su gestión. (1ª reimpresión de la 1ª ed. en ingles; Esther Tortosa Lis y Carlos Tortosa Grobas, Trad.). Portugal. (Trabajo original publicado en 2008). 288 p.

ASTIER-CALDERON M., MAASS-MORENO M. & ETCHEVERS-BARRA J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36(5): 605-620.

BABBAR, L. & ZAK Dr. (1995). Nitrogen loss from coffee agro-ecosystems in Costa Rica: leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. *Journal of Environmental Quality* 24:94-100.

BAKER, T.R., PHILLIPS, O.L., MALHI, Y., ALMEIDA, S., ARROYO, L., DI FIORE, A., ERWIN, T., KILLEEN, T.J., LAURANCE, S.G., LAURANCE, W.F., LEWIS, S.L., LLOYD, J., MONTEAGUDO, A., NEILL, D.A., PATIÑO, S., PITMAN,

N.C.A., SILVA, J.N.M. AND MARTÍNEZ, R.V. (2004). Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology* 10: 545-562.

BALORIANI, G.; PALEOLOGOS, M.; MARASAS, M. & SARANDON, S. (2009). Abundancia y riqueza de la macrofauna edáfica (Coleóptera y Araneae) en invernáculos convencionales y en transición agroecológica. *Arana*. Argentina. *Revista Brasileña de Agroecología*. 4 (2):1733

BAQUERO, J. (2009). Alterações químicas, físicas e biológicas de Latossolos Vermelhos com cana-de-açúcar. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina.

BARCELO, J.; NICOLÁS G.; SABATER, B. & SÁNCHEZ R. (1992). Fisiología vegetal. Ed. Pirámide. Madrid.

BARRERA, J., SUAREZ, D. & MELGAREJO, L. (2010). Capítulo II. Análisis de crecimiento en plantas. En: Melgarejo L. (ed). *Experimentos en fisiología vegetal*. Primera edición. Universidad Nacional de Colombia. P 25 - 38

BARRIOS, E.; COUTINHO, H. & MEDEIROS, C. (2011). Integração participativa de conhecimentos sobre indicadores de qualidade do solo – Guia metodológico. World Agroforestry Center (ICRAF), Embrapa, CIAT. Nairobi. 178 p.

BEER, J.; HARVEY, C.; IBRAHIM, M.; HARMAND, J.; SOMARRIBA, E. & JIMÉNEZ, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. Agroforestería en las Américas Vol . 10 N° 37 – 28. 80

BETANCOURT, K; IBRAHIM, M; HARVEY, C; VARGAS, B. (2003). Agroforesteria de las Americas 39- 40:47-51

BRADSHAW, A.D. (2002). Introduction and Philosophy. En: M.R. Perrow & A.J. Davy (ede.) Handbook of Ecological Restoration Vol. 1. Principles of Restoration. Pp 3-9. Cambridge University Press.

BRIENZA Jr, S.; COSTA, V.O.; SANTOS, W.E.S.; PANTOJA, R.F.R.; SÁ, T.D.A.; VIELHAUER, K.; DENICH, M. & VLEK, P.L.G (2000). Enriquecimento de capoeira com árvores leguminosas contribuindo para o acúmulo de biomassa na agricultura familiar do nordeste do Pará, Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE MANEJO DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA PARA A SUSTENTABILIDADE DA AGRICULTURA FAMILIAR DA AMAZÔNIA ORIENTAL, (1999). Anais. Belém: EMBRAPA Amazônia Oriental, 2000. 221p

BROWN, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forest. A primer. A forest Resources Assessment publication. FAO. 54 p.

BURGOS, J. & PÉREZ, J. (2004). Modelo de regresión lineal para la estimación de biomasa en algunos ecosistemas boscosos de Colombia. Colombia Forestal, [S.l.], v. 8, n.17, p.103-109, noviembre. (Fecha de acceso: 07 feb. 2014). Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/3398/4928>.

CAMPITELLI, P.; AOKI, A.; GUDELJ, O.; RUBENACKER, A. & SERENO R. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. Ciencia del suelo. Argentina: 28(2): 223-231.

CANTÚ, M.; BECKER, A.; BEDANO J. & SCHIAVO, H. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. Ciencia del suelo. Argentina: 25(2): 173-178.

CARVAJAL, L.; LOPEZ, C.; PATARROYO, J.; GUALDRON, A.; JIMENÉZ, M. & GARZÓN, A. (2007). Composición florística y estructural del bosque de galería. Puerto López, Meta. Catálogo ilustrado de especies. Pág. 219

CARTER, M.R. (2002). Soil quality for sustainable land management: Organic Matter and aggregation Interactions that maintain soil functions. Agronomy Journal, Vol. 94, 38–47.

CASTRO F., H.E. Y GÓMEZ S., M.I. 2010. Fertilidad de suelos y fertilizantes. En: Burbano O., H. y Silva M., F. (Eds). Ciencias del suelo principios básicos. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá. Colombia. pp. 213 – 303.

CATIE - CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA -(2003). Árboles de Centroamérica. Un manual para extensionistas.

CORPOICA (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria). (2010). Evaluación del crecimiento y el desarrollo productivo de la especie *Anadenanthera Peregrina* (yopo) para la producción comercial de leña en la Orinoquia Colombiana. Informe técnico final. Convenio MADR – CORPOICA. Villavicencio, Meta. Colombia. 112 p

CORPOICA – PACIFIC RUBIALES (2012). Alternativas tecnológicas para recuperar la cobertura vegetal en áreas afectadas por obras de ingeniería civil en la zona de influencia de campo Rubiales en Puerto Gaitán Meta. Informes semanales

DA SILVA, A.; SOUSA, J. & RODRÍGUEZ, C. (2011). Desenvolvimento inicial de espécies exóticas e nativas e necessidade de calagem em área degradada do Cerrado no triângulo mineiro (Minas Gerais, Brasil). *Agronômica de Colombia* 29(2), 287-292.

DA SILVA, M. & PASTORE F. (Editores) (2011). Plantas da Amazonia: 450 especies de uso geral. Brasilia: Universidade de Brasilia, Biblioteca Central, 2011. 3140 p. Libro digital, disponible en: <http://leunb.bce.unb.br/>

DECAENS, T.; LAVELLE, P.; JIMENEZ, J.; ESCOBAR, G.; RIPPSTEIN, G.; SCHNEIDMADL, J.; SANZ, J.; HOYOS, P. & THOMAS, J. (1994). Impact of land management on soil Macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia. *SoilBiology*, 30 (4), 157-168

DELGADO, G.; BURBANO, A. & SILVA, A. (2011). Evaluación de la macrofauna del suelo asociada a diferentes sistemas con café *coffea arábica L.* Revista de ciencias agrícolas. Año 2011 – Volumen XXVIII No.1 Pág. 91-106

DÍAZ-MARTIN, R. & DÍAZ, A. (2007). Siembra de especies niñeras facilitadoras. EN: Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque alto andino. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. D.C. Pág. 99 a 101

DORAN J.W. & PARKIN T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran J. W., Coleman D. C., Bezdicek D. C. y Stewart B. A. (eds). 1994. Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA.

FAHRIG, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annu. Rev. Ecol.Evol.Syst. 2003.34:487-515. En: <http://www.glel.carleton.ca/RESEARCH/landpub.php>

FALCÃO, M. & CLEMENT, C. (2000). Fenología e produtividade do Ingá-Cipó (*Inga edulis*) na Amazônia Central. Acta Amazónica: 30(2) 173-180.

FAO, (2001). Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. Boletín de Tierras y Aguas de la FAO, núm. 5. PNUD. Disponible a: <<http://www.fao.org/docrep/004/w4745s/w4745s13.htm>>

_____, (2008). Bosques y energía: cuestiones clave. Roma: Organización de la Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.

_____, (2009). Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición. Organización de la Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.

_____, (2011). Situación de los bosques del mundo. Roma: Organización de la Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.

FEARNSIDE, P. & BARBOSA, R. (1998). Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in brazilian amazonia. *Forest Ecology and Management* 108: 147-166.

FEIJOO, A. KNAPP, E. LAVELLE, P. & MORENO, A. (1994). Cuantificación de la macrofauna del suelo en una cuenca hidrográfica de Colombia. En: *Impacto de los agroecosistemas en las comunidades de macroinvertebrados del suelo.*

FERREIRO, P. (2006). Propiedades bioquímicas de suelos de prado de Galicia. ED. Universidad Santiago de Compostela.

FEBLES, G.; RUIZ, T.; CHONGO, B.; ALONSO, J.; LA O, O.; SCULL, I.; GUTIERREZ, J.; DIAZ, H. & HERNANDEZ, L. (2005). Evaluación de diferentes especies arbóreas y arbustos para el desarrollo de sistemas silvopastoriles en el trópico. Instituto de ciencia animal. San jose de las lajas, La Habana, Cuba

FLORENTINE S., & WESTBROOKE M. (2003). Restoration on abandoned tropical pasturelands- do we know enough? En: Journal for Nature Conservation 12 (2004) 85-94

GARCÍA, C., GIL, F., HERNANDEZ, T. & TRASAR, C. (2003). Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Ed. Mundi- Prensa. Madrid.

GARCÍA I., C. (2008). Enmiendas orgánicas para suelos basadas en residuos orgánicos. Discurso de ingreso leído por el Académico electo en el acto de la Sesión Solemne de su Toma de Posesión como Académico de Número. Academia de Ciencias de la Región de Murcia. Murcia. 78 p. Disponible en internet: <http://www.acc.org.es/docos/de2008/DiscursoInvestiduraCarlosGarcia.pdf>

GRANADOS, S., HERNÁNDEZ, M. & LÓPEZ, G. (2006). Ecología de las zonas ribereñas. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 12 (1): 55-69. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

GREGORCZYK, A. (1991). The logistic function, its application to the description and prognosis of plant growth. Acta Societatis Botanicorum Poloniae. Vol 60, Nr 1-2 67-76.

GOBERNACIÓN DEL META & INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI- IGAG. (2004). El Meta un territorio de oportunidades. Bogotá, D.C.

GUTIERREZ; B. 2003. La Agroforestería como alternativa productiva económica, social y ambiental para el país. En Memorias de la conferencia Internacional de Bosques, Colombia: País de bosques y vida. Meter Saille/Mara Ángela Torres, editores.

_____, (2013). Memorias del IV Seminario Internacional de Agroforestería. Red Agroforestal de Universidades de Colombia (RAUC), Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Choco.

GUTIÉRREZ, B. & FIERRO, L. (2006). Diagnóstico y diseño participativo en sistemas agroforestales. Manual y guías de campo. CORPOICA – MADR. Tibaitata. Cundinamarca.

HARVEY, C. (2001). Agroforestería y biodiversidad. En Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. F. Jiménez, R. Muschler, E. Kopsell, editores. Modulo de enseñanza agroforestal N° 6. CATIE. Costa Rica.

HARVEY, C. (2003). Ecológica de los paisajes agrícolas en América Central. Agroforestería de las Americas 39-40: 30-39.

HORN, R. & LEBERT, M. (1994). Soil compactability and compressibility. Chapter 3.En: Compaction in crop production. B.D. Soane and C. van Ouwerkerk (Eds).Pág. 45 a 50

HUNT, R., CAUSTON, D., SHIPLEY, B. & ASKEW, A. (2002). A modern tool for classical plant grow analysis. Annal of Botany 90: 485 - 488

IBÁÑEZ, J. (2007). PH DEL SUELO consultado 04/mayo/2013 EN:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/04/02/62776>

IBRAHIM, M., CASASOLA, F., TOBAR, D. & VILLANUEVA, C. (2005). Buenas prácticas para la conservación de la biodiversidad en fincas ganaderas. En: <http://web.catie.ac.cr/silvopastoril/folletos/biodiversidadCR.pdf>

ICA. 1992. Manual de asistencia 25. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. 64 p.

IDADE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2007). Biomasa cultivos energéticos. Departamento de energía .Madrid. 56 p

IDEAM; IGAC; IAvH; Invemar; Sinchi & IIAP. (2007). Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia Bogotá. D C. 276 p

_____, **(2010_a).** Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia - Bosques 2009. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C., 236 pp

_____, **(2010_b).** Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.

_____, (2011). Sistemas agroforestales y restauración ecológica como medidas de adaptación al cambio climático en alta montaña, Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático –INAP– componente B, IDEAM y Conservación Internacional, Bogotá.

IGAC. (1990). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Quinta edición. Bogotá D.C.

_____. (1993). Aspectos ambientales para el ordenamiento territorial del occidente del departamento del Caquetá. Tomo II. Capítulo IV. Materia orgánica y aspectos biológicos de los suelos. Pág. 666 a 697.

_____. (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Meta.

IGAC - CORPOICA. (2002). Zonificación de los conflictos de uso de la tierra. Capítulo 1. Zonificación Agroecológica de Colombia

IGLESIAS, J. M. (1999). Sistemas de producción agroforestales, conceptos generales y definiciones, Pastos y Forrajes, 22:287.

IMAZ, M. & VIRTO, I (2010). Indicadores de calidad del suelo. En: Tecnología de suelos: estudios de caso. USON, A.; BOIXADERA, J.; BOSCH, A & ENRIQUE, A (editores) (2010). Prensas Universitarias de Zaragoza; Lérida. Pág. 141 a 154.

IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)] IPCC. Ginebra, Suiza. 104 p.

_____.(2006). Report of the twelfth sesión of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories, Ciudad de México, MX.

JARAMILLO, D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Medellín. 609 p.

JIMÉNEZ, F, A., MUSCHLER, R. (2001). Introducción a la agroforestería. En Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. F. Jiménez, R. Muschler, E. Kopsell, editores. Módulo de enseñanza agroforestal n° 6. CATIE. Costa Rica.

JIMÉNEZ, J.; MORENO, A.; DECAENS, T.; LAVELLE, P.; FISHER, M. & THOMAS, J. (1998). Las comunidades de lombrices en las sabanas nativas y en los pastizales introducidos de los Llanos Orientales de Colombia. Capítulo 4, En: Ciclo de vida y biología de las lombrices de tierra de la sabana.

JOHNSON, S. & JONES, J. (2000). Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(Supplement 2):30–39

JORDAN III, W.R., M.E. GILPIN Y J.D.ABER. (1987). Restoration ecology: ecological restoration as a technique for basic research. En: W.R. Jordan III, M.E, Gilpin y J.D. Aber (eds.). *Restoration ecology: A synthetic approach to ecological*. Cambridge University Press, EE.UU.

KANMEGNE, J.; BAYOMOCK, L.A.; DUGUMA, B.; LADIPO, D.O. (2000). Screening of 18 agroforestry species for highly acid and aluminium toxic soil of the humid tropics. *Agroforestry-Systems*, v.49, n.1, p. 31-39.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; AND SCHUMAN G.E. (1997). Soil Quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A Guest Editorial). Published in *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 61: 4-10.

KOPTUR, S. FLOWERING PHENOLOGY AND FLORAL BIOLOGY OF INGA (FABACEAE: MIMOSOIDEAE). (1983). *Systematic Botany*, Volume 8, Issue 4 (Oct – Dec), 354-368.

LARSON, W.E. Y PIERCE, F.J. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. and Stewart, B.A.,

(Eds). Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, USA. p.37-51.

LAVELLE, P.; DANGERFIELD, M.; FRANGOSO, C.; ESCHENBRENNER, V.; LOPEZ-HERNANDEZ, D.; PASHANASI, B. & BRUSSAARD L. (1994). The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. Chapter 6: En: the biological management of tropical soil fertility. Pág. 137 a169.

LAVELLE, P. & SPAIN, A. (2001). Soil ecology. Amsterdam: Kluwer Scientific.678p

LEÓN, O. (2007). Enmiendas como estrategia para la restauración ecológica. En: Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque alto andino. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. D.C. Pág. 103 a 106.

_____ **(2007).** Experimentos de restauración ecológica en plantaciones de Pinus Patula. En: Restauración ecológica del bosque alto andino. Estudios diagnósticos y experimentales en los alrededores del embalse de Chisacá (localidad de Usme) Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. D.C. Pág. 296 a 335.

LOJKA, B.; PREININGER, D.; VAN DAMME, P.; ROLLO, A. & BANOUT, J. (2012). Use of the amazonian tree species *Inga edulis* for soil regeneration and weed control. Journal of tropical Forest Science. 24 (1): 89-101.

LOWRANCE, T.; TODD, R.; FAIL, J.; HENDRICKSON, O.; LEONARD, R. & ASMUSSEN, L. (1984). Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds. *Bioscience* 34.

MAGDALENO, F. (2011). Introducción y características de las zonas de ribera. Tipos, valores y funciones de estas zonas. En: Manual de desarrollo sostenible. 10. Recuperación de riberas. Fundación Banco Santander. España. 31-36 p.

MALDONADO, F.; JASSO, J.; PALMA-LOPEZ, D. & GONZALEZ, V. (2006). Dinámica de materia orgánica, P y K en suelos de sistemas agroforestales, Cedro – Plátano en Tabasco, México. *Revista. Fitotecnia Mexicana*. Pág. 223- 230.

MARÍN, P. & A. FEIJOO. (2007). Efecto de la labranza sobre macroinvertebrados del suelo en Vertisoles de un área de Colombia. *Terra Latinoamericana*. 25(3): 297–310.

MINAMBIENTE - Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2012). Informe de gestión sector ambiente y desarrollo sostenible 2012. Bogotá D.C.: Colombia

MAVDT - Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Plan Nacional de Restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas. Bogotá D.C.: Colombia. 80 p.

MAVDT – CONIF (2003). Guía metodológica para la restauración de ecosistemas a partir del manejo de la vegetación. Primera edición. Bogotá, D.C. 98 p.

MAVDT – CONIF (2006). Protocolo de restauración de coberturas vegetales afectadas por incendios forestales. Primera edición. Bogotá, D.C. 60 p.

M.E.A - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). Ecosystems and human Well – Being. Island Press. Washington. D.C. 10-13 p.

MEJÍA, F. (2011). Implicaciones ambientales del uso de leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 119 p.

MELÉM JÚNIOR, N. (2009). Biomassa microbiana do solo, nutrição e produtividade das culturas de milho e feijão em áreas manejadas com fogo e diferentes tipos de adubação. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina.

MILES, J.; MAASS, B & DO VALLE, C. (Editores). (1998). Brachiaria: Biología, agronomía y mejoramiento. CIAT Cali, Colombia y EMBRAPA Campo Grande, Brasil. 321 p.

MONTENEGRO, H. & MALAGÓN, D. (1990). Propiedades físicas de los suelos. IGAC. Subdirección agrologica. Bogotá.

MORA, J. (2006). La actividad microbiana: un indicador integral de la calidad del suelo. En: <http://luazul.ucaldas.edu.co/>

MOREIRA, F.; HUISING, E. & BIGNELL, D. (Editores) (2012). Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo. Instituto Nacional de Ecología, México, 377 pp.

MYERS, P.; ESPINOSA, C.; PARR, T. JONES, G. S. HAMMOND, AND T. A. DEWEY. (2008). The Animal Diversity Web: En: <http://animaldiversity.ummz.umich.edu/accounts/Myriapoda/classification/#Myriapoda> (Consultado 13/06/2013).

NAIMAN, R. & DÉCAMPS, H. (1997). The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual review of ecology and sistematic* 28: 621:658

NAVARRETE, A.; VELA, G; LÓPEZ, J & RODRÍGUEZ MA. DE L. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. Consultado 09/ agosto/2013 En: <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n80ne/suelo.pdf>.

NAVIA, J; RESTREPO, J; VILLADA, D & OJEDA, P. (2003). Agroforestería: Suelos en Zonas de Laderas, Opción Tecnológica para el Manejo. Santiago de Cali.

NORTCLIFF, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 161-168.

ODUM, E. (1972). Ecología. Editorial interamericana tercera edición. México, D.F.

ORJUELA, I. (2009). Generación de la línea base de indicadores para el monitoreo de calidad de suelos en el área de influencia del distrito de riego del Alto Chicamocha. Tesis de grado de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

PASHANASI, B. (2001). Estudio cuantitativo de la macrofauna del Suelo en diferentes sistemas de uso de la Tierra en la amazonía peruana. En: Folia Amazónica Vol. 12 (1-2).

PÉREZ, R. & CUESTA, P. 1994. Especies forrajeras para el piedemonte llanero, su fertilización y manejo. En: Producción de pastos en el piedemonte llanero. CORPOICA, Villavicencio, Meta, Colombia.

PRIAS, O. (2010). Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales – PROURE. Informe Final Plan de acción 2010 – 2015. Ministerio de Minas y Energía. Colombia. 159 p.

REYES, G., BROWN, S., CHAPMAN, J. AND LUGO, A.E. (1992). Wood densities of tropical tree species. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, New Orleans, LA.

RINCÓN, A.; GUZMÁN, B.; ÁLVAREZ, M.; PARDO, O., PÉREZ, O. & CAICEDO, S. (2010). Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos. Colombia. Corpoica. 252 p.

ROBINS, J. & CAIN J (2002). The past and present condition of the Marsh Creek watershed. Berkeley, CA: Natural Heritage Institute. 71p.

RODRÍGUEZ, N.S.; LAVELLE, P.; PULIDO, X. GUTIÉRREZ, A. BERNAL, J.H. ARGUELLO, O.; BOTERO, C.; GÓMEZ, Y.; HURTADO M. del P.; LOAIZA, S.P.; RODRÍGUEZ, E.; RUBIANO, Y. (2013). Construcción de indicadores de eco-eficiencia para la altillanura plana en los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán del departamento del Meta. CORPOICA. 40 p.

RUIZ, N.; LAVELLE, P. & JIMÉNEZ, J. (2008). Soil macrofauna field manual. Technical level. FAO. Rome. Pág. 113

RUSSELL, E. & WILD, A. (1992). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ediciones Multi Prensa. Madrid España.

SÁNCHEZ, V.; BUENO, G. & PÉREZ, R. (2002). Evaluación agronómica de especies forrajeras nativas con potencial forrajero en el departamento del Guaviare. Boletín técnico No 40. CORPOICA. PRONATTA. Villavicencio. Pág. 32.

SCHROTH, G.; DA FONSECA, G.; HARVEY, C.; VASCONCELOS, H.; & IZAC, A. (2004). Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes, Island Press, Washington, D.C.

SEMICOL. (2013). Cañafistol llanero. (Consultado julio 2013) en:
http://www.semicol.co/semillas/forestales-y-ornamentales/canafistol-llanero.-escarificada/flypage_new.tpl.html

SER -SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL (2004). Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

SQI -SOIL QUALITY INSTITUTE. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.

STADTMÜLLER, T. (1994). Impacto hidrológico del manejo forestal en bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo, CATIE, Turrialba

SWIFT, M. & BIGNELL D. (2001). Standard methods for assessment of soil biodiversity and land use practice. ICRAF. Bogor, Indonesia. P 40

TORRES, G.; ROJAS, F.; CARVAJAL, D. & ARGUEDAS, M. (2011). Reproducción de especies arbóreas y arbustivas de la región central de Costa Rica. GERMINAR 2. Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica -TEC Disponible en: <http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/Germinar/Germinar%202.swf>

TURNER, I. (1996). Species loss in fragments of tropical rain forest: a review of the evidence Journal of Applied Ecology, no. 33, pp. 200-209. En: <http://www.envf.port.ac.uk/geog/teaching/landecol/Readings/carroll2.pdf>

UMCA - UNIVERSITY OF MISSOURI CENTER FOR AGROFORESTRY (2006). Training Manual for Applied Agroforestry Practices. Section 5: Riparian forest buffers. Pág. 73 a 98

USDA -UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICUTURA. (1999). Soil quality test kit guide.

VARGAS, O. (editor) (2007). Los pasos fundamentales en la restauración ecológica. EN: Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 190 p.

VARGAS, O. & DÍAZ, A. (2007). Guía metodológica para la restauración ecológica de áreas potrerizadas. En: Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional.de Colombia Bogotá.190 p.

VELÁSQUEZ, F. & JARAMILLO, R. (2009). Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. Revista Cenicafé 60 (2): 148-160. 2009.

VELÁSQUEZ, E.; LAVELLE, P. & ANDRADE, M., (2007). GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry* 39, 3066–3080.

VILLACHICA, H. (1996). Frutales y hortalizas promisorios de la Amazonia. Lima: TCA/FAO/DGIS/PAUD/ICRAF/FIDA/PNUMAIIICA/GTZ/UNAMAZ. 367p.

VILLAR, R., RUIZ-ROBLETO, J., QUERO, J., POORTER, F., VALLADARES, F. & MARAÑÓN, T. (2004). Tasas de crecimiento en especies leñosas aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: Valladares, F. (ed.). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Barcelona. España. Pág. 191 a 227.

WILSON, M.; TASI, H.; SASAL, M.; CERANA, J. & INDELÁNGELO, N. (2008). Condición de suelo en producción. EN: *Agricultura sustentable. Actualización técnica*. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Paraná. Serie Extensión No.51. Pág. 14 a 19

WILSON, M.G.; TASI, H.A; PAZ G, A.; INDELÁNGELO, N. Y DÍAZ, E. L. (2008). Indicadores de calidad para suelos del área de bosques nativos de Entre Ríos. XXI congreso argentino de la ciencia del suelo. *Semiárido: Un desafío para la Ciencia del Suelo*. Potrero de los Funes (SL). Argentina.

ZAPATA, R. (2004). Química de la acidez del suelo. En: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1735/>

ZERBINO, S.; ALTIER, N.; MORÓN, A. & RODRÍGUEZ, C. (2008). Evaluación de la macrofauna del suelo en sistemas de producción en siembra directa y con pastoreo. *Agrociencia*. Vol 12 (1):44-55

12 ANEXOS

ANEXO 1. Resultado de los análisis físicos y químicos de las muestras de suelos de la Estación Experimental Acacias (EEA-META), Octubre 2011. Línea base

Bloque	Tratamiento	Saturación (%)	Tensión (bares)				D. A g/cm ³	Textura por Bouyucos (%)			
			0.1	0.3	3.0	15.0		Arena	Limo	Arcilla	Clase
B1	LB_m0	35.6	32.5	27.1	25.6	22.7	1.36	57	18	25	Franco Arcillo Arenoso
B2	LB_m0	36.1	33.2	27.8	25.9	22.9	1.32	71	12	17	Franco Arenosa
B3	LB_m0	34.9	32.2	26.9	25.6	23.0	1.34	62	16	21	Franco Arcillo Arenoso

Bloque	Tratamiento	pH	MO	P	S	Acidez		Cationes extractables				Elementos menores				
						Al_H	Al	Ca	Mg	K	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	B
			(%)	mg/kg	Cmol ₍₊₎ /kg				mg/kg							
B1	LB_m0	4.50	4.8	5.1	3.5	1.9	1.4	0.48	0.16	0.10	0.07	124	0.85	9.3	0.55	0.16
B2	LB_m0	4.65	4.9	4.4	4.0	1.4	1.0	0.65	0.23	0.10	0.07	87	0.95	14.2	0.70	0.12
B3	LB_m0	4.65	5.3	4.5	4.0	1.6	1.3	0.81	0.32	0.10	0.06	113	1.30	15.0	0.80	0.12

ANEXO 2. Resultado de los análisis físicos de las muestras de suelos de la Estación Experimental Acacias (EEA-META), Marzo 2012

Bloque	Tratamiento	Muestra	Saturación (%)	Tensión (bares)					D. A g/cm ³	Textura por Bouyucos (%)			
				0.1	0.3	1.5	3.0	15.0		Arena	Limo	Arcilla	Clase
B1	T0	1A	41.19	37.32	32.12	30.64	27.91	24.97	1.34	62	16	23	Franco Arcillo Arenoso
B1	T0	1B	38.37	30.88	25.38	23.83	20.70	17.89	1.37				
B1	T3	2A	37.70	33.48	30.36	28.66	24.21	19.57	1.34				
B1	T3	2B	38.67	30.74	25.51	23.91	19.74	17.16	1.42				
B1	T2	3A	38.04	33.22	29.01	27.68	23.87	21.57	1.46	66	19	16	Franco Arenoso
B1	T2	3B	35.84	31.85	28.77	27.92	24.46	20.65	1.47				
B1	T4	4A	37.22	31.97	28.08	27.09	23.82	21.73	1.42	60	19	22	Franco Arcillo Arenoso
B1	T4	4B	44.59	38.56	32.12	30.03	26.26	22.80	1.31				
B1	T1	5A	39.56	32.75	26.97	25.86	23.17	20.30	1.40	58	21	22	Franco Arcillo Arenoso
B1	T1	5B	36.85	32.53	28.96	27.82	23.83	19.70	1.49				
B2	T3	6A	35.33	31.40	24.50	24.15	22.33	19.29	1.49	58	19	24	Franco Arcillo Arenoso
B2	T3	6B	36.01	32.32	28.43	26.60	24.70	22.09	1.43				
B2	T2	7A	35.85	32.68	29.36	28.83	26.77	24.67	1.45	54	19	28	Franco Arcillo Arenoso
B2	T2	7B	40.99	36.68	32.21	31.29	27.66	25.34	1.36				
B2	T0	8A	33.84	28.43	26.85	26.20	24.19	21.26	1.47	56	21	24	Franco Arcillo Arenoso
B2	T0	8B	34.56	28.77	27.10	26.42	24.18	21.40	1.48				
B2	T4	9A	42.16	33.96	31.13	30.16	26.39	22.32	1.32	56	21	24	Franco Arcillo Arenoso
B2	T4	9B	42.32	32.85	30.50	29.38	26.50	22.50	1.30				
B2	T1	10A	41.00	31.58	29.07	27.93	25.35	23.66	1.33	62	17	22	Franco Arcillo Arenoso
B2	T1	10B	41.49	32.77	29.70	28.33	24.95	23.01	1.31				
B3	T4	11A	36.37	29.71	25.40	24.50	22.17	19.90	1.44	60	23	18	Franco Arenoso
B3	T4	11B	40.96	29.34	26.38	25.32	22.02	20.29	1.33				
B3	T0	12A	34.48	28.31	23.47	22.42	20.94	18.35	1.50	62	21	18	Franco Arenoso
B3	T0	12B	31.57	25.03	19.00	17.76	15.94	13.12	1.55				
B3	T1	13A	37.80	30.15	26.07	24.94	22.07	19.85	1.43	62	21	18	Franco Arenoso
B3	T1	13B	35.86	29.11	24.46	23.81	21.67	19.37	1.50				
B3	T2	14A	34.76	27.79	24.57	23.92	21.36	19.67	1.48	62	23	16	Franco Arenoso
B3	T2	14B	34.06	27.30	23.26	22.38	20.16	18.04	1.51				
B3	T3	15A	36.49	29.92	26.87	26.13	23.15	21.49	1.42	64	17	20	Franco Arenoso
B3	T3	15B	35.75	27.26	23.71	22.95	21.31	19.35	1.48				

Fuente: Laboratorio Suelos CORPOICA C.I. La Libertad, 2012

Continuación ANEXO 2. Resultado de los análisis físicos de las muestras de suelos de la Estación Experimental Acacias (EEA-META), Octubre 2012

Bloque	Tratamiento	Muestra	Saturación (%)	Tensión (bares)					D.A g/cm ³	Textura por Bouyucos (%)			
				0.1	0.3	1.5	3.0	15.0		Arena	Limo	Arcilla	Clase
B1	T0	1A	37.71	27.34	25.46	24.07	23.64	21.94	1.34				
B1	T0	1B	41.31	25.73	24.02	22.67	22.05	20.47	1.29	63	21	17	Franco Arenoso
B1	T3	2A	40.97	20.37	18.53	18.49	17.58	16.67	1.31				
B1	T3	2B	39.14	21.52	20.70	20.10	19.01	18.29	1.33	65	19	17	Franco Arenoso
B1	T2	3A	42.16	24.66	23.67	23.26	22.32	21.59	1.24				
B1	T2	3B	31.22	21.28	21.00	19.63	19.22	18.30	1.46	61	19	21	Franco Arcillo Arenoso
B1	T4	4A	40.69	29.39	28.15	27.10	26.29	25.08	1.30				
B1	T4	4B	39.15	23.37	22.36	21.31	20.81	19.70	1.32	60	22	19	Franco Arenoso
B1	T1	5A	45.18	25.18	23.97	22.79	22.02	20.77	1.20				
B1	T1	5B	47.50	23.20	22.70	21.43	20.45	19.51	1.19	64	20	17	Franco Arenoso
B2	T3	6A	43.08	27.53	26.92	25.63	25.22	24.16	1.23				
B2	T3	6B	33.23	24.32	23.08	22.87	21.40	20.71	1.42	60	22	19	Franco Arenoso
B2	T2	7A	40.52	28.45	27.01	26.72	25.15	24.31	1.25				
B2	T2	7B	35.23	25.78	24.18	24.02	22.96	22.08	1.30	60	20	21	Franco Arcillo Arenoso
B2	T0	8A	37.72	26.37	25.56	24.52	23.54	22.56	1.41				
B2	T0	8B	33.62	24.72	24.20	23.52	22.73	22.08	1.45	62	18	21	Franco Arcillo Arenoso
B2	T4	9A	33.19	21.16	20.02	19.23	18.51	17.52	1.51				
B2	T4	9B	34.07	21.10	19.81	19.70	18.43	17.76	1.49	64	20	17	Franco Arenoso
B2	T1	10A	41.40	26.90	23.89	23.03	22.07	20.20	1.27				
B2	T1	10B	35.20	27.76	21.77	20.75	19.91	16.87	1.42	64	20	17	Franco Arenoso
B3	T4	11A	54.59	32.04	28.71	27.79	26.98	24.88	1.17				
B3	T4	11B	39.96	26.43	24.26	23.60	22.68	21.26	1.36	66	18	17	Franco Arenoso
B3	T0	12A	44.01	31.20	28.54	28.09	26.70	25.18	1.26				
B3	T0	12B	32.07	25.23	24.33	23.31	22.20	21.20	1.47	66	20	15	Franco Arenoso
B3	T1	13A	33.95	25.45	23.20	22.50	21.77	20.29	1.37				
B3	T1	13B	40.10	26.08	23.47	22.46	20.92	19.22	1.30	64	19	17	Franco Arenoso
B3	T2	14A	36.88	25.82	24.13	23.33	22.34	21.08	1.35				
B3	T2	14B	38.14	27.73	25.51	24.62	23.48	21.93	1.30	64	19	17	Franco Arenoso
B3	T3	15A	35.91	28.61	26.33	25.65	24.74	23.25	1.38				
B3	T3	15B	33.85	26.23	23.80	22.88	21.70	20.07	1.44	60	19	21	Franco Arcillo Arenoso

Fuente: Laboratorio Suelos CORPOICA C.I. La Libertad, 2012

ANEXO 3. Resultado análisis químico de las muestras de suelos de la Área de sostenibilidad en Agroenergía (ASA-META),

Marzo 2012

Bloque	Tratamiento	pH	MO	P	S	Acidez		Cationes extractables				Elementos menores				
						Al + H	Al	Ca	Mg	K	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	B
						(%)	mg/kg	Cmol ₍₊₎ /kg				mg/kg				
B1	T0	4.71	4.16	1.87	1.96	2.06	1.76	0.52	0.13	0.07	0.08	121.20	0.48	10.00	0.32	0.13
B1	T1	4.33	3.15	1.15	2.56	2.56	2.23	0.36	0.10	0.04	0.05	110.40	0.36	3.20	0.12	0.18
B1	T2	4.53	3.27	1.31	4.37	2.00	1.62	0.34	0.10	0.05	0.06	110.80	0.44	4.44	0.08	0.05
B1	T3	4.52	3.63	1.60	4.52	1.96	1.56	0.44	0.11	0.06	0.06	124.40	0.48	7.80	0.28	0.05
B1	T4	4.34	3.98	1.28	8.73	2.16	1.80	0.44	0.13	0.05	0.05	106.00	0.40	4.48	0.20	0.38
B2	T0	4.46	3.04	1.03	2.26	2.30	1.93	0.31	0.08	0.03	0.06	100.00	0.40	5.24	0.12	0.16
B2	T1	4.28	3.92	0.93	5.57	2.14	1.80	0.29	0.09	0.06	0.06	160.80	0.40	3.76	0.20	0.32
B2	T2	4.29	3.98	1.20	3.16	2.62	2.18	0.31	0.09	0.05	0.15	98.40	0.36	3.84	0.16	0.13
B2	T3	4.65	3.63	1.28	2.11	2.17	1.98	0.42	0.09	0.04	0.08	84.40	0.56	5.68	0.16	0.11
B2	T4	4.50	3.21	0.94	3.61	2.08	1.84	0.37	0.11	0.04	0.07	118.80	0.40	4.04	0.12	0.18
B3	T0	4.55	3.21	0.77	11.45	2.75	2.57	0.34	0.16	0.04	0.07	132.40	0.16	3.88	0.16	0.78
B3	T1	4.28	3.27	1.60	3.77	2.77	2.37	0.37	0.11	0.03	0.06	135.20	0.20	4.48	0.16	0.28
B3	T2	4.55	3.45	1.35	4.73	2.30	1.98	0.60	0.19	0.05	0.07	134.00	0.28	6.88	0.24	0.24
B3	T3	4.70	4.10	1.60	19.58	2.94	2.51	0.59	0.21	0.11	0.07	113.20	0.36	6.52	0.36	0.26
B3	T4	4.24	3.81	0.84	5.12	2.52	2.20	0.31	0.13	0.05	0.06	156.80	0.24	3.84	0.24	0.24

Fuente: Laboratorio Suelos CORPOICA C.I. Tibaitata, 2012

Continuación Anexo 3. Resultado análisis químico de las muestras de suelos de la Área de sostenibilidad en Agroenergía (ASA-META), Octubre 2012

BLO	TRA	pH	MO			Acidez		Cationes extractables				Elementos menores				
				P	S	Al + H	Al	Ca	Mg	K	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	B
			(%)	mg/kg		Cmol ₍₊₎ /kg				mg/kg						
B1	T0	4.8	3.51	3.09	7.71	1.71	1.42	0.59	0.17	0.13	0.05	182.80	0.84	8.24	1.16	0.18
B1	T1	4.3	2.50	3.37	7.87	2.04	1.71	0.47	0.17	0.09	0.03	173.60	0.56	6.96	0.64	0.22
B1	T2	4.3	2.80	6.78	9.28	1.80	1.54	0.48	0.17	0.11	0.03	156.80	0.72	7.80	0.64	0.14
B1	T3	4.4	2.95	4.73	6.93	1.59	1.36	0.59	0.15	0.09	0.03	127.20	0.64	10.92	0.80	0.14
B1	T4	4.4	3.05	2.54	8.03	1.82	1.53	0.46	0.15	0.08	0.01	148.00	0.64	7.12	0.68	0.18
B2	T0	4.6	2.30	0.77	6.30	2.09	1.73	0.38	0.11	0.07	0.05	134.00	0.64	5.28	0.36	0.18
B2	T1	4.3	2.30	1.31	9.91	2.12	1.74	0.34	0.13	0.07	0.03	210.80	0.56	4.24	0.48	0.14
B2	T2	4.4	2.55	10.75	8.03	1.77	1.38	0.66	0.22	0.07	0.02	134.00	0.68	5.16	1.60	0.22
B2	T3	4.4	2.75	10.61	8.19	1.91	1.57	0.56	0.22	0.09	0.02	132.80	0.84	7.12	0.80	0.18
B2	T4	4.3	2.00	0.63	10.38	1.98	1.60	0.37	0.12	0.07	0.03	165.20	0.60	4.48	0.36	0.22
B3	T0	4.6	2.45	0.63	5.67	2.06	1.77	0.33	0.10	0.06	0.03	198.80	0.40	5.60	0.36	0.18
B3	T1	4.2	2.55	0.90	11.48	2.17	1.83	0.47	0.15	0.07	0.02	172.00	0.48	4.76	0.60	0.18
B3	T2	4.4	2.80	1.04	8.34	1.75	1.59	0.74	0.28	0.10	0.03	156.80	0.52	7.68	0.64	0.07
B3	T3	4.5	3.05	5.14	9.60	1.50	1.18	1.02	0.34	0.13	0.03	129.60	0.72	9.68	0.92	0.14
B3	T4	4.3	2.40	0.36	6.62	2.02	1.69	0.33	0.11	0.07	0.02	167.20	0.44	3.76	0.48	0.14

Fuente: Laboratorio Suelos CORPOICA C.I. Tibaitata, 2012

Anexo 4. Seguimiento al desarrollo y crecimiento en diámetro y altura de las especies Yopo (*P. opacifolia*), Cañafistol (*C. moschata*) y Guamo (*I. edulis*) establecidas en monoespecie y múltiple.

Bloque	Días	Yopo (<i>Piptadenia opacifolia</i>)				Cañafistol (<i>Cassia moschata</i>)			
		monoespecie		múltiple		monoespecie		múltiple	
		Diámetro (cm)	Altura (m)	Diámetro (cm)	Altura (m)	Diámetro (cm)	Altura (m)	Diámetro (cm)	Altura (m)
B1	62	0.34	0.30	0.36	0.27	0.31	0.25	0.33	0.27
B2	62	0.30	0.27	0.26	0.18	0.30	0.26	0.26	0.21
B3	62	0.34	0.24	0.36	0.22	0.33	0.25	0.31	0.28
B1	165	0.84	0.62	0.68	0.49	0.44	0.33	0.50	0.38
B2	165	0.58	0.46	0.69	0.54	0.43	0.34	0.40	0.33
B3	165	0.79	0.66	0.69	0.49	0.44	0.35	0.41	0.35
B1	293	2.13	1.13	1.55	0.79	0.55	0.40	0.60	0.46
B2	293	1.38	0.73	1.72	0.80	0.60	0.46	0.88	0.46
B3	293	2.08	1.11	1.54	0.80	0.64	0.47	0.56	0.47
B1	357	3.30	1.83	2.54	1.32	0.83	0.59	0.85	0.66
B2	357	2.08	1.01	2.51	1.10	0.91	0.63	1.18	0.66
B3	357	3.00	1.44	2.27	1.17	1.11	0.74	0.83	0.65
B1	414	4.46	2.18	3.19	1.49	1.23	0.64	1.24	0.68
B2	414	2.64	1.38	3.26	1.54	1.27	0.66	1.72	0.74
B3	414	3.69	1.89	2.61	1.41	1.66	0.82	1.06	0.65
B1	523	5.89	3.01	4.70	1.92	1.50	0.79	1.43	0.72
B2	523	3.59	1.74	4.28	2.02	1.47	0.76	2.13	0.70
B3	523	4.88	2.48	3.67	1.72	2.17	0.99	1.18	0.66

Continuación Anexo 4. Seguimiento al desarrollo y crecimiento en diámetro y altura de las especies Yopo (*P. opacifolia*), Cañafistol (*C. moschata*) y Guamo (*I. edulis*) establecidas en monoespecie y múltiple.

Bloque	Días	Guamo (<i>Inga edulis</i>)			
		monoespecie		múltiple	
		Diámetro (cm)	Altura (m)	Diámetro (cm)	Altura (m)
B1	62	0.40	0.25	0.38	0.26
B2	62	0.38	0.27	0.43	0.29
B3	62	0.39	0.26	0.42	0.29
B1	126	0.64	0.41	0.74	0.47
B2	126	0.78	0.48	0.85	0.56
B3	126	0.70	0.48	0.90	0.54
B1	183	1.22	0.55	1.26	0.53
B2	183	1.42	0.68	1.34	0.64
B3	183	1.22	0.58	1.49	0.69
B1	292	2.09	0.95	1.89	0.80
B2	292	2.29	0.98	2.01	0.95
B3	292	2.22	0.88	2.38	0.90
B1	578	4.11	1.57	3.46	1.40
B2	578	4.19	1.60	3.12	1.81
B3	578	5.70	2.26	4.85	1.83