



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TÍTULO:

“EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y DEL BIOCARBÓN EN EL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN LAS ESPECIES MADERABLES DE MELINA *Gmelina arborea* Y PACHACO *Schizolobium parahybum*, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA”

Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Agrícola

AUTORES:

JUNIOR MAURICIO CONDE VIÑAN
SANTIAGO DELGADO LAVANDA

DIRECTOR:

Ing. OMAR OJEDA OCHOA Mg. Sc.

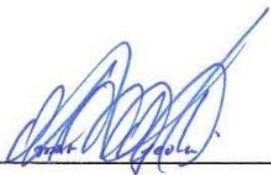


LOJA – ECUADOR
2015

CERTIFICACIÓN

Que el trabajo titulado **"EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y DEL BIOCARBÓN EN EL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN LAS ESPECIES MADERABLES DE MELINA *Gmelina arborea* Y PACHACO *Schizolobium parahybum*, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA"** realizado por los señores Junior Mauricio Conde Viñan y Santiago Delgado Lavanda egresados de la Carrera de Ingeniería Agrícola, he dirigido, revisado y aprobado en su integridad, por lo que se autoriza la publicación de la misma.

Loja, 3 de julio de 2015



Ing. OMAR OJEDA OCHOA Mg. Sc.
DIRECTOR

CERTIFICACIÓN

Los que al pie firmamos miembros del tribunal de grado, aprobamos que, los señores **Junior Mauricio Conde Viñan y Santiago Delgado Lavanda**, egresados de la carrera de Ingeniería Agrícola, han incorporado las correcciones y recomendaciones en su tesis titulada **"EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y DEL BIOCARBÓN EN EL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN LAS ESPECIES MADERABLES DE MELINA *Gmelina arborea* Y PACHACO *Schizolobium parahybum*, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA"** por lo tanto autorizamos su publicación.

Loja, 3 de julio de 2015.



Ing. Miguel Ángel Villamagua Mg. Sc.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL CALIFICADOR



Ing. Patricio Aguirre Mg. Sc.
VOCAL DEL TRIBUNAL



Ing. Pablo Alvarez Mg. Sc.
VOCAL DEL TRIBUNAL

AUTORÍA

Nosotros, **Junior Mauricio Conde Viñan y Santiago Delgado Lavanda** declaramos ser autores del presente trabajo de tesis y eximimos expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.


Adicionalmente aceptamos y autorizamos a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de nuestra tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca virtual.

Autores:

Junior Mauricio Conde Viñan

Santiago Delgado Lavanda

Firma:.....

Firma:.....

Cédula: 1900706480

Cédula: 1104713605

Fecha: 3 de julio de 2015.

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO

Nosotros, JUNIOR MAURICIO CONDE VIÑAN Y SANTIAGO DELGADO LAVANDA, declaramos ser autores de la tesis titulada **“EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y DEL BIOCARBÓN EN EL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN LAS ESPECIES MADERABLES DE MELINA *Gmelina arborea* Y PACHACO *Schizolobium parahybum*, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA”** como requisito para optar al título de: Ingeniero Agrícola, autorizamos al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Digital Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenios la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los 3 días del mes julio de 2015, firman los autores.

Firma: _____



Autor: **Junior Mauricio Conde Viñan**
Cédula: **1900706480**
Dirección: **Loja, Sucre y Azuay**
e-mail: **mauricioconde_m@hotmail.es**
Teléfono: **0986683528**

Firma: _____



Autor: **Santiago Delgado Lavanda**
Cédula: **1104713605**
Dirección: **Loja, Av. Eugenio Espejo**
e-mail: **delas2012@hotmail.com**
Teléfono: **0980452937**

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de tesis: Ing. OMAR OJEDA OCHOA Mg. Sc.

Tribunal de grado: Ing. Miguel Ángel Villamagua Mg. Sc.

Ing. Patricio Aguirre Mg. Sc.

Ing. Pablo Alvarez Mg. Sc.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre Marina Viñan, por ser el pilar más importante y ejemplo de una mujer luchadora por sus hijos trabajando arduamente cada día para poder darme mis estudios, que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional, durante todo mi trayecto estudiantil y de mi vida, enseñándome a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar.

A mis profesores, gracias por su tiempo, por su apoyo así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

Junior Mauricio Conde Viñan

Desde el fondo de mi corazón a Dios, a su amor eterno y compañía que dirigen siempre mi camino. A mi madre quien me dio la vida. A cada uno de mis familiares por la educación, apoyo, consejos y sacrificio brindados. A mis maestros y amigos y a todos los que estuvieron implícitos en la búsqueda diaria de esta meta.

Santiago Delgado Lavanda

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Loja, en especial a los Docentes de la Carrera de Ingeniería Agrícola por sus conocimientos impartidos y al personal administrativo que me acompañó durante nuestra vida universitaria.

Al Ing. Omar Ojeda director de la presente investigación, por ofrecernos su confianza y vasta experiencia y la posibilidad de realizar este trabajo bajo su acertada dirección.

Al Ing. Miguel Villamagua por brindarnos su amistad, confianza y facilitar el desarrollo de nuestro trabajo de tesis por su asesoramiento oportuno, con elevada base científico técnico.

Al laboratorio de suelos en especial al director del mismo y director de nuestra tesis Ing. Omar Ojeda por la ayuda prestada respecto a su laboratorio, al Laboratorio de Análisis Químico de la Universidad Nacional de Loja, en especial a la ingeniera Esthela González por la ayuda prestada en la terminación de los análisis de laboratorio y al Ing. Patricio Aguirre director del Laboratorio por su apertura y contribución.

De igual manera, nuestra gratitud y lealtad a los miembros del Tribunal Calificador de Tesis.

A nuestros queridos compañeros y amigos: Alex Cuenca, Cristian Castillo y Joffre Agila por su amistad, apoyo y consideración.

Queremos expresar un gran reconocimiento a todas las personas que de una u otra forma nos han apoyado y que con sus sabios conocimientos, experiencias y orientaciones han sabido guiarnos hasta la culminación de nuestra carrera profesional

Los Autores

INDICE GENERAL

Contenido	Pág
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS.....	II
CERTIFICACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL.....	III
AUTORÍA.....	IV
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIONE DE LITERATURA.....	3
2.1 FUNCIONES PROTECTORAS Y AMBIENTALES DEL BOSQUE	3
2.2 SUELOS DEL REVISIÓN TRÓPICO HÚMEDO Y DE LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA	3
2.2.1 Características Generales de los Suelos del Trópico Húmedo.....	3
2.2.2 Los suelos del Trópico Húmedo Formados a Partir de Granodiorita	4
2.2.3 Suelos del Trópico Húmedo Formados a Partir de Andesita.....	4
2.2.4 Suelos de la Zona Sur de la Amazonía Ecuatoriana	5
2.2.5 El Carbón Vegetal en el mejoramiento de los Suelos del Trópico Húmedo.....	7
2.2.6 La Acidez y su Control en los Suelos del Trópico Húmedo	7
2.3 EL CARBÓN VEGETAL EN EL MEJORAMIENTO DE LOS SUELOS DEL TRÓPICO HÚMEDO.....	8
2.3.1 Definición de Carbón Vegetal	8
2.3.2 Influencia de la Fertilidad del Suelo en el Secuestro del Carbono.....	8
2.4 ECOSISTEMAS FORESTALES: EMISIÓN DE CO ₂ Y CAPTURA DE CARBONO EN LOS SUELOS.....	10

2.5	EFFECTO DE LA BIOMASA DEL SUELO Y EL CARBONO MINERALIZABLE SOBRE LOS AGREGADOS Y SU EFECTO SOBRE LA TEXTURA Y CULTIVOS EN EL SECUESTRO DEL CARBONO.....	11
2.5.1	Uso de la Biomasa como un Sustituto Energético.....	11
2.5.2	El cambio Climático Global y su Mitigación.....	12
2.5.2.1	El cambio climático, causas y consecuencias.....	13
2.5.2.2	Almacenamiento y fijación de carbono, el papel de los sumideros.....	14
2.5.2.3	El papel de los suelos en el ciclo del carbono.....	15
2.5.2.4	Tierras de pastoreo: un gran potencial como sumidero de carbono.....	15
2.5.3	El Pachaco (<i>Schizolobium parahybum</i>) y la melina (<i>Gmelina arborea</i>) Especies Arbóreas Maderables de Rápido Crecimiento.....	16
2.5.3.1	El pachaco (<i>Schizolobium Parahybum</i>).....	16
2.5.3.2	La melina (<i>Gmelina Arbórea</i>).....	18
2.6	INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON EL TEMA.....	20
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1	LA ZONA DE ESTUDIO Y SITIO DEL EXPERIMENTO.....	25
3.1.1	Zona de Vida.....	26
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS.....	27
3.3	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.3.1	Diseño Experimental, Factores en Estudio, Niveles y Tratamientos.....	28
3.3.2	Especificaciones del Experimento.....	29
3.4	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	30
3.4.1	Metodología para Evaluar la Incidencia en la Parte Final, de la Aplicación de Carbón Vegetal, Cal y Nutrientes Minerales sobre las Condiciones Químicas del Suelo, la Disponibilidad de Nutrientes y las Reservas C y de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, en un Suelo de Granodiorita y Andesita para la Plantación de las Especies Arbóreas Maderables en la Zona Sur de la Región Amazónica Ecuatoriana.....	30

3.4.2. Metodología para el Segundo Objetivo para Evaluar el Almacenamiento de Carbono a los 44 meses después de la Plantación de los Árboles Maderables con Fertilización y Biocarbón.....	31
3.4.2.1. Carbono en el suelo.....	31
3.4.2.2. Selección de árboles.....	32
3.4.2.3. Muestreo de campo.....	32
3.4.2.4. Procesamiento de las muestras.....	33
3.4.2.5. Determinación del contenido de humedad.....	33
3.4.2.6. Determinación de la densidad básica.....	34
3.4.2.7. Cálculo de la biomasa aérea.....	35
3.4.2.8. Determinar el carbono orgánico de la biomasa aérea de <i>gmelina arbórea</i> y <i>schizolobium parahybum</i>	36
3.4.3. Técnicas de Procesamiento y Análisis de los Datos.....	36
3.4.4. Metodología para el Tercer Objetivo para la Difusión y Transferencia de Resultados..	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
RESULTADOS PARA EL SUELO TYPIC KANDIHUMULTS.....	38
4.1. EVOLUCIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS DEL SUELO HASTA 50 CM DE PROFUNDIDAD.....	38
4.1.1. Reacción del Suelo.....	38
4.1.2. Acidez Intercambiable.....	39
4.2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO, BASES CAMBIABLES Y SATURACIÓN DE BASES.....	40
4.2.1. Capacidad de Intercambio Cationico Efectiva (CICe).....	40
4.2.2. Bases Cambiables.....	41
4.2.2.1. Calcio intercambiable (Ca ⁺⁺).....	41
4.2.2.2. Magnesio intercambiable (Mg ⁺⁺).....	42
4.2.2.3. Potasio intercambiable (K ⁺).....	42
4.2.2.4. Sodio intercambiable (Na ⁺).....	43

4.2.2.5. Saturación de bases (%).....	44
4.3. DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES.....	44
4.3.1. Nitrógeno Disponible.....	44
4.3.2. Fósforo Disponible.....	45
4.3.3. Potasio Disponible.....	46
4.3.4. Calcio Disponible.....	47
4.3.5. Magnesio Disponible.....	47
4.3.6. Zinc Disponible.....	48
4.3.7. Cobre Disponible.....	49
4.3.8. Hierro Disponible.....	49
4.3.9. Manganeso Disponible.....	50
4.4. CAPTURA DE CARBONO POR LAS ESPECIES ARBÓREAS MADERABLES Y APORTE AL SUELO.....	50
4.4.1. Biomasa y Contenido de Carbono en las Especies Arbóreas.....	50
4.4.2. Carbono en el Suelo.....	51
4.4.3. Almacenamiento de C en la Biomasa y en el Suelo.....	52
RESULTADOS PARA EL SUELO RHODICK KANDIUDULTS.....	53
4.5. EVOLUCIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS DEL SUELO.....	53
4.5.1. Reacción del Suelo.....	53
4.5.2. Acidez Intercambiable.....	54
4.6. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO, BASES CAMBIABLES Y SATURACIÓN DE BASES.....	55
4.6.1. Capacidad de Intercambio Cationico Efectiva(CICE).....	55
4.6.2. Bases Cambiables.....	55
4.6.2.1. Calcio intercambiable (Ca^{2+}).....	55
4.6.2.2. Magnesio intercambiable (Mg^{++}).....	56
4.6.2.3. Potasio intercambiable (K^+).....	57
4.6.2.4. Saturación de bases(%).....	57

4.7.	DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES.....	58
4.7.1.	Nitrógeno Disponible.....	58
4.7.2.	Fósforo Disponible.....	58
4.7.3.	Potasio Disponible.....	59
4.7.4.	Calcio Disponible.....	60
4.7.5.	Magnesio Disponible.....	60
4.7.6.	Zinc Disponible.....	61
4.8.	CAPTURA DE CARBONO POR LAS ESPECIES ARBÓREAS MADERABLES Y APORTE AL SUELO.....	62
4.8.1.	Biomasa y Contenido de Carbono en las Especies Arbóreas.....	62
4.8.2.	Carbono en el Suelo.....	62
4.8.3.	Almacenamiento de C en la Biomasa y en el Suelo.....	63
5.	CONCLUSIONES.....	66
6.	RECOMENDACIONES.....	68
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	69
8.	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Pág
Cuadro 1. Se muestra la Clasificación taxonómica del pachaco.....	17
Cuadro 2. Se muestra la clasificación taxonómica de la melina.....	18
Cuadro 3. Localización del área de estudio.....	26
Cuadro 4. Factores y niveles del experimento.....	28
Cuadro 6. Análisis de varianza para el diseño de parcelas subdivididas.....	37
Cuadro 7. Promedios y prueba de Tukey al 5% para pH _{H2O} en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización, La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	38
Cuadro 8. Promedios y prueba de Tukey al 5% para acidez intercambiable (Al ³⁺ + H ⁺) cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, y44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	39
Cuadro 9. Promedios y prueba de Tukey al 5% para CICE cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	40
Cuadro 10. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	41
Cuadro 11. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg ⁺⁺ (cmol (+) kg ⁻¹), en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	42
Cuadro 12. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	42
Cuadro 13. Promedios y prueba de Tukey al 5% para % SB, en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	44

Cuadro 14. Promedios y prueba de Tukey al 5% para P mg kg ⁻¹ en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	45
Cuadro 15. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K mg kg ⁻¹ en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	46
Cuadro 16. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca disponible (mg kg ⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	47
Cuadro 17. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg disponible (mg kg ⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	47
Cuadro 18. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Zn disponible (mg kg ⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	48
Cuadro 19. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Fe disponible (mg kg ⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	49
Cuadro 20. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mn disponible (mg kg ⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.....	50
Cuadro 21. Promedios y prueba de Tukey al 5% para pH _{H2O} en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	53
Cuadro 22. Promedios y prueba de Tukey al 5% para acidez intercambiable (Al ³⁺ + H ⁺) cmol (+) kg ⁻¹ , en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	54
Cuadro 23. Promedios y prueba de Tukey al 5% para CICE cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	55

Cuadro 24. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca^{2+} cmol (+) kg^{-1} , en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	55
Cuadro 25. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg^{2+} (cmol (+) kg^{-1}), en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	56
Cuadro 26. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K^{+} cmol (+) kg^{-1} , en las capas de.....	57
00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	57
Cuadro 27. Promedios y prueba de Tukey al 5% para el porcentaje de SB, en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	57
Cuadro 28. Promedios y prueba de Tukey al 5% para fósforo disponible mg kg^{-1} en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	58
Cuadro 31. Promedios y prueba de Tukey al 5% para potasio disponible (mg kg^{-1}), en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	59
Cuadro 19. Promedios y prueba de Tukey al 5% para calcio disponible Ca kg^{-1} en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	60
Cuadro 20. Promedios y prueba de Tukey al 5% para magnesio disponible (mg kg^{-1}), en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	60
Cuadro 32. Promedios y prueba de Tukey al 5% para zinc disponible (Zn kg^{-1}), en las capas de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág
Figura 1. Pachaco (<i>Schizolobium parahybum</i>).....	16
Figura 2. Melina <i>Gmelina arborea</i>	18
Figura 3. Ubicación de los experimentos. en el sitio La Victoria, del cantón Zamora y Los Zapotes - Panguintza del cantón Centinela del Cóndor (Zumbi) de la provincia de Zamora Chinchipe en el sur de la Amazonia Ecuatoriana.....	25
Figura 4. Espectrofotometro de absorción atómica.....	30
Figura 5. Espectrofotometro UV.....	31
Figura 6. Selección de árboles (arbol 1 y arbol 2).....	32
Figura 7. Recolección de la muestra de biomasa.....	33

ÍNDICE DE ANEXOS

Contenido	Pág
Anexo 1. Esquema de distribución de los tratamientos y una subparcela.....	73
Anexo2. Medición del pH.....	74
Anexo3. Muestreo de campo.....	74
Anexo4. Procesamiento de las muestras.....	76
Anexo5. Determinación del carbono en la biomasa.....	77
ANEXOS DEL SUELO TYPIC KANDIHUMULTS.....	78
Anexo 6. Adeva para el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	78
Anexo 7. Adeva para la acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) cmol (+) kg^{-1} en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	78
Anexo 8. Adeva para la CICE en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	79
Anexo 9. Adeva para el Ca^{++} en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	79
Anexo 10. Adeva para el Mg^{++} en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	80
Anexo 11. Adeva para el K^+ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	80
Anexo 12. Adeva para el Na^+ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	81
Anexo 13. Adeva para la SB % en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	81
Anexo 14. Adeva para la N en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	82

Anexo 15. Adeva para el P disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	82
Anexo 16. Adeva para el K disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	83
Anexo 17. Adeva para el Ca disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	83
Anexo 18. Adeva para el Mg disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	84
Anexo 19. Adeva para el Zn disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	84
Anexo 20. Adeva para el Cu disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	85
Anexo 21. Adeva para el Fe disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	85
Anexo 22. Adeva para el Mn disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	86
Anexo 23. Análisis de varianza de biomasa aérea, C en la biomasa, C en el suelo (t ha ⁻¹) en las capas; y C total (biomasa + C 00-50 cm suelo), a los 44 meses después de la plantación.....	86
ANEXOS DEL SUELO RHODIK KANDIUDULTS.....	87
Anexo 24. Adeva para el pH _{H2O} disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	87
Anexo 25. Adeva para la acidez intercambiable (Al ³⁺ + H ⁺) cmol (+) kg ⁻¹ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	87
Anexo 26. Adeva para la CICE en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	88
Anexo 27. Adeva para el Ca ⁺⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	88

Anexo 28. Adeva para el Mg ⁺⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	89
Anexo 29. Adeva para el K ⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	89
Anexo 30. Adeva para la SB % en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	90
Anexo 31. Adeva para N disponible, dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	90
Anexo 32. Adeva para el P disponible en cuatro fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	91
Anexo 33. Adeva para el K disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	91
Anexo 34. Adeva para el Ca disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	92
Anexo 35. Adeva para el Mg disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	92
Anexo 36. Adeva para el Zn disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.....	93
Anexo 37. Análisis de varianza de biomasa aérea, C en la biomasa, C en el suelo (t ha ⁻¹) en las capas; y C total (biomasa + C 00-50 cm suelo), a los 44 meses después de la plantación.....	93

“EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y DEL BIOCARBÓN EN EL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN LAS ESPECIES MADERABLES DE MELINA *Gmelina arborea* Y PACHACO *Schizolobium parahybum*, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA”

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito fundamental contribuir a la generación de información que permita la recuperación de suelos amazónicos degradados por la conversión de bosques naturales a pastizales; a través de la evaluación de las condiciones químicas, la disponibilidad de nutrientes y el almacenamiento de C en dos suelos representativos del Sur de la Amazonia Ecuatoriana, desarrollados sobre granodiorita en Zamora y andesita en el sector de Panguintza; en los que anteriormente se instalaron dos experimentos diseñados en parcelas subdivididas (2x2x3) para determinar el efecto del carbón vegetal (0, 3, y 6 t ha⁻¹), cal (5 t ha⁻¹) y nutrientes (N; P, K; Mg y Zn), sobre el crecimiento inicial de melina (*Gmelina arborea*) y pachaco (*Schizolobium parahybum*). En el monitoreo a los 44 meses se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas por efecto de la fertilización. El pH_(H2O) de los suelos en los dos experimentos en las capas de 00 – 25 cm y 25 – 50 cm en los tratamientos fertilizados de Zamora evolucionó de 4,98 a 5,17 y de 4,93 a 4,86; y en los tratamientos de Panguintza se incrementó de 3,07 a 3,12 y 4,89 a 5,03 respectivamente. La acidez intercambiable en los suelos disminuyó; además, se incrementaron las concentraciones de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺; el K⁺ permaneció bajo. Esto se debe en gran parte a la absorción de los nutrientes por las especies maderables y a la lixiviación de los nutrientes debido a las excesivas precipitaciones. En la capa 00 – 25 cm de los tratamientos fertilizados se incrementó la disponibilidad de P, Ca, Mg y Zn; el N, K y Cu permaneciendo en el rango bajo. En los tratamientos fertilizados de Zamora el valor promedio de C en el sistema (C hasta 50 cm en el suelo + C en la biomasa aérea) fue de 204,7 t ha⁻¹, correspondiendo el 89,9% al C en el suelo hasta 50 cm de profundidad y el 10,1% al C de la biomasa aérea; mientras que para Panguintza fue de 152 t ha⁻¹, correspondiendo el 80% al C en el suelo hasta 50 cm de profundidad y el 20% al C de la biomasa aérea

SUMMARY

The current research's main purpose was to contribute to the generation of information to allow the recovery of Amazonian soils degraded by areas converted from natural forests to pasture; through the assessment of chemical conditions, the availability of nutrients and storage of C in two representative soils in the South of the Ecuadorian Amazon, developed on granodiorite in Zamora and andesite in the area of Panguintza; where two experiments designed in subdivided plots (2x2x3) to determine the effect of charcoal (0, 3, y 6 t ha⁻¹), lime (5 t ha⁻¹) and nutrients (N; P, K; Mg y Zn) about the initial growth of melina (*Gmelina arborea*) and pachaco (*Schizolobium parahybum*) were previously installed. In the 44 months monitoring highly significant statistical differences by effect of fertilization were found. The pH (H₂O) of soils in the two experiments in the layers of 00-25 cm and 25 - 50cm Zamora fertilized treatments evolved from 4.98 to 5.17 and from 4.93 to 4.86; and Panguintza treatments increased from 3.07 to 3.12 and 4.89 to 5.03 respectively. The exchangeable soil acidity decreased; furthermore, concentrations of Ca ⁺⁺ and Mg ⁺⁺ increased; K ⁺ remained low. This is largely due to the absorption of nutrients by the timber species and the leaching of nutrients due to excessive rainfall. In the layer 00-25 cm of fertilized treatments the availability of P, Ca, Mg and Zn increased; N, K and Cu remained in the low range. In Zamora fertilized treatments the average value of C in the system (C up to 50cm in the soil + C in aboveground biomass) was 204,7t ha⁻¹, corresponding to 89.9% soil C up to 50 cm depth and 10.1% to C of the biomass; while for Panguintza it was 152 t ha⁻¹, corresponding to 80% to C in the soil to 50 cm deep and 20% to C of the aboveground biomass.

1. INTRODUCCIÓN

En el corredor de la red fluvial Zamora-Nangaritza en la zona sur de la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE), en los suelos de las ondulaciones, el pie de monte, las colinas y montañas bajas, en el rango de 800 a 1100 msnm son muy profundos, arcillosos, fuertemente ácidos y han evolucionado a los estados intermedio y avanzado de la meteorización ferralítica (acumulación residual de Fe y Al) por lo que pertenecen al orden de los Ultisoles (Kandiudults, Kanhapludults) (Valarezo, 2004a).

La actividad humana ha provocado el remplazo del bosque natural por pastizales, interrumpiendo gravemente el reciclaje natural de los elementos nutritivos, los cuales se lixivian por la lluvia, produciendo en forma rápida la mineralización de la reserva de materia orgánica, provocando la degradación y la reducción de la fertilidad de los suelos, convirtiéndolos en marginales (Valarezo, 2004a).

Ante este problema surge la necesidad de recuperar productivamente estos suelos degradados por efecto de la conversión del bosque natural a pastizales para la ganadería bovina, la Universidad Nacional de Loja (UNL) viene desarrollando el proyecto de investigación *“Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de carbón vegetal en plantaciones de árboles maderables en el Sur de la Amazonia Ecuatoriana”*, cuyo objetivo general se orienta a generar alternativas para la repoblación forestal productiva de las áreas degradadas, en el marco de una gestión sostenida de la fertilidad de los suelos. Para ello, se ha propuesto probar una combinación de enmiendas de carbón vegetal, cal, y nutrientes, en dos suelos representativos de la zona, desarrollados sobre granodiorita en Zamora, andesita el sector de Panguintza y San Francisco. Dentro de este proyecto se desarrolló la presente investigación.

Finalmente el presente trabajo de investigación se orientó a generar información sobre la fertilidad actual de los suelos a los 44 meses después de

haber sido tratados con carbón vegetal, cal y nutrientes, para lo cual se plantearon los siguientes objetivos:

- Evaluar la incidencia a los 44 meses después de la plantación, de la aplicación de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales sobre las condiciones químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes, en un suelo de granodiorita y andesita para la plantación de las especies arbóreas maderables en la zona sur de la Región Amazónica Ecuatoriana.

- Evaluar el almacenamiento de carbono a los 44 meses después de la plantación de árboles maderables con enmiendas de carbón vegetal en los experimentos de Zamora y Panguintza.

- Difundir y transmitir los resultados de la investigación a los actores interesados e involucrados en el sector productivo y forestal.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 FUNCIONES PROTECTORAS Y AMBIENTALES DEL BOSQUE

Gottle y Hadji (1997), sostienen que el bosque, es un amortiguador natural, mantiene el equilibrio ecológico, siendo al mismo tiempo un elemento clave en el paisaje y un suministrador de materias primas y diversos servicios protectores a las sociedades. Los árboles favorecen la infiltración del agua lluvia, consecuentemente reducen la erosión, y aportan a procesos de limpieza del agua natural; atenúa el viento, la densa red de raíces mantiene fijo el suelo y reduce el movimiento de tierras; los bosques influyen sobre la circulación local del aire y pueden, así, retener las suspensiones sólidas y los elementos gaseosos, así como filtrar las masas de aire y retener los contaminantes; y, el bosque ofrece un hábitat a la flora y la fauna, así como funciones recreativas y de curación.

2.2 SUELOS DEL TRÓPICO HÚMEDO Y DE LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA

2.2.1 Características Generales de los Suelos del Trópico Húmedo

Los suelos del trópico húmedo, sin una estación seca definida, donde la meteorización es rápida y a menudo muy intensa (Mosquera1967).

Los suelos del trópico húmedo cubren alrededor del 25% de la superficie terrestre y en el Ecuador ocupan el 52% del territorio nacional, en su mayor parte en la Región Amazónica y en el nor-occidente del país (provincia de Esmeraldas) (Valarezo, 2004).

Según Sys citado por Valarezo (2004 a), los suelos del trópico húmedo se forman en un ambiente de meteorización ferralítica, que ocurre en un clima con precipitación anual mayor a 1 200 mm y temperatura media mensual mayor a 22°C (isohipertémico), con vegetación que corresponde al bosque húmedo

tropical. El régimen de humedad del suelo del ambiente tropical húmedo es generalmente único.

2.2.2 Los suelos del Trópico Húmedo Formados a Partir de Granodiorita

La granodiorita es una roca ácida constituida por cuarzo y feldespatos, pero contrariamente al granito, contiene más plagioclasas que ortosa. Los minerales secundarios son la biotita, el anfíbol y el piroxeno. Los porcentajes de composición de la granodiorita con respecto al total de sus componentes son: cuarzo 10 a 35%, feldespato 20 a 40%, plagioclasas 25 a 45%; y, otros 10 a 30% (moscovita, biotita, piroxenos y anfíboles); sin embargo, las plagioclasas y los feldespatos son difíciles de distinguir a simple vista, por lo que no hay diferencia aparente entre un granito y una granodiorita (Galán, 1982).

El material parental tiene una gran influencia, sobre las características finales de los suelos del trópico húmedo. Las rocas ácidas ígneas y metamórficas (granito, granodiorita, riolita, gneis) generan suelos dominados por arcillas de color rojo a amarillo rojizo, con la presencia de granos gruesos de cuarzo. En un primer estado la roca se transforma en un material arenoso grueso (Valarezo, 2004).

2.2.3 Suelos del Trópico Húmedo Formados a Partir de Andesita

La andesita es una roca ígnea volcánica de composición media. Su composición mineral comprende generalmente plagioclasa y varios otros minerales ferromagnésicos como piroxeno, biotita y hornblenda. También puede haber cantidades menores de sanidina y cuarzo. Los minerales más grandes como la plagioclasa suelen ser visibles a simple vista mientras que la matriz suele estar compuesta de granos minerales finos o vidrio. El magma andesítico es el magma más rico en agua aunque al erupcionar se pierde esta agua como vapor. Si el magma andesítico cristaliza en profundidad se forma el

equivalente plutónico de la andesita que es la diorita. En este caso el agua pasa a formar parte de anfíboles, mineral que es escaso en la andesita.

2.2.4 Suelos de la Zona Sur de la Amazonía Ecuatoriana.

En el corredor fluvial Zamora-Nangaritza, que corresponde a buena parte de la zona sur de la Amazonía Ecuatoriana, el estado de meteorización ferralítica de los suelos (desarrollo del perfil, fertilidad potencial y actual), guarda estrecha relación con la forma del relieve, lo que a la vez está vinculado a la edad del material parental y las condiciones de drenaje. Así, los suelos en estado reciente sin desarrollo del perfil (Entisoles de color pardo) se encuentran en los valles aluviales; los suelos en estado intermedio (Inceptisoles) de color pardo amarillento, en las terrazas antiguas y en el pie de monte y, los suelos en estado avanzado (Ultisoles de color rojo amarillento) en las laderas de las colinas y montañas (Valarezo, 2004). Estos últimos han sido ubicados en el gran grupo de los Kandudults.

La degradación de los suelos de Zamora-Nangaritza, se origina en la tala del bosque natural para la siembra de naranjilla y luego de pastos, produciendo la interrupción del ciclo orgánico al interrumpir abruptamente el reciclaje natural de los elementos nutritivos. Se estima que actualmente la afectación alcanza alrededor del 50% de las áreas del pie de monte y las colinas y montañas bajas (aproximadamente 50 000 ha), la misma que lamentablemente sigue creciendo a expensas de la destrucción del bosque primario (Valarezo *et al.*, 1998).

Córdova y Novoa (2010), consideran que la erosión de la Región Amazónica es por el agresivo crecimiento vegetal y la variedad de formas de vida, que radican en la productividad del suelo. Este factor, muy relativo, ha sido aprovechado por intereses que tienden a una explotación en gran escala y sin cuidados de los recursos principalmente forestales. El complejo y frágil ecosistema que conforma la selva amazónica funciona en conjunto dentro de ciclos cerrados y muy vulnerables. La alteración de uno de los componentes de

este ecosistema rompe el ciclo y todo el conjunto entra en peligro de degradación. Esta es la razón por la cual la tala indiscriminada de la selva llevara finalmente a la destrucción de los suelos, la flora y fauna. Una vez alterado el ecosistema, pueden ocurrir cambios desfavorables de clima y alteraciones en el ciclo biológico de las especies, que llevaran a tal degradación, que la región se convertiría en una impresionante sabana improductiva.

Los problemas de erosión en los suelos ubicados en la región oriental de la cordillera son principalmente causados por la quema y utilización de la vegetación natural en las pendientes muy inclinadas. Además, la siembra de estas con cultivos anuales, ayudan a la destrucción de los suelos. La hoya amazónica propiamente dicha, entre 600 y 240 msnm, se compone de conjuntos de colinas de suelos rojos, poco profundos, arcillosos, compactados y muy lixiviados. Estos suelos predominantes en la amazonia ecuatoriana, de condiciones químicas y físicas adversas, deben ser dejados con la cobertura de bosques protectores o efectuar una planificada y cuidadosa explotación del bosque protector actual, utilizando prácticas de agroforestería y silvopastoriles.

Finalmente, las llanuras y terrazas aluviales son bastante homogéneas y bien drenadas, están compuestas en su mayoría por material de origen volcánico, suelos profundos, sueltos y generalmente muy fértiles (Córdova y Novoa 2010) Custude (1983), menciona que la brusca desaparición de la vegetación ocasiona una mayor incidencia de las alternativas climáticas, dejando el suelo sometido a los efectos de la lluvia, cuyo impacto directo provoca la destrucción de los agregados y su arrastre por la escorrentía superficial, lo que aumenta el riesgo potencial, más todavía cuando, se utilizan tractores pesados para desmontar o cultivar. La deforestación acelera la humificación de la materia orgánica que no puede ser reemplazada, lo que tiene como consecuencia, además de su efecto en la fertilidad, efectos físicos, tales como: incremento de la densidad aparente, de la compacidad, disminución de la permeabilidad, de la porosidad y de la aireación.

2.2.5 El Carbón Vegetal en el mejoramiento de los Suelos del Trópico Húmedo.

En la amazonia brasilera, en Oxisoles de baja fertilidad, donde el bosque natural ha sido reemplazado con cultivos, se encuentran pequeñas áreas dispersas cuyos suelos no presentan el color rojo de los Oxisoles, sino son de color negro. Estos suelos se los conoce con el nombre de Terra Preta do Indio. Son suelos más fértiles; los científicos han determinado el origen de su mayor fertilidad, en el carbón vegetal, donde los nativos pre-colombinos, tumbaron el bosque, enterraron la biomasa y la quemaron; la combustión incompleta de la biomasa, debido a la falta de oxígeno, produce carbón vegetal. Después de 1500 años, estos suelos todavía son fértiles (Lotter, 2002).

2.2.6 La Acidez y su Control en los Suelos del Trópico Húmedo.

Espinoza (2010), indica que los minerales arcillosos de los suelos tropicales rojos (Ultisoles y Oxisoles), que han sufrido un proceso severo de meteorización, son estables hasta valores de pH 5,0, encontrándose el Al fijo en la partícula de arcilla y no amenaza el crecimiento de la planta, hasta que el pH del suelo desciende a valores donde los óxidos, hidróxidos y la caolinita se disuelven y liberan Al a la solución del suelo, por lo que es aconsejable elevar el pH a valores de alrededor de 5,5, lo que permite la precipitación del Al e incrementa apreciablemente la CIC (suelos de carga variable). Este incremento en pH es suficiente para el adecuado crecimiento y rendimiento de los cultivos.

Sys (1979) citado por Valarezo (2004b, p.31) para cuantificar el requerimiento de CaCO_3 en los suelos del trópico húmedo recomienda tomar en consideración el contenido de materia orgánica (MO) y de Al^{3+} .

También Espinoza (2010), indica que en este tipo de suelos, mientras más alta sea la saturación de bases, mayor es la fertilidad y mayores los rendimientos; de estos conceptos surge el método para determinar los requerimientos de cal, donde considera la saturación de bases a la cual se

desea llevar al suelo con la aplicación de la enmienda. La experiencia brasileña en el cafeto señala que se debe llevar al suelo a una saturación de bases del 60% para rendimiento óptimo. En otras palabras, el cafeto puede crecer satisfactoriamente hasta con una saturación de 40% de Al^{3+} en la fase de intercambio.

2.3 EL CARBÓN VEGETAL EN EL MEJORAMIENTO DE LOS SUELOS DEL TRÓPICO HÚMEDO.

2.3.1 Definición de Carbón Vegetal.

La FAO (1983), citada por Rosero y Cabrera (2011) considera que el Carbón Vegetal es el residuo sólido que queda de "carbonizar" la madera, o se la "hidroliza", en condiciones controladas, en un espacio cerrado, como es el horno de carbón. El control se hace sobre la entrada del aire, durante el proceso de pirólisis o de carbonización, para que la madera no se queme simplemente en cenizas, como sucede en un fuego convencional, sino que se descomponga químicamente para formar el carbón vegetal.

El carbón vegetal es una fuente de energía renovable, su producción constituye una oportunidad para la recuperación de residuos, no solo de la industria de transformación mecánica de la madera sino también para los residuos de producción de madera (Panduro, 2012).

2.3.2 Influencia de la Fertilidad del Suelo en el Secuestro del Carbono.

El incremento de la biomasa de los cultivos puede aumentar el ingreso de materia orgánica en el suelo, el que puede ocurrir por medio de la introducción de nuevas variedades de manejo agronómico, como en el caso de los nutrientes, especialmente el nitrógeno y la rotación de cultivos. Se requiere cerca de 70 – 100 kg de nitrógeno para capturar una tonelada de carbono. El aumento del contenido de CO_2 en la atmósfera debido al cambio climático puede tener una influencia positiva similar, conocido como efecto de fertilización con CO_2 . En este sentido, un significativo número de

investigaciones desarrolladas en Europa, indican que la tasa fotosintética se ha incrementado debido al contenido de CO₂ en la atmósfera. En estos experimentos se ha conseguido una eficiente absorción del nitrógeno así como una reducción del carbono remanente.

El Protocolo de Kyoto reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros. Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO₂. Dentro del contexto del Protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de las Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero (FAO, 2002).

La acidez de los suelos del trópico húmedo se puede mejorar. Espinoza (2010), indica que en este tipo de suelos, mientras más alta sea la saturación de bases, mayor es la fertilidad y mayores los rendimientos; de estos conceptos surge el método para determinar los requerimientos de cal, donde considera la saturación de bases a la cual se desea llevar al suelo con la aplicación de la enmienda. La experiencia Brasileña en el cafeto señala que deben llevar al suelo a una saturación de bases del 60% para rendimiento óptimo. En otras palabras, el cafeto puede crecer satisfactoriamente hasta con una saturación de 40% de Al en la fase de intercambio. Con estos criterios los requerimientos de cal se pueden calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$R.C. (t/ha) = (CIC (SB2-SB1))/100$$

Donde:

RC = Requerimiento de cal

CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico

CICE = (H⁺ + Al³⁺ + K⁺ + Mg²⁺ + Ca²⁺) cmoles (+) kg⁻¹ de suelo

SB1 = Porcentaje de Saturación de Bases

$$SB1 = \frac{K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}}{CICE} * 100$$

SB2 = Porcentaje de Saturación de Bases a la cual se desea llegar

Valarezo (2004), señala que un sobre encalado en los oxisoles y ultisoles es muy peligroso, por cuanto existe una disminución de los rendimientos, deterioro de la estructura del suelo y reducción de la disponibilidad de fósforo, boro, zinc y manganeso. La deficiencia de fósforo por el sobre encalado en los suelos con alta capacidad de fijación de fósforo es atribuida a la formación de fosfatos de calcio insoluble. En conclusión el manejo de la acidez de los suelos del trópico húmedo debería orientarse a: 1) neutralizar el Al^{3+} mediante encalado, sin sobrepasar de pH 5,5; 2) seleccionar especies más tolerantes al Al^{3+} ; y, 3) promover prácticas que permitan promover una penetración más profunda de las raíces en el subsuelo ácido.

2.4 ECOSISTEMAS FORESTALES: EMISIÓN DE CO₂ Y CAPTURA DE CARBONO EN LOS SUELOS

La mayoría de los modelos climáticos también indican que los sumideros de carbono aumentarán durante la primera mitad del presente siglo, debido a una extensión de la cobertura forestal. En el sector del uso de la tierra y bosques se han identificado dos estrategias principales para acumular carbono. La primera se refiere a aumentar la fijación de carbono al crear o mejorar los sumideros existentes y la segunda consiste en prevenir o reducir la tasa de liberación de carbono ya fijado en sumideros existentes. Las actividades de fijación de carbono pueden incluir tratamientos silviculturales para aumentar el crecimiento, agroforestación, forestación, reforestación y restauración de áreas degradadas.

En cuanto a las plantaciones forestales para fijación de carbono, es muy importante saber catalizar los espacios que se abren para la promoción de actividades sostenibles en el ámbito del uso de la tierra y los bosques (Zambrano et al., 2004).

2.5 EFECTO DE LA BIOMASA DEL SUELO Y EL CARBONO MINERALIZABLE SOBRE LOS AGREGADOS Y SU EFECTO SOBRE LA TEXTURA Y CULTIVOS EN EL SECUESTRO DEL CARBONO

La biomasa tiene muchas ventajas para asegurar un futuro favorable para el ambiente. Los estudios sobre el secuestro del carbono y la producción de carbono orgánico del suelo, son características importantes en los ciclos biogeoquímicos y la contribución del suelo a las emisiones de gas del efecto invernadero. Los micro agregados (>0,25 mm de diámetro) tienen una mayor concentración de carbono de la biomasa microbiana y del carbono mineralizable que los micro agregados, cerca de la superficie del suelo.

El incremento de la biomasa considera tanto la biomasa aérea como las raíces. Se podrían hacer considerables avances sobre todo, en lo que se refiere a las tierras de pastoreo seleccionando especies y variedades con raíces profundas, lo que al mismo tiempo, mejoraría los espacios porosos del suelo y los agregados del mismo, y de allí incrementar la capacidad de retención de humedad, especialmente en los suelos de zonas áridas y semiáridas. Otro componente de la biomasa y que contribuye con la formación y estabilidad de los agregados, caracterizado por el incremento de la materia orgánica, es la población de microorganismos (biomasa microbiana) y macrofauna (organismos con tamaño > 1 cm); estos últimos colaboradores de la formación de estructura y porosidad. Su número se incrementa paralelamente al aumento de la materia orgánica con una disminución de la labranza cero. (Zambrano et al., 2004).

2.5.1 Uso de la Biomasa como un Sustituto Energético

Se habla poco acerca del uso de los árboles y otro tipo de biomasa como una fuente de energía para sustituir el uso de combustibles fósiles emisores de CO₂. Sin embargo, ya se sabe que el cultivo y uso de biomasa de forma constante para sustituir los combustibles fósiles, tiene ventajas en comparación con el uso de biomasa exclusivamente como un medio de retener el carbono para crear un sumidero de CO₂. La biomasa renovable cultivada es

un combustible neutro en cuanto a la emisión de CO₂, con bajo contenido de compuestos de azufre, que puede convertirse en calor, electricidad y combustibles líquidos o gaseosos. La biomasa se cultiva permanentemente para generar energía a fin de producir beneficios ambientales, como conservación del suelo y rotación de la biodiversidad en comparación con los cultivos anuales (Zambrano et al., 2004).

En todo caso, al presentarse problemas asociados con el cultivo de biomasa solamente como un sumidero de carbono, éstos estarían enmarcados básicamente en: una vez que los árboles o plantas alcanzan la madurez, comienzan a perder el carbono almacenado y durante toda la vida de los árboles, es preciso hacer frente a los costos de mantenimiento. Sin embargo, cuando se cultiva biomasa por períodos cortos, con ciclos definidos y se le usa como una fuente de combustible, se generan ingresos de forma continua, creándose fuentes de trabajo locales y otros beneficios. El uso de biomasa como fuente de energía para compensar la utilización de combustibles fósiles y la retención provisoria de carbono en la biomasa en crecimiento (Zambrano et al., 2004).

2.5.2 El cambio Climático Global y su Mitigación.

El panel intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define el cambio climático como cualquier cambio del clima en el transcurso del tiempo ya sea en forma natural o como resultado de las actividades humanas (IPCC, 2007); mientras que la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) define como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

2.5.2.1 El cambio climático, causas y consecuencias.

El cambio climático tiene como causa principal el incremento de gases de efecto invernadero (GEI) generado mayoritariamente por las actividades humanas: la quema de combustibles fósiles, la ganadería, la deforestación, el cambio de uso del suelo, etc. Además indica que los GEI atrapan la radiación solar de onda larga causando un efecto de calentamiento gradual alrededor de la Tierra, una vez que éstos llegan a la atmósfera no desaparecen, permaneciendo durante décadas (IPCC, 2007).

La vegetación dentro de los ecosistemas es de suma importancia para el ciclo global del carbono (C), por que almacena grandes cantidades de éste en su estructura y en el suelo, y lo intercambia con la atmósfera mediante los procesos de fotosíntesis, respiración y descomposición. Sin embargo, la misma vegetación constituye fuente de carbono para la atmósfera cuando sufre alteraciones provocadas por el ser humano por causas naturales; por ejemplo, actividades de conversión de bosque a otros usos no forestales (Ramírez *et al.*, 1999). La tala y quema de las masas forestales, permite la liberación del C almacenado en la biomasa y con la degradación de los suelos se libera parte del C almacenado en el mismo. Pero, por otro lado, los bosques en crecimiento se convierten en sumideros de C al registrar una absorción neta de CO₂ de la atmósfera en la biomasa y en el suelo.

El ser humano puede mediante el ordenamiento forestal, modificar la magnitud de las reservas de C e inducir cambios en su circulación (flujo), alterando así la función de tales reservas en el ciclo del C y posiblemente afectando el clima de forma positiva (Brown, 1997).

Del mismo modo, todas las plantas y animales realizan el proceso de respiración, el cual causa disminución del O₂ e incremento del CO₂ atmosférico (Hall y Rao, 1994). Cuando una planta o una parte de ella mueren, el C fijado en los tejidos es liberado a la atmósfera en forma de CO₂ por medio del proceso de descomposición o mineralización (Finegan y Delgado, 1997).

La deforestación y otros cambios en el uso del suelo, constituyen una fuente significativa de CO₂ atmosférico. La magnitud de esta fuente adicional es comúnmente estimada entre 8 y 47% de la que se produce de los combustibles fósiles (Brown, 1997; Alexander *et al.*, 1998). La deforestación contribuye al aumento del CO₂ en la atmósfera de dos formas: disminuyendo la cobertura vegetal capaz de fijar C atmosférico, y por la liberación de CO₂ a la atmósfera a través de la quema y descomposición de la biomasa, incluida parte de la materia orgánica del suelo (Hall y Rao, 1994). Todo esto es una demostración de que el incremento de CO₂ en la atmósfera, no es solamente por efecto de la intervención humana en la industria o transporte, sino por actividades humanas en la agricultura y fundamentalmente por cambios en el uso del suelo. Los países en vías de desarrollo están más amenazados a los impactos del cambio climático, por cuanto presentan menos capacidad de resistencia a los riesgos climáticos. En la región del pacífico ecuatorial predicen que la precipitación anual se incrementará en un 20% (Bates *et al.*, 2008, citado Aguirre *et al.*, 2010).

En cambio climático en el Ecuador, en el período 1960 - 2006, se evidencia en el incremento de la temperatura en 0,8°C, la precipitación anual en un 33% en la región litoral y en un 8% en la región interandina; la cubierta de los glaciares ecuatorianos entre los años 1997 y 2006, se han reducido en un 27,8% (Cáseres y Núñez, 2011).

2.5.2.2 Almacenamiento y fijación de carbono, el papel de los sumideros.

El sumidero es un depósito de carbón de volumen creciente, todo lo contrario a una mina de carbón. Los más importantes son los océanos y la vegetación. El secuestro del carbón abarca los procesos para retirar el CO₂ de la biosfera. Son medios artificiales para capturar y almacenar el CO₂ e incrementar los procesos naturales de secuestro. Con ello se pretende frenar el calentamiento global.(Proyecto de Innovación Educativa "Comunicación sin fronteras" y Plan de Atención a la Diversidad 2009).

2.5.2.3 El papel de los suelos en el ciclo del carbono.

En este ciclo, el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1 500 Pg C a 1 m de profundidad (cerca de 2 456 a dos metros de profundidad)¹. El carbono inorgánico representa cerca de 1 700 Pg pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos. Los flujos entre el carbono orgánico del suelo o terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂.

Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica conciernen la vegetación -ingreso de residuos, composición de las plantas, los factores climáticos -condiciones de temperatura y humedad- y las propiedades del suelo - textura, contenido y mineralogía de la arcilla, acidez. Otros factores relacionados con la fertilización del suelo (N, Po S) o con el riego, tienen efecto sobre la producción de las plantas y por lo tanto sobre el contenido de materia orgánica. La tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo depende sobre todo de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno, el uso de la tierra, los sistemas de cultivo, el manejo del suelo y de los cultivos. En un tipo de suelo dado expuesto a prácticas constantes, se alcanza un casi-equilibrio -situación estable- de la materia orgánica del suelo después de 30 a 50 años (Greenland, 1995). En el contexto del combate del calentamiento global y del Protocolo de Kyoto, un punto importante es cómo crear en los suelos agrícolas de todo el mundo un sumidero de carbono bien cuantificado. Tal captura de carbono será relevante para los artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo y también tendrá efectos positivos adicionales para la agricultura, el ambiente y la biodiversidad (Zambrano et al., 2004).

2.5.2.4 Tierras de pastoreo: un gran potencial como sumidero de carbono.

Las tierras de pastoreo están incluidas en el Artículo 3.4 del protocolo de Kyoto y, como los bosques, juegan un papel importante en el secuestro de

carbono. En primer lugar, las tierras de pastoreo, según la FAO, ocupan 3 200 millones de hectáreas y almacenan entre 200 y 420 Pg en el ecosistema total, una gran parte del mismo debajo de la superficie y, por lo tanto, en un estado relativamente estable. El carbono del suelo en las tierras de pastoreo es estimado en 70 t/ha, cifra similar a las cantidades almacenadas en los suelos forestales (Trumbmore *et al.*, 1995 y Balesdent Arrouays, 1999) Citados por la (FAO, 2002).

Muchas áreas de tierras de pastoreo en las zonas tropicales y áridas son mal manejadas y están degradadas; por lo tanto, ofrecen variadas posibilidades de secuestro de carbono. (FAO, 2002).

2.5.3 El Pachaco (*Schizolobium parahybum*) y la melina (*Gmelina arborea*) Especies Arbóreas Maderables de Rápido Crecimiento.

2.5.3.1 El pachaco (*Schizolobium parahybum*)

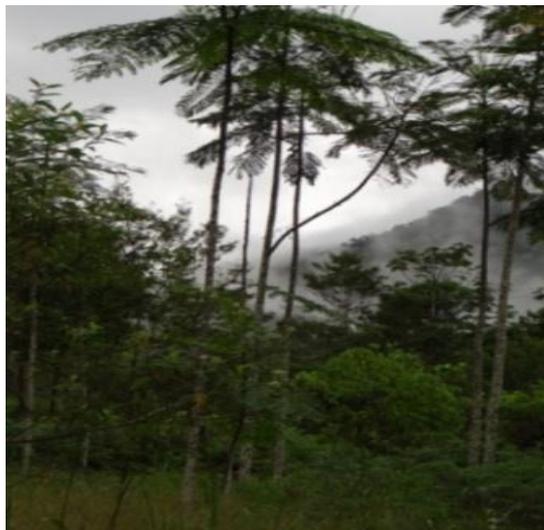


Figura. 1. Pachaco (*Schizolobium parahybum*)

Fuente: (Proyecto almacenamiento de carbono y evolución de la fertilidad de un suelo desarrollado sobre granodiorita, en la fase inicial de una plantación de *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum* con enmiendas de carbón vegetal, en la zona sur de la amazonia ecuatoriana)

Cuadro 1. Se muestra la Clasificación taxonómica del pachaco

División	Fanerógamas
Subdivisión	Angiospermas
Clase	Dicotiledóneas
Orden	Rosales
Familia	Leguminoseae
Género	<i>Schizolobium</i>
Especie	<i>parahybum</i>
Nombres vulgares	Pashaco, Masachi, Serebó, Sombrerillo, Tambor

Fuente: Ecuador Forestal (2012)

Según Estrada (1997), el pachaco es un árbol nativo de las regiones costeras, originario de la América tropical, extendiéndose desde la Amazonia por los trópicos húmedos hasta México.

El Pachaco (*Schizolobium parahybum*) es un árbol leguminoso, de rápido crecimiento, de fuste recto, alcanza hasta 22 m de altura y diámetro a la altura del pecho DAP de alrededor de 1 m. Su madera es de densidad liviana, pero tiene diferentes usos (contrachapados, aglomerados, enlistonados, pulpa, y como medio de aislamiento), aporta nitrógeno al suelo y por su rápido crecimiento contribuye a la captura de CO₂ en un tiempo relativamente corto, en comparación con las maderas más duras. Se lo puede cultivar en plantaciones puras, o en combinación con diversos cultivos en sistemas agroforestales. La industria maderera nacional utiliza el pachaco en la elaboración de tableros contrachapados y pulpa para tableros de fibra (Estrada, 1997)

El pachaco es rico en nitrógeno que lo capta a través de las bacterias nitrificantes simbióticas al aportar al suelo ramas y hojarasca, que fertilizan de forma natural a los cultivos que lo acompañan, quedando un sobrante en su propio beneficio y a favor de una progresiva fertilidad de los suelos Estrada (1997), citada por (Barragán, 2008).

2.5.3.2 La melina (*Gmelina Arborea*)



Figura 2. Melina *Gmelina arborea*

Fuente:(Proyecto almacenamiento de carbono y evolución de la fertilidad de un suelo desarrollado sobre granodiorita, en la fase inicial de una plantación de *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum* con enmiendas de carbón vegetal, en la zona sur de la amazonia ecuatoriana).

Cuadro 2. Se muestra la clasificación taxonómica de la melina.

Reino	Plantae
División	Angiospermae
Clase	Eudicotyledoneae
Subclase	Asteridae
Orden	Lamiales
Familia	Lamiaceae
Genero	<i>Gmelina</i>
Especie	<i>G arborea</i>
Nombre binomial	<i>Gmelina arborea</i>

Fuente: Ecuador Forestal (2012)

La melina es originaria del Asia, en especial de la India en el Sub Himalaya, esporádicamente encontrada en el oeste y sur de India, se ha difundido a países del cinturón tropical; es un árbol razonablemente fuerte para su peso. Se cultiva en zonas de vida de bosque húmedo y muy húmedo de la región tropical; bosque húmedo montano bajo de la región subtropical.

Es un árbol decíduo, sin contrafuertes, que alcanza hasta los 30m de altura y hasta 120cm de diámetro. La gama de colores de la madera va desde blanco grisáceo a marrón amarillento. La madera del duramen y la albura apenas se diferencia entre sí en cuanto al color. Tronco sin defectos, casi rectilíneo. Su copa en forma de cúpula, la raíz con la misma corteza suberosa de color pálido y aparecen a nivel del suelo. Hojas opuestas ampliamente ovadas, acuminadas, cordiformes glaucas por el envés. Las hojas caen entre enero y febrero y las nuevas aparecen en marzo y abril en su hábitat natural. Flores de un color naranja brillante. Fruto drupa ovoide u oblonga, succulento de 2, 3 a 3 cm de largo, amarillo cuando maduro, con un pericarpio coriáceo lustroso, en plantaciones los arboles empiezan a producir frutos de los tres a cuatro años de edad y la fructificación es regular y abundante cada año (Ecuador Forestal, 2012).

Su habitat natural son los bosques mixtos con 1.000 – 4.500 mm anuales de precipitación, con una latitud de 0 – 1.000 msnm y una temperatura de 22 – 27 °C. Prefiere suelos profundos, húmedos, bien drenados, fértiles de los valles aluviales francos o franco arenosos y prefiere pH alcalinos o ligeramente ácidos, pero no tiene éxito en suelos muy ácidos y lixiviados. Se adapta en suelos calcáreos y moderadamente compactados (Ecuador Forestal, 2012).

Los frutos se emplean para la preparación de champú, el follaje joven es apetecido por los animales, sus flores son bastante melíferas, las hojas, los frutos y la corteza se utilizan con fines medicinales, produce carbón de elevado poder calorífico, su turno para pulpa es de 5 a 6 años y para madera de 12 años. Ha sido exitosamente cultivada en América Tropical. En el Ecuador se han venido estableciendo plantaciones en las zonas de Santo Domingo, Quevedo y Quinindé (Cormadera, 2002), que son utilizados para pallets; y, por sus características de grano recto, textura fina y la presencia de veteado, constituye una excelente materia prima para fabricar muebles.

Muchas especies de rápido crecimiento de los árboles están disponibles para el establecimiento de plantaciones. Entre estos ejemplos,

Gmelina arborea ha recibido mucha atención como fuente de pulpa de buena calidad, de fibra de densidad media (MDF) y madera contrachapada, debido a su hermoso color blanco y fibra más fuerte. *G. arborea* tiene potencial para usos tales como la madera para edificios y para muebles. El estudio lo realizan en muestras de madera de árboles en edades de 3, 5, 7 y 12 años en Indonesia. Los resultados indican que la longitud de fibra en la plantación de 3,5 años de edad, tendía a ser más corta en los árboles de menor diámetro, mientras que en los árboles 7 y 12 años de edad es de mayor longitud. Esto sugiere que los pequeños árboles en la plantación de 3,5 años de edad, no había producido todavía la madera madura. Estos resultados sugieren que el siguiente paso es desarrollar tratamientos silvícolas para aumentar la tasa de crecimiento lateral durante la fase temprana de crecimiento, con el fin de producir madera madura, tan rápidamente como sea posible (Kojima *et al.*, 2009).

2.6 INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON EL TEMA.

Investigaciones recientes (Glaser *et al.*, 2002), han demostrado que en los suelos ácidos, la aplicación de carbón vegetal incrementa el pH y disminuye la saturación de Al, factores que a menudo constituyen las principales limitaciones de la productividad de los cultivos en los suelos altamente meteorizados de los trópicos húmedos (Cochrane y Sánchez, 1980; Mgagwu y Piccolo, 1997); pero, no solamente incrementan el contenido de nutrientes, sino también la retención de éstos, lo cual es especialmente importante en los suelos mencionados, que tienen baja capacidad de retención iónica (Glaser *et al.*, 2002), citada por (Villamagua, 2013).

El carbón vegetal ha sido exitosamente utilizado para el mejoramiento de los suelos (Cochrane y Sánchez, 1980; Mgagwu y Piccolo, 1997; Berkowitz *et al.*, 1970). Chidumayo en Alfisoles y Ultisoles de Zambia, reporta, entre siete plantas nativas maderables que en los suelos tratados con carbón vegetal se obtuvo mejor germinación de las semillas (incremento de 30%), mayor altura de brotes (24%) y mayor producción de biomasa (Chidumayo, 1994). Kishimoto y Sugiura (1985), después de cinco años de la aplicación de

0,5 t/ha de carbón vegetal, encontraron incrementos en las altura de los árboles de *Cryptomeria japónica* en un factor de 1,26 a 1,35; así como, un aumento en la producción de biomasa con un factor de 2,31 a 2,36. Se reporta, así mismo, que el rendimiento de los cultivos se puede incrementar aún más, cuando la aplicación de enmiendas de carbón va acompañada de fertilizantes y abonos orgánicos (Glaser *et al.*, 2002; Chidumayo, 1994).

Adicionalmente, el C pirogénico (carbón vegetal) es muy resistente a la degradación microbiana, persistiendo en el medio ambiente a través de siglos, debido a la estabilidad química proveniente de su estructura aromática (Lehmann *et al.*, 2002; Bechtold, 2002; Goldberg, 1985). Por lo tanto, el aporte de carbón vegetal para mejorar la fertilidad, podría conducir a un mayor secuestro de C y constituirse en un sumidero de CO₂ de largo plazo (Glaser *et al.*, 2002).

La investigación realizada en Nicaragua sobre Cuantificación del carbono almacenado en tres fincas en tres estados de desarrollo del bosque de Pino (*Pinusoocarpa*, L.) Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua. Selecciona un árbol promedio para la medición de biomasa seca (kg/árbol) fue 105,53, 316,07, 391,67 y de carbono almacenado (t C/ha) fueron 11,0, 45,5 y 58,5 para Bosque en Regeneración, Bosque joven y Bosque Maduro, respectivamente. En la biomasa de hojarasca el contenido de carbono (t/ha) fue de 3,89 t/ha (4 t C/ha), 5,50 (4,30 t C/ha) y 7,99 kg/m² (5,8 t C/ha). En hojarasca para Bosque en Regeneración, Bosque Joven y Bosque Maduro, el carbono determinado en el suelo fue de 310, 215 y 120 t C/ha para Bosque en Regeneración, Bosque Joven, Bosque Maduro, respectivamente. El suelo cumple una función muy importante en el Carbono acumulado. El carbono capturado se deposita o se fija en un 75% en el fuste de los árboles y el 16,7 % en ramas y 8,3 % en acículas. (Calderón y Solís, 2012).

La fijación total media de carbono en el sistema de cultivo de palma africana (biomasa aérea + suelo) alcanzó 96,02 Mg ha⁻¹ de C (perfil de suelo, 0 cm a 30 cm) y 126,03 Mg ha⁻¹ de C (perfil de suelo, 0 cm a 50 cm), de los cuales 22,68 Mg ha⁻¹ de C se encontraban en la biomasa aérea del cultivo, y el

resto en el suelo. El suelo fue el componente del sistema que almacenó la mayor cantidad de C con el 76,4 % (0 cm a 30 cm) y 82,1 % (0 cm a 50 cm) (LEBLANC *et al.*, 2006).

Urrego(2004), citado por Villamagua (2013), en un ensayo de crecimiento y rendimiento de *Gmelina arborea*, en Colombia, evaluó la productividad potencial a los tres años de edad, concluyendo que la variación de la altura y del volumen de madera fueron el resultado de la diferencia en la textura del suelo y drenaje natural, correspondiendo las parcelas más productivas con $37 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a suelos franco arcillosos (CIC 46,4 - 49 cmol (+) kg^{-1} de suelo y precipitación de 1000 mm y 1300 mm, respectivamente) y el sitio de menor productividad con $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a un suelo arcilloso (CIC 4,28 cmol (+) kg^{-1} de suelo , mal drenado y con precipitación de 2000 mm.

La investigación realizada por (Acosta, M., *et al.*, 2000), considera que los sistemas de vegetación (naturales, forestales inducidos y agrícolas) tienen la capacidad de capturar y secuestrar carbono, sin embargo, casi el 75% del C de los ecosistemas se encuentra en el suelo, como biomasa o en formas estables. En el suelo agrícola el mayor aporte a este almacén subterráneo lo realiza el suelo mineral, la contribución de raíces es mínima. El resultado que parece más interesante es que el mayor aporte de C del componente subterráneo independiente de que se trate de sistemas agrícolas o forestales, la hizo el suelo. La contribución de las raíces al C de este componente del sistema fue mínima, por ello es datos sugieren que en los trabajos de captura de carbono en suelos de ladera de zonas intertropicales, se les debe presentar mayor atención. Además, la mayor cantidad de C asociado a las raíces se encuentran en la profundidad de 0 a 30cm del perfil.

Tiene relación con el estudio realizado por Anikwe, M. (2010), en el sudeste de Nigeria donde las reservas de carbono más altos, 7906-9510 gC m^{-2} , fueron encontrados en los sitios que representan los bosques naturales, bosques artificiales y los ecosistemas de praderas artificiales. Continuamente recortada y los suelos labrados convencionalmente tenía existencias de

carbono un 70% menor (1978-2822 gC m⁻²). Por lo tanto, las reservas de carbono del suelo en un bosque de 45 años de edad fue *Gmelina* 8987 g C m⁻², mientras que las partes de este bosque, que se autorizaron y se cultivan de forma continua durante 15 años, tenían reservas de carbono 75% menor (1978 g C m⁻²). La reserva de carbono de los suelos cultivados continuamente y labranza convencional también fue 25% menor que las reservas de carbono de los suelos cultivados con el uso de la labranza de conservación.

Un estudio reciente realizado sobre el secuestro de carbono en la biomasa terrestre con especial énfasis en los sistemas tropicales de América Central y Panamá, considera que los bosques naturales, plantaciones exóticas, plantaciones de especies nativas y los sistemas agroforestales se considera que estos cuatro sistemas presentan un gran potencial para el acceso o almacenar carbono y contribuir así a la reducción de la atmósfera de CO₂. Se revisaron 50 conjuntos de datos de sitios de bosques neotropicales y observó un pequeño lavado en 38 de los sitios con un promedio de 0,71 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Con estos pequeños niveles de absorción o liberación de carbono, por lo tanto, parece seguro decir que los bosques naturales maduros son muy grandes reservas de carbono. Este análisis ha demostrado que los bosques tropicales albergan más carbono en la biomasa por encima del suelo que cualquier otro tipo de uso de la tierra examinado, aunque los bosques y las plantaciones más jóvenes secuestran carbono a un ritmo más rápido, valora el almacenamiento de carbono por hectárea son mucho mayores en los bosques naturales que en las zonas administradas o perturbados. El tamaño de este grupo se debe en parte a la complejidad de largo plazo, las interacciones no lineales, a través del cual se logra un nivel extremadamente eficiente de utilización de recursos (Grossman, J 2012).

Swaamy y Puri (2005) hacen una valiosa contribución al secuestro de carbono y mejorar la productividad y el ciclo de nutrientes dentro de los sistemas. Este estudio se realizó para determinar la producción de biomasa, C retención de nitrógeno y la asignación de *Gmelina arborea* plantada como único y agrosilvicultura sistema de tierras agrícolas abandonadas. A los 5 años, la biomasa total soporte en el sistema de agrosilvicultura fue de 14,1 Mg ha⁻¹.

Las plantaciones tenían 35% más de biomasa que el sistema de agrosilvicultura. A los 5 años, hojas, tallos, ramas y raíces contribuyeron 4,1, 65,2, 10,0 y 20,7%, respectivamente, a la biomasa total en pie ($17,9 \text{ Mg ha}^{-1}$). A los 5 años de estudio, los árboles tenían $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ más C y 36 kg ha^{-1} más N que en sistemas de agrosilvicultura. Después de 5 años, C orgánico del suelo aumentó en un 51,2 y un 15,1% y un 38,4 N y 9,3% en la plantación y el sistema de agrosilvicultura, respectivamente. Total de almacenaje C en tierras agrícolas abandonadas antes de la siembra fue de $26,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, que aumentó a $33,7$ y $45,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ después de 5 años en las plantaciones y el sistema de agrosilvicultura, respectivamente. Net C de almacenamiento (suelo + árbol) fue de $7,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ en agrosilvicultura sistema en comparación con $19,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ en *G. arbórea* monocultivo en pie. Los estudios sugieren que competitiva interacciones juegan un papel importante en el sistema de agrosilvicultura. Las plantaciones fueron más eficientes en acreción C de sistema de agrosilvicultura en tierras agrícolas abandonadas.

3 MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 ZONA DE ESTUDIO Y SITIO DEL EXPERIMENTO.

La zona de estudio corresponde a la red fluvial Zamora-Nangaritza, en el sur de la amazonia ecuatoriana, que fisiográficamente es un valle alargado y estrecho, con flancos de las cordilleras Real y El Cóndor, a ambos lados.



Figura 3. Ubicación de los experimentos. en el sitio La Victoria, del cantón Zamora y Los Zapotes - Panguintza del cantón Centinela del Cóndor (Zumbi) de la provincia de Zamora ChinchiPE en el sur de la Amazonia Ecuatoriana.

Los experimentos se encuentran ubicados, en el sector La Victoria del cantón Zamora, en una propiedad perteneciente a la Unidad “BS-62 Zamora”, del Ejército Ecuatoriano, que se encuentra a cinco kilómetros de la ciudad de

Zamora, vía a Yanzatza, en un suelo del Orden de los Ultisoles clasificado como Typic Kandihumults, de textura franco arenoso al tacto y con predominancia de gris muy oscuro a negro, estos suelos son muy profundos, fuertemente ácidos, con importante presencia de aluminio intercambiable y con posible predominio con granos de cuarzo visibles menores y mayores a 2 mm; masivo.

El segundo experimento se encuentra ubicado en la finca “Los Zapotes”, de propiedad del señor Héctor Ochoa, en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cóndor, en un suelo es del Orden de los Ultisoles clasificado como Rhodic Kandudults, de textura franco a franco arcilloso al tacto y con predominancia de color rojiza, estos suelos son muy profundos, fuertemente ácidos, con importante presencia de aluminio intercambiable y con posible predominio de caolinita en la fracción coloidal mineral, lo cual guarda correspondencia con la edad del material parental y el clima de la zona, a una altitud de 950 msnm, y cuyas coordenadas UTM son la siguientes (Cuadro 3).

Cuadro 3. Localización del área de estudio

Sector	Coordenadas planas (m)		Altitud (msnm)
Zamora	9 552 541 y 9 552 562 E	07 30436 y 07 30492 N	949 a 964
Panguintza	9 568110 y 9 5668160 E	0741799 y 0741868 N	970 a 993

Fuentes: Villamagua y Mora (2013)

A partir de la información que reporta el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) para el periodo de registro de 1970 a 1993 de la estación meteorológica de Zamora, situada a 970 msnm, el clima del piso bajo de la zona (850 a 1000 msnm.) presenta las siguientes características: temperatura media mensual de 22°C; mínima 20,8°C y máxima 22,6°C; precipitación media anual de 1945 mm, con un rango de 1865 a 2314 mm y la humedad relativa media mensual de 88% (Valarezo *et al.*, 2010).

3.1.1 Zona de Vida.

El paisaje corresponde a un pie de monte, el tipo de relieve es una vertiente y la forma del terreno es una ladera moderadamente escarpada, con 15% de pendiente promedio. Geológicamente se asienta en el gran Batolito de Zamora, de alrededor de 1800 km², que se presenta como un cuerpo alargado

en dirección NNE-SSW, compuesto de leuco granodioritas y granodioritas hornbléndicas, sin clastos (piedras) en la superficie ni afloramientos rocosos (Instituto Ecuatoriano de Minería, 1989).

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS.

Para la presente investigación se utilizaron los siguientes instrumentos y materiales:

- Sistema de posicionamiento global (GPS)
- Motosierra
- Cinta métrica de 50 m.
- Dinamómetros PESOLA (100 kg y 500 g)
- Machete
- Bolsas de papel para muestras
- Marcadores permanentes
- Pintura aerosol fosforescente
- Horno o estufa de laboratorio
- Reactivos (Dicromato de potasio, ácido sulfúrico y sulfato ferroso, fenol, acetato de amonio, hidroxido de sodio, cloruro de potasio, Olsen Modificado: $\text{NaHCO}_3 + \text{EDTA}$, a pH 8,5))
- Equipo para la determinación de C: Elementar Analyzer
- pHmetro
- Espectofotometro UV
- Espectofotometro de Absorción Atómica
- Formularios de campo

3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Diseño experimental, factores en estudio, niveles y tratamientos.

3.3.1 Diseño Experimental, Factores en Estudio, Niveles y Tratamientos.

Se evaluaron tres factores: dos especies arbóreas (melina y pachaco); dos niveles de la combinación de cal y fertilización (sin y con); y tres niveles de carbón vegetal (0, 3 y 6 t ha⁻¹), tal como se observa en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Factores y niveles del experimento

Factores	
Especies arbóreas (A)	a1. Pachaco, <i>Zchizolobium parahybum</i>
	a2. Melina, <i>Gmelina arbórea</i>
Carbón Vegetal (C)	c1. 0 t ha ⁻¹ carbón vegetal
	c2. 3,0 t ha ⁻¹ carbón vegetal
	c3. 6,0 t ha ⁻¹ carbón vegetal
Cal y fertilización (F)	f1. 0 t ha ⁻¹ cal + 0 kg ha ⁻¹ de nutrientes
	f2. Cal (5 t ha ⁻¹), N (200 kg ha ⁻¹), P (150 kg ha ⁻¹), K (200 kg ha ⁻¹), Mg(118 kg ha ⁻¹), S (229 kg ha ⁻¹), Zn (40 kg ha ⁻¹).

El diseño experimental consistió en un arreglo en parcelas subdivididas (2x2x3), en bloques al azar, con doce tratamientos y cuatro repeticiones (Cuadro 5).

Cuadro 5. Tratamientos del experimento

Tratamiento	Descripción	Código
T1	pachaco + sin fertilización + 0 t/Carbón Vegetal	a1f1c1
T2	pachaco + con fertilización + 0 t/Carbón Vegetal	a1f2c1
T3	pachaco + sin fertilización + 3 t/Carbón Vegetal	a1f1c2
T4	pachaco + con fertilización + 3 t/Carbón Vegetal	a1f2c2
T5	pachaco + sin fertilización + 6 t/Carbón Vegetal	a1f1c3
T6	pachaco + con fertilización + 6 t/Carbón Vegetal	a1f2c3
T7	melina + sin fertilización + 0 t/Carbón Vegetal	a2f1c1
T8	melina + con fertilización + 0 t/Carbón Vegetal	a2f2c1
T9	melina + sin fertilización + 3 t/Carbón Vegetal	a2f1c2
T10	melina + con fertilización + 3 t/Carbón Vegetal	a2f2c2
T11	melina + sin fertilización + 6 t/Carbón Vegetal	a2f1c3
T12	melina + con fertilización + 6 t/Carbón Vegetal	a2f2c3

El modelo lineal aditivo aplicado en el experimento es el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \rho_i + \alpha_j + \varepsilon_1 + \beta_k + (\alpha\beta)_{jk} + \varepsilon_2 + \gamma_l + (\alpha\gamma)_{jl} + (\beta\gamma)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{jkl} + \varepsilon_3$$

Dónde:

Y_{ijkl} = Una observación cualquiera bajo el efecto del Bloque (i); Especies arbórea (j); Nivel de fertilización (k) y Nivel de carbón vegetal (l) y sus interacciones.

μ = Media general del experimento.

ρ_i = Efecto aditivo de Bloque.

α_j = Efecto aditivo de especie arbórea.

ε_1 = Error experimental (a), para probar el efecto de las especies arbóreas.

β_k = Efecto aditivo del factor fertilizaciones.

$(\alpha\beta)_{jk}$ = Efecto de la interacción especie arbórea por fertilización.

ε_2 = Error experimental (b), para probar los efectos de fertilizaciones y la interacción fertilizaciones con especies arbóreas.

γ_l = Efecto de carbón vegetal.

$(\alpha\gamma)_{jl}$ = Efecto de la interacción entre especies arbórea con carbón vegetal.

$(\beta\gamma)_{kl}$ = Efecto de la interacción fertilización por carbón vegetal.

$(\alpha\beta\gamma)_{jkl}$ = Efecto de la interacción especies forestal con fertilización y carbón vegetal.

ε_3 = Error experimental (c) para probar el efecto del resto de factores e interacciones.

3.3.2 Especificaciones del Experimento.

La distribución de las unidades experimentales se encuentra en el Anexo 1.

- Número de repeticiones: 4
- Número de plantas por subparcela de melina: 16; total: 384
- Número de plantas por subparcela de pachaco: 16; total: 384
- Área de la parcela grande: 36 m x 24m = 864 m²
- Área de la parcela pequeña o unidad experimental 12 x 12 m: 144 m²
- Área experimental: 6912 m²

3.4 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.

Se utilizó el método empírico (experimento); y, método teórico consistente en análisis, síntesis e inducción.

3.4.1 Metodología para Evaluar el Efecto de la Aplicación de Carbón Vegetal, Cal y Nutrientes Minerales sobre las Condiciones Químicas del Suelo, la Disponibilidad de Nutrientes, en un Suelo de Granodiorita y Andesita para la Plantación de las Especies Arbóreas Maderables en la Zona Sur de la Región Amazónica Ecuatoriana.

Para realizar el monitoreo de la evolución de las condiciones químicas y de fertilidad en cada sub-subparcela y para cada capa (00-25 cm y 25 -50 cm) se tomaron ocho submuestras de suelo (dos por cada árbol de registro), éstas se mezclaran uniformemente para constituir una muestra de unidad experimental respectiva, obteniéndose un total de 48 muestras de cada capa. En estas se determino, la evolución de: las condiciones químicas, la disponibilidad de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn) almacenamiento de C.

Para determinar las cantidades disponibles de K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, (extracción con la solución de Olsen Modificada: NaHCO_3 + EDTA, a pH 8,5)(Olsen *et al.*, 1954) (Figura 4).



Figura 4. espectrofotometro de absorción atómica

El N y P se determinaron mediante espectrofotometría UV – visible (Figura 5) y todos los demás elementos por absorción atómica. La CIC con acetato de amonio 1 N pH 7,0 y generación de OH⁻ con formaldehído. Las bases cambiables por absorción atómica.

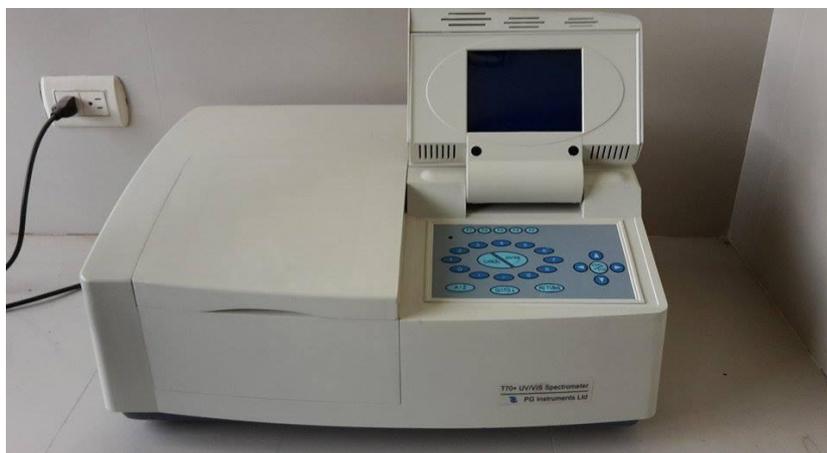


Figura 5. Espectrofotometro UV

Para la medición del pH_{H2O} se utilizó el método potenciómetro (Anexo 2), y la acidez cambiante (Al⁺³ + H⁺) mediante titulación con NaOH 0,01 N, en extractos con KCl 1 N (método de Day).

3.4.2. Metodología para el Segundo Objetivo para Evaluar el Almacenamiento de Carbono a los 44 meses después de la Plantación de los Árboles Maderables con Fertilización y Biocarbón.

3.4.2.1. Carbono en el suelo.

En las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm, en las muestras tomadas a los 44 meses después de la fertilización y plantación se determinó el contenido de CO (método de digestión húmeda de Walkley – Black). El carbono del suelo se cuantificó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Carbono del suelo (t ha}^{-1}\text{)} = \%CO \times Da \times P \times 100$$

Dónde:

CO = carbono orgánico (%); P = profundidad de muestreo (m); Da = densidad aparente (t m⁻³).

3.4.2.2. Selección de árboles.

Por cada tratamiento en cada repetición del experimento, de entre los árboles seleccionados para el raleo se tomarán dos árboles, uno con menor y otro con mayor DAP. Como se tiene doce tratamientos y cuatro repeticiones, entonces se dispondrá de ocho árboles por tratamiento y un total de 96 árboles en todo el experimento. Esto servirá para cuantificar su biomasa real y para el ajuste de las ecuaciones alométricas.



Figura 6. Selección de árboles (arbol 1 y arbol 2)

3.4.2.3. Muestreo de campo.

En cada árbol seleccionado para el muestreo destructivo se midió el DAP en pie, luego se procedió a apeaar el árbol y registrar la altura comercial o el largo útil del fuste (suma de todas las trozas obtenidas de cada árbol apeado hasta la primera ramificación) y la altura total (incluyendo el tocón). Ulteriormente se dividió el árbol en los siguientes componentes (Anexo 3).

El fuste se subdividió en fracciones generalmente en un promedio de tres trozas hasta que se curve el árbol, luego fueron medidos los diámetros menor y mayor de cada fracción con corteza.

La copa se subdividió en ramas y follaje (Figura 9) las ramas fueron pesadas. Luego, se registro el peso húmedo total del follaje, utilizando una balanza mecánica con una precisión de 0,5 kg.



Figura 7.Recolección de la muestra de biomasa

De cada árbol apeado se obtuvo, cinco muestras de madera: tres de fuste (una muestra de la base del fuste, a la mitad del fuste comercial y la primera ramificación), y una muestra de ramas al azar. También se obtuvo una muestra del follaje (15 g aproximadamente) para el análisis en laboratorio. Luego, se determinó el peso húmedo de las muestras (hojas) en una balanza digital con una precisión de 0,01 g.

3.4.2.4. Procesamiento de las muestras.

Las muestras tanto de madera como del follaje, fueron llevadas al laboratorio de Dendrocronología y Anatomía de Maderas (LABDAM) de la Universidad Nacional de Loja, para la determinación de: contenido de humedad, densidad básica de la madera y contenido de carbono, según los siguientes procedimientos:

3.4.2.5. Determinación del contenido de humedad.

Todas las muestras (de madera y follaje) fueron secadas en la estufa a una temperatura de 60°C hasta peso constante (LABDAM), luego se registro el

peso seco con una balanza de precisión. El contenido de humedad se calculo empleando la siguiente ecuación (Anexo 4):

$$CH = \left(\frac{Phm - Psm}{Psm} \right) * 100$$

donde:

CH = Contenido de humedad (%).

Phm = Peso húmedo de las muestras (g).

Psm = Peso seco de las muestras (g).

3.4.2.6. Determinación de la densidad básica.

Para la determinación de la densidad básica se utilizarón probetas de sección cuadrada de 50 mm por lado y 100 mm de longitud. Las probetas fuerón medidas con un calibrador (Norma Ecuatoriana INEN 1-164). Se seleccionaron como mínimo 5 árboles, con 10 probetas por tratamiento. Para la Gmelina arborea se dispuso de cinco probetas por árbol (tres del fuste y dos de las ramas). A efectos de tener seguridad de que no exista perdida de humedad en el material a ensayar, desde el momento de apeo y llegada al laboratorio, todo el material antes de determinar el volumen se sumergio en agua hasta saturación. Luego fuerón secados en el horno hasta peso constante, a una temperatura de 103°C. Posteriormente se registro el peso seco de las muestras.

La densidad básica de la madera se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$Db' = \frac{Psh}{Vv}$$

donde

:

Db = Densidad básica de la madera (g/cm³).

Psh = Peso de la madera seca al horno (g).

Vv = Volumen de la madera en estado verde (cm³).

3.4.2.7. Cálculo de la biomasa aérea.

La biomasa total (fuste, ramas y follaje) se calculo aplicando la siguiente ecuación:

$$BT = BF + BR + BH$$

Dónde:

BT = Biomasa total (kg).

BF = Biomasa del fuste (kg).

BR = Biomasa de ramas (kg).

BH = Biomasa de hojas (kg).

La biomasa del fuste se determino a través de la siguiente ecuación:

$$BF = VF * DB$$

Dónde:

BF = Biomasa de fuste (kg).

VF = Volumen de fuste (m³).

DB = Densidad básica de la madera (kg/m³).

El volumen del fuste se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$VF = (A1 + A2)/2 * L$$

Dónde:

VF = volumen de fuste

A1= área mayor (m²)

A2 = área menor (m²)

L = longitud (m)

La biomasa de la copa se subdividió en ramas y hojas. El volumen de las ramas con formas regulares se calculo con el método de cubicación de Smalian; y, para las ramas irregulares se aplico el principio de Arquímedes o desplazamiento de agua.

Según Schlegel *et al.* (2002) la ecuación para determinar la biomasa de las hojas es:

$$BH = \frac{Phth}{1 + \frac{CH}{100}}$$

donde:

BH = Biomasa de la hojas (g).

$Phth$ = Peso húmedo total de las hojas (g).

CH = Contenido de humedad de las hojas (%).

Los valores de biomasa en gramos se dividirán entre 1000000 para obtener en toneladas.

3.4.2.8. Determinar el carbono orgánico de la biomasa aérea de *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*.

El carbono presente en la biomasa de los árboles se determinó mediante el procedimiento descrito por (Chapman y Pratt 1973 ; Ruiz, 200). En el laboratorio de Química de la UNL, utilizando el método de pirolisis con el Elementar Analyzer; sin embargo, se hicieron comprobaciones con el método de combustión húmeda descrita por Walkley-Black. El principio de este método consiste en la oxidación del carbono orgánico por medio del ácido crómico caliente. A la muestra se le da una cantidad de calor en un baño con ácido crómico. El ácido crómico no utilizado en la oxidación del carbono orgánico se determina mediante titulación con sulfato ferroso amoniacal (Anexo 5).

3.4.3. Técnicas de Procesamiento y Análisis de los Datos.

Utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008) se realizó el análisis de la variancia (ADEVA) la evolución de las condiciones químicas, fertilidad, disponibilidad de nutrientes y la cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo. También se realizó la prueba de Tukey para las variables estadísticamente significativas. El esquema del análisis de varianza se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Análisis de varianza para el diseño de parcelas subdivididas.

Fuentes de variación		Grados de libertad	
<u>Parcela Grande:</u>			
<u>Factor A: especies arbóreas</u>	$(a-1)$	$(2-1)$	1
<u>Repeticiones</u>	$r-1$	$(4-1)$	3
<u>Error A</u>	$(a-1)(r-1)$	$(2-1)(4-1)$	3
<u>Subparcelas</u>			
<u>Factor B: cal + fertilización</u>	$(b-1)$	$(2-1)$	1
<u>Interacción A*B</u>	$(a-1)(b-1)$	$(2-1)(2-1)$	1
<u>Error B</u>	$a(r-1)(b-1)$	$2(4-1)(2-1)$	6
<u>Sub-subparcelas</u>			
<u>Factor C: carbón vegetal</u>	$c-1$	$(3-1)$	2
<u>A*C</u>	$(a-1)(c-1)$	$(2-1)(3-1)$	2
<u>B*C</u>	$(b-1)(c-1)$	$(2-1)(3-1)$	2
<u>A*B*C</u>	$(a-1)(b-1)(c-1)$	$(2-1)(2-1)(3-1)$	2
<u>Error C</u>	$(a-1)(r-1)$	$2 \times 2(4-1)(3-1)$	24
<u>Total</u>	$abcr-1$		47

3.4.4. Metodología para el Tercer Objetivo para la Difusión y Transferencia de Resultados.

Para cumplir con este objetivo, se realizó la exposición de los resultados obtenidos con el presente trabajo investigativo, el mismo que consto de tres partes: Una parte introductoria a cargo del Director de la Tesis, una parte central disertada por los responsables de la tesis con la ayuda de papelográficos y fotografías, se realizó un foro con la participación de los asistentes acerca del trabajo realizado, y para la finalización del mismo se agradeció la presencia de los asistentes. Se invitó al evento al Director y Asesores del Proyecto, Técnicos del MAGAP y agricultores de la zona de estudio. Con la finalidad de difundir y publicar este tipo de investigaciones. Se redactó un artículo científico y documento divulgativo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

RESULTADOS PARA EL SUELO TYPIC KANDIHUMULTS.

4.1. EVOLUCIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS DEL SUELO HASTA 50 CM DE PROFUNDIDAD.

Para los factores especies arbóreas y dosis de carbón vegetal e interacciones, no se encontraron diferencias estadísticas significativas para los resultados de la evolución de la disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, en los diferentes tratamientos del experimento, excepto para el factor fertilización, como se describe a continuación.

4.1.1. Reacción del Suelo.

Cuadro 7. Promedios y prueba de Tukey al 5% para pH_{H_2O} en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización, La Victoria, Zamora; Noviembre 2013.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	4,55 a	4,58 a
	44	4.98 b	5.17 a
25 - 50 cm	44	4,86 a	4,93 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Se observaron diferencias estadísticas significativas a los 44 meses después de la plantación en la capa 00 - 25 cm, mientras que en la capa 25 - 50 cm los no se observaron diferencias estadísticas. Los valores registrados al inicio de la plantación no manifestaron significancia estadística. El coeficiente de variación (CV) osciló entre 3,1% y 4.6%, lo cual indica homogeneidad del suelo para esta variable (Anexo 6).

En la capa de 00-25 cm a los 44 meses de evaluación en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente el pH_{H_2O} en comparación con los tratamientos sin fertilización (Cuadro 7). En la capa de 25-50 cm no se incrementó significativamente el pH_{H_2O} , pero si hubo un ligero incremento en comparación con los tratamientos sin fertilización. Al inicio del

experimento los valores de pH_{H_2O} fueron iguales manteniéndose en el rango de muy fuertemente ácido alcanzando en el mes 44 un rango de fuertemente ácido, por lo tanto se puede indicar que el incremento se debe a la aplicación de cal (5 t ha^{-1} de cal) conjuntamente con la fertilización.

4.1.2. Acidez Intercambiable.

Cuadro 8. Promedios y prueba de Tukey al 5% para acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) cmol (+) kg^{-1} , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	3,4 a	3,2 a
	44	2.15b	1.32a
25 - 50 cm	44	2,54 a	2,42 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Para el factor fertilización en la capa de 00 – 25 cm se registraron diferencias estadísticas altamente significativas para acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) a los 44 meses después de la plantación y no se observaron diferencias estadísticas al inicio en la capa de 00-25 cm y a los 44 meses en la capa de 25-50 cm (Anexo 7).

En la capa 00-25 cm y en la fecha de evaluación en los tratamientos con fertilización (que recibieron 5 t ha^{-1} de cal) disminuyó significativamente la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) en comparación con los tratamientos sin fertilización. En la capa de 25-50 cm no hubo significancia estadística (Cuadro 8). Al inicio del experimento la acidez intercambiable fueron iguales manteniéndose en el rango de 3,2 - 3,4 cmol (+) kg^{-1} , por lo tanto se puede indicar, que la acidez intercambiable disminuyó en los tratamientos con fertilización, por el efecto neutralizante de la cal.

4.2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO, BASES CAMBIABLES Y SATURACIÓN DE BASES.

4.2.1. Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICe).

Cuadro 9. Promedios y prueba de Tukey al 5% para CICe cmol (+) kg⁻¹, en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	4,97 a	4,80 a
	44	4,63a	4,91 a
25 - 50 cm	44	3,79 b	4,15 a

Para el factor fertilización se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para la CICe a los 44 meses en la capa de 25-50 cm. Los valores del CV oscilaron entre 10% 21,20%, siendo mayores a 20% aquellos correspondientes a la capa 00 – 25 cm a los 44 meses, lo que indica heterogeneidad para esta variable (Anexo 8).

La CICe, en los tratamientos con fertilización, aumentó significativamente en comparación con los tratamientos sin fertilización en la capa de 25-50 cm, a los 44 meses; mientras que a los 44 meses en la capa de 00 – 25 cm no se detectaron diferencias estadísticas significativa. (Cuadro 9).

Al inicio del experimento la CICe se encontró en el rango de 4,8 cmol (+) kg⁻¹ a 4,97 cmol (+) kg⁻¹, equivalente a bajo. El incremento en los tratamientos con fertilización, sugieren que, por un lado, predominan en el suelo arcillas de baja actividad (principalmente caolinita); y, por otro, que el aumento del pH por efecto del encalado ha incrementado las cargas eléctricas negativas dependientes del pH. La disminución de los 44 meses del CICe se debe a la absorción de los nutrientes por las especies maderables y a la lixiviación por el exceso de las precipitaciones.

4.2.2. Bases Cambiables.

4.2.2.1. Calcio intercambiable (Ca^{++}).

Cuadro 10. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca^{++} cmol (+) kg^{-1} , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,85 a	0,76 a
	44	1,66 b	2,57 a
25 – 50	44	0,86 a	1,10 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

Para el factor fertilización, en la capa de 00-25 cm se observó diferencias estadísticas altamente significativas para Ca^{++} a los 44 meses, y no significativas en la capa 25 - 50 cm. Los valores del CV fueron altos 39,2% y 64,2%; excepto al inicio en la capa de 00 - 25 cm, cuyo valor fue de 22%, lo que indica heterogeneidad del experimento para esta variable (Anexo 9).

En los tratamientos con fertilización, se incrementó significativamente el Ca^{++} respecto a los tratamientos sin fertilización, en la capas de 00-25 cm a los 44 meses de evaluación, mientras que en la capa de 25-50 cm no se encontraron diferencias estadísticas (Cuadro 10). Al inicio el Ca^{++} se encontró en el rango de muy bajo 0,76 cmol (+) kg^{-1} a 0,85 cmol (+) kg^{-1} . En la capa 00 - 25 cm en los tratamientos con fertilización se incrementó el Ca^{++} a rango medio del bajo a los 44 meses por la aplicación de cal ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ CaCO}_3$). En cambio, en la capa de 25 – 50 cm aunque se evidenció un incremento del contenido del Ca, que se atribuye a cierta lixiviación del elemento desde la capa superior por efecto del encalado, este permaneció en el rango muy bajo.

4.2.2.2. Magnesio intercambiable (Mg^{++})

Cuadro 11. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg^{++} (cmol (+) kg^{-1}), en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,28	0,32
	44	0,85 a	0,88 a
25 - 50	44	0,62 a	0,66 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Para el factor fertilización en las dos capas (00 – 25 cm y 25 - 50 cm), no se observaron diferencias estadísticas para el Mg^{++} .

Los valores del CV fueron altos 32,45% y 24% lo que indica heterogeneidad del experimento para esta variable (Anexo 10).

En los tratamientos con fertilización, no se incrementó significativamente el Mg^{++} en relación con los tratamientos sin fertilización para las dos capas a los 44 meses (Cuadro 11). Al inicio el Mg^{++} se encontró en el rango de muy bajo 0,28 cmol (+) kg^{-1} a 0,32 cmol (+) kg^{-1} . En la capa 00 – 25 cm se incrementó el contenido de Mg^{++} en los tratamientos con fertilización a rango bajo; aunque a los 44 no se detectó significancia este se mantuvo dentro del rango bajo, esto se debió a la aplicación de 118 $kg\ ha^{-1}$ de Mg. En la capa 25 - 50 cm incrementó el Mg^{++} en menor grado, superando el límite inferior de bajo, esto indica que el Mg^{++} aplicado en la capa superior se ha movilizó.

4.2.2.3. Potasio intercambiable (K^{+}).

Cuadro 12. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K cmol (+) kg^{-1} , en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 – 25	0	0,18 a	0,19 a
	44	0,27 a	0,24 a
25 – 50	44	0,11 b	0,21 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Para el factor fertilización, en la capa de 00-25 cm no se evidenció diferencias estadísticas significativas para el K^+ a los 44 meses. En la capa de 25 - 50 cm es altamente significativa a los 44 meses. Los valores del CV fueron altos 83% – 114.12%; excepto al inicio en la capa de 00 - 25 cm, cuyo valor fue de 22%, lo que indica heterogeneidad del experimento para esta variable (Anexo 11).

El contenido de K^+ en la capa de 25 – 50 cm a los 44 meses de evaluación, en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente frente a los tratamientos sin fertilización (Cuadro 12).

El K^+ al inicio permaneció en el rango bajo ($0,18 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ a $0,19 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$). En la capa 00 – 25 cm se incrementó, aunque permaneció en el mismo rango bajo, se debió a la aplicación de K^+ (200 kg ha^{-1}). En la capa 25 - 50 cm se incrementó los valores de K^+ , aunque en menor grado que en la capa superior, lo que indica que una fracción del K^+ aplicado en la capa superior se ha movilizó a la capa 25 - 50 cm.

4.2.2.4. Sodio intercambiable (Na^+)

Los valores del sodio cambiante (Na^+) en las dos capas (00 - 25 cm y 25 - 50 cm), y en las cuatro fechas de evaluación, no presentaron significancia estadística. El CV osciló entre 11,31% a 12,74% lo cual indica una heterogeneidad del experimento para esta variable (Anexo 12).

Los valores de Na^+ en los tratamientos sin y con fertilización, al inicio, 18 y los 44 meses después de la plantación, en las capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, se ubicaron en el rango bajo $0,55 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ a $0,57 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$, el cual se ubica en el rango medio, debido a que no se aplicó este elemento.

4.2.2.5. Saturación de bases (%).

Cuadro 13. Promedios y prueba de Tukey al 5% para % SB, en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	32,3 a	33,3 a
	44	61, 25 b	74,98 a
25 - 50	44	44,44b	59,48 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p <= 0,05$)

Para el factor fertilización en las dos capas (00 - 25 cm y 25 - 50 cm) se observó diferencias estadísticas altamente significativas en la saturación de bases (%). Los valores del CV oscilaron entre 10,34% a 15,33 % (Anexo 13).

El % SB, para las dos capas y fechas de evaluación, en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente, en relación a los tratamientos sin fertilización (Cuadro 13). Los valores del %SB en la capa 00 - 25 cm, al inicio se encontraron en el rango bajo, en el mes 44 aumenta al rango de alto en los tratamientos sin fertilización; por el contrario, para los tratamientos con fertilización, se mantiene dentro del mismo rango alto con un incremento, esto como resultado de la aplicación de Ca, Mg, K y Zn. En la capa 25 - 50 cm, en los tratamientos con fertilización, %SB manifestó un ligero, pero estadísticamente significativo incremento, que se mantuvo en el rango medio.

4.3. DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES.

4.3.1. Nitrógeno Disponible.

Para este elemento no se detectaron diferencias estadísticas significativas a los 44 meses en las dos capas (0-25 cm y 25-50 cm) (Anexo 14). Los valores de los CV fluctuaron en el rango de 40,6% a 60,1% lo que indica heterogeneidad del experimento para esta variable. Con fertilización el nitrógeno disponible fue de $9,6 \text{ mg kg}^{-1}$, mientras que sin fertilización fue de $7,9 \text{ mg kg}^{-1}$.

El contenido de N disponible en las capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, a los 44 meses, en los tratamientos sin y con fertilización, se mantuvo en el rango

bajo ($< 20 \text{ mg kg}^{-1}$), aunque siempre fueron menores en la capa 25 - 50 cm. Esta situación, en el caso de los tratamientos fertilizados se atribuye por una parte a una importante toma del elemento por las especies arbóreas, lo cual se refleja en el mayor desarrollo de la biomasa en general y a las pérdidas tanto por lixiviación como por volatilización.

4.3.2. Fósforo Disponible.

Cuadro 14. Promedios y prueba de Tukey al 5% para P mg kg^{-1} en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	7 a	6 a
	44	1,69 a	10,48 a
25 - 50	44	1,72 b	7,41 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En este elemento se observaron diferencias estadísticas significativas únicamente en la capa de 25-50 (Anexo 15). Los valores del CV oscilaron entre 251,5% a 189,90 %, encontrándose los mayores en la capa 00–25 cm, lo que evidencia heterogeneidad del suelo para este elemento en esta capa.

El P disponible (mg kg^{-1}) en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente en comparación con los tratamientos sin fertilización en las dos capas; aunque no se presentaron diferencias significativas en la capa 00 – 25 cm se puede notar un incremento frente a los tratamientos sin fertilización (Cuadro 14). El P disponible en la capa 00 - 25 cm, desde el inicio, hasta los 44 meses, en los tratamientos sin fertilización se ubicó en el rango bajo ($< 7 \text{ mg kg}^{-1}$); en tanto que, en los tratamientos con fertilización se alcanzó un rango medio ($10,48 \text{ mg kg}^{-1}$); por la aplicación de 150 kg ha^{-1} de P. En cambio, en la capa de 25 – 50 cm aunque se evidenció un incremento del contenido del P que se atribuye a cierta movilización del elemento desde la capa superior, este permaneció en el rango bajo en las cuatro fechas de evaluación. La permanencia del P disponible en el nivel medio estaría asociada a la neutralización del Al^{3+} por efecto del encalado.

4.3.3. Potasio Disponible.

Cuadro 15. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K mg kg⁻¹ en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	85 a	72 a
	44	52 a	35 a
25 - 50	44	29 b	47 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p <= 0,05$)

Para este elemento no se observaron diferencias estadísticas significativas para el factor fertilización a los 44 meses en la capa 00 - 25 cm, pero si se presentaron diferencias altamente significativas para la capa 25 - 50 cm a los 44 meses (Anexo 16). Los valores del CV oscilaron en el rango de 45,9% a 74,11%, siendo mayores en la capa de 25 – 50 cm.

La no presencia de diferencia estadística significativa del K disponible aunque se aportó K (200 kg ha⁻¹), en la capa de 00 – 25 cm se atribuye a una gran parte por la absorción de las especies cultivadas y a la lixiviación del mismo. Y los 44 meses la diferencia estadística es altamente significativa en la capa de 25-50 cm, lo cual correspondió a la movilización de este elemento desde la capa superior (Cuadro 15). En los tratamientos sin y con fertilización, los contenidos de K disponible en la capa 00 - 25 cm, al inicio se ubica en el rango medio, y 44 meses en ambos casos descendieron al rango bajo, lo cual se atribuye a la absorción de este nutriente por las especies arbóreas.

El incremento de los contenidos de K+ disponible en la capa 25 - 50 cm, a los 44 meses, aunque dentro del mismo rango bajo, sugiere que una parte del elemento aplicado en la capa 00 - 25 cm se ha movilizado hacia abajo. Esto concuerda con (Padilla, 2009), quien indica que el movimiento del potasio depende del tipo de suelo, puede lixiviarse en suelos arenosos y en suelos con muy baja capacidad de intercambio catiónico.

4.3.4. Calcio Disponible.

Cuadro 16. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca disponible (mg kg^{-1}), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	95 a	99 a
	44	141,31 b	340,88 a
25 - 50	44	48,63 b	79.70 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En la variable Ca disponible se observaron diferencias estadísticas altamente significativas por efecto de la fertilización a los 44 meses para las dos capas (00 – 25 y 25 - 50 cm) (Anexo 17). Los valores del CV fluctuaron de 34,3% a 46,8%, lo cual indica heterogeneidad del suelo para este elemento.

En los tratamientos con fertilización, el contenido de Ca disponible (mg kg^{-1}) se incrementó significativamente en relación a los tratamientos sin fertilización en las dos capas (Cuadro 16). Al inicio los valores se encontraron en el rango de 95 mg kg^{-1} a 99 mg kg^{-1} . El aumento del contenido de Ca disponible en la capa 00 - 25 cm, en los tratamientos con fertilización, se debió a la aplicación de la cal agrícola (5 t ha^{-1}); mientras que en la capa 25 - 50 cm, correspondió a la movilización de este elemento desde la capa superior.

4.3.5. Magnesio Disponible.

Cuadro 17. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg disponible (mg kg^{-1}), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	24 a	25 a
	44	63,98 a	70,90 a
25 - 50	44	63,77 a	67,15 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En la variable Mg disponible no se observaron diferencias estadísticas significativas para el factor fertilización a los 44 meses en las dos capas (0 -25 cm y 25 - 50 cm) (Anexo 18). Los valores del CV oscilaron en el rango de 28,7% a 32,1% indistintamente en ambas capas.

En las dos capas, a los 44 meses de evaluación, en los tratamientos con fertilización, el contenido de Mg disponible, aumentó en relación a los tratamientos sin fertilización aunque no existen diferencias estadísticas (Cuadro 17). Al inicio, los contenidos de Mg se encontraron en el rango bajo (<100 mg kg⁻¹). En la capa de 00 - 25 cm en los tratamientos con fertilización se mantuvieron dentro del mismo rango bajo, se atribuye a la absorción por las especies cultivadas y la lixiviación. En tanto que en la capa de 25 - 50 cm, se mantiene dentro del rango bajo debido a que en el caso de los tratamientos fertilizados se atribuye por una parte a la absorción importante del elemento por las especies arbóreas.

4.3.6. Zinc Disponible.

Cuadro 18. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Zn disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,6 a	0,6 a
	44	2,38 b	4,10 a
25 - 50	44	1,76 a	1,97 a

5. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p <= 0,05)

El Zn disponible se presentó estadísticamente significativo a los 44 meses para el factor fertilización en la capa de 00-25 cm. En la capa de 25 - 50 cm no se presentaron diferencias significativas. Los valores del CV oscilaron en el rango de 54,4% a 126%, con los valores mayores indistintamente en las dos capas (Anexo 19).

El contenido de Zn, en los tratamientos con fertilización aumentó significativamente con respecto a los tratamientos sin fertilización, en la capa de 00 – 25 cm; excepto en la capa de 25-50 a los 44 meses (Cuadro 18). Al inicio del experimento permaneció en el rango bajo (< 2 mg kg⁻¹). En la capa 00 – 25 cm en los tratamientos con fertilización a los 44 meses se incrementó al rango medio (2-7 mg kg⁻¹), lo cual se atribuye a la aplicación de este elemento (40 kg ha⁻¹). Además existió también un incremento del Zn disponible en la capa 25 - 50 cm en los tratamientos con fertilización, debió a la movilización de este elemento desde la capa superior.

4.3.7. Cobre Disponible.

No se detectaron diferencias estadísticas para ningún factor en estudio. Los valores del CV oscilaron en el rango 27,12 % a 20,20%, lo cual evidencia alta heterogeneidad del suelo para esta variable (Anexo 20).

Los contenidos de Cu disponible en las dos capas se mantuvieron en el rango medio para todos los tratamientos ($<4\text{mg kg}^{-1}$). Por cuanto no se incluyó al Cu en la fertilización.

4.3.8. Hierro Disponible.

Cuadro 19. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Fe disponible (mg kg^{-1}), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	380 a	365 a
	44	203,29 b	149,14 a
25 - 50	44	140,97 a	124,28 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el hierro en el factor fertilización a 44 meses en la capa 00 - 25 cm (Anexo 21). El CV osciló en el rango de 33.1% a 55,9%, con los valores mayores indistintamente en las dos capas, lo cual indica alta heterogeneidad del suelo para este elemento.

El Fe disponible, en los tratamientos con fertilización, disminuyó significativamente, en comparación a los tratamientos sin fertilización, en la capa de 00 – 25 cm (Cuadro 19). Al inicio del experimento se encontró en el rango de alto. A pesar de existir disminución de los contenidos de Fe disponible en la capa 00 – 25 cm para los tratamientos con fertilización, se mantuvo en el rango de alto ($>40\text{ mg kg}^{-1}$), lo cual se explica por una acumulación residual de este elemento en los suelos del trópico húmedo (Valarezo, 2004a).

4.3.9. Manganeso Disponible.

Cuadro 20. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mn disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. La Victoria, Zamora, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	31 a	35 a
	44	19 a	18,52 a
25 - 50	44	5,28 a	5,26a

5. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

No se detectaron diferencias estadísticas para ningún factor en estudio en las dos capas (00 – 25 y 25 – 50 cm) (Anexo 22). Los valores del CV oscilaron en el rango de 28,7% a 32,07%, con los valores mayores en la capa 00- 25 cm.

En la capa de 00 – 25 cm y 44 meses de evaluación, en los tratamientos con fertilización el contenido de Mn disponible, disminuyó aunque no se presentaron diferencias significativas en comparación con los tratamientos sin fertilización (Cuadro 20). En la fase inicial del ensayo el contenido fue alto (31 mg kg⁻¹ a 35 mg kg⁻¹). En forma similar al Fe, el Mn disponible, para los tratamientos con fertilización, se mantuvieron en el rango de alto (>15 mg kg⁻¹), lo cual también se explica por los procesos de acumulación residual de este elemento en los suelos del trópico húmedo.

Finalmente, la reducción del contenido de N, K, Cu, Fe y Mn disponible con el tiempo se atribuye a la absorción de este elemento por las especies maderables en estudio.

4.4. CAPTURA DE CARBONO POR LAS ESPECIES ARBÓREAS MADERABLES Y APORTE AL SUELO.

4.4.1. Biomasa y Contenido de Carbono en las Especies Arbóreas.

Para el peso seco de la biomasa aérea como del carbono almacenado en ésta se observaron diferencias altamente significativas únicamente para el

factor fertilización (N + P + K + S + Mg + Zn + cal agrícola); más no para los factores especies arbóreas (melina y pachaco), dosis de carbón vegetal (0 t ha⁻¹, 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹) e interacciones. El CV fue de 40,6% y 44,5% para la biomasa y el carbono, respectivamente (Anexo 23).

Para los tratamientos sin y con fertilización, los valores de la masa seca de la biomasa aérea fueron de 26,9t ha⁻¹ y 36,6 t ha⁻¹, respectivamente; mientras que el peso de C almacenado en la biomasa fue de 12,5t ha⁻¹ y 20,6t ha⁻¹, en su orden. De ello resulta que el peso de la biomasa y concomitadamente de C almacenado en la parte aérea de los árboles con fertilización fue en proporción 1,7:1 en comparación a sin fertilización.

4.4.2. Carbono en el Suelo.

Para el peso del C a los 44 meses en la capa 00 - 25 cm y 25-50 cm no se detectaron diferencias estadística significativas para ningún factor en estudio. Los valores del CV oscilaron entre 10,4% y 17,2% (Anexo 23). La ausencia de diferencia estadística significativa sugiere que el suelo inicialmente tuvo una importante cantidad de este elemento, lo cual no se modificó con la aplicación de las dosis de 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal, ni con la aplicación de 5 t ha⁻¹ de carbonato de calcio que se adicionó en la fertilización para disminuir la acidez. Al respecto, Campbell *et al.*, (2005) señalan que los cambios anuales del contenido de C son muy pequeños en relación a aquel existente; y, que, su variabilidad espacial puede ser muy grande.

Sin embargo se debe mencionar que la mayor cantidad de biomasa que se incorporó al suelo por efecto de la fertilización, tanto por la poda de la melina, la auto poda del pachaco y la vegetación herbácea asociada a los árboles, la misma que ha sido cortada recurrentemente y dejada sobre el suelo en cada sub-sub parcela ha influido en el incremento del C en el suelo.

4.4.3. Almacenamiento de C en la Biomasa y en el Suelo.

Para el peso de C en la biomasa y en las dos capas de suelo (00 - 25 cm y 25 - 50 cm), no se observaron diferencias estadísticas para ningún factor en estudio. El CV fue del 9,3%, considerado como aceptable (Anexo 23).

En los tratamientos con fertilización el valor promedio de C en el sistema (C hasta 50 cm en el suelo + C biomasa aérea) fue de 204,7t ha⁻¹, correspondiendo el 89.9% al C en el suelo hasta 50 cm de profundidad y el 10.1% al C de la biomasa aérea. En los tratamientos sin fertilización el promedio del C total en el sistema fue de 193,4t ha⁻¹, con el 93,6% y 6,4% en el suelo y biomasa, respectivamente. El incremento del C total en el sistema por efecto de la fertilización fue de 11,3t ha⁻¹.

El incremento de la biomasa aérea de 9,7t ha⁻¹ y del C almacenado en ésta fue de 8,14 t ha⁻¹, se atribuyen al efecto combinado de los nutrientes aplicados (N + P + K + Ca + S + Mg +Zn) y del carbonato de calcio, que neutraliza el aluminio soluble del suelo y, de esta forma, facilita la absorción de los nutrientes, especialmente el fósforo, que como es sabido es precipitado por la acción del aluminio.

La diferencia altamente significativa para el total del C almacenado en la biomasa y en el suelo, hasta una profundidad de 50 cm para el factor fertilización, nuevamente enfatiza el efecto de la aplicación de los nutrientes deficientes y de la disminución de la acidez sobre el desarrollo de la biomasa aérea. En todo caso, el gran reservorio de C en el sistema (rango de 89,9% a 93,6%) constituye el suelo, lo cual coincide con la afirmación de Anikwe (2010), quien indica que el suelo es el gran reservorio activo del C orgánico que contiene alrededor del doble del C de la atmósfera.

RESULTADOS PARA EL SUELO RHODIC KANDIUDULTS.

4.5. EVOLUCIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS DEL SUELO.

Para los factores especies arbóreas y dosis de carbón vegetal e interacciones, no se encontraron diferencias estadísticas significativas para los resultados de la evolución de la disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, en los diferentes tratamientos del experimento, excepto para el factor fertilización, como se describe a continuación.

4.5.1. Reacción del Suelo.

Cuadro 21. Promedios y prueba de Tukey al 5% para pH_{H_2O} en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	4,5a	4,9b
	44	4,89 a	5,03 a
25 - 50 cm	44	4,86 a	4,91 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En las capas de 00 -25 cm y 25 - 50 cm, a los 44 meses después de la plantación, en los tratamientos con fertilización el pH_{H_2O} se incrementó en comparación con aquellos sin fertilización (Cuadro 24). El análisis de varianza para los valores de pH_{H_2O} no evidenció diferencia estadísticas significativas para el mes 44. El CV osciló entre 7,69 % y 7,69 %, respectivamente (Anexo 24).

No obstante que la reacción del suelo se mantiene en el rango de muy ácida en las dos capas, se puede indicar que el ligero incremento se debe a la aplicación de cal (3 t ha^{-1}) conjuntamente con la fertilización. Cabe señalar que lo ideal hubiera sido alcanzar un valor de pH de 5,5 para neutralizar el Al soluble, lo cual no se logró con la dosis de cal empleada, la misma que se calculó en base a la fórmula de Sys (1979) para los suelos del trópico húmedo, por lo que debería ser revisada para el caso de los suelos de la zona sur de la Amazonía Ecuatoriana. Una situación similar reporta Villamagua (2014) en el experimento paralelo de Zamora, dado que con la aplicación de 5 t ha^{-1} en la

capa de 00 -25 cm, únicamente alcanzó el valor de pH de 5,2 a los 18 meses después de la plantación.

También es pertinente mencionar que las dosis de 3 y 6 tha^{-1} de carbón vegetal no incidieron significativamente para el pH del suelo, lo cual contrasta con la afirmación de (Cochrane, T., Sanchez, P. 1980 y Mgagwu, J., Piccolo. 1997) quienes manifiestan que la aplicación de carbón vegetal incrementa el pH y disminuye la saturación de Al^{3+} , factores que a menudo constituyen las principales limitaciones de la productividad de los cultivos en los suelos altamente meteorizados de los trópicos húmedos.

4.5.2. Acidez Intercambiable.

Cuadro 22. Promedios y prueba de Tukey al 5% para acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) cmol (+) kg^{-1} , en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	2,20 a	2,91 a
	44	1,78 a	1,77 a
25 - 50 cm	44	3,66 a	3,27 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

Para el factor fertilización en las dos capas (00 – 25 cm y 25 - 50 cm) no se registraron diferencias estadísticas significativas para acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) al inicio y a los 44 meses después de la plantación (Anexo 25).

En las dos capas y en la fecha de evaluación en los tratamientos con fertilización (que recibieron 5 tha^{-1} de cal) disminuyó la acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) en comparación con los tratamientos sin fertilización (Cuadro 22). Al inicio del experimento la acidez intercambiable fueron iguales manteniéndose en el rango medio, por lo tanto se puede indicar, que la acidez intercambiable disminuyó en los tratamientos con fertilización, por el efecto neutralizante de la cal.

4.6. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO, BASES CAMBIABLES Y SATURACIÓN DE BASES.

4.6.1. Capacidad de Intercambio Cationico Efectiva (CICE).

Cuadro 23. Promedios y prueba de Tukey al 5% para CICE cmol (+) kg⁻¹, en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	8,26 a	7,82 a
	44	8,17 a	8,75 a
25 - 50 cm	44	5,82 a	7,00 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

No se encontraron diferencia estadística significativa para ningún factor en estudio. Los valores del CV varía entre 9,96% y 29,45 % (Anexo 26).

La CICE, en los tratamientos con fertilización, aumentó en comparación con los tratamientos sin fertilización en las dos capas y a los 44 meses de evaluación (Cuadro 23). Al inicio del experimento la CICE se encontró en el rango de 8,26 cmol (+) kg⁻¹ a 7,82 cmol (+) kg⁻¹, equivalente a medio. El incremento en los tratamientos con fertilización, sugieren que, por un lado, predominan en el suelo arcillas de baja actividad (principalmente caolinita); y, por otro, que el aumento del pH por efecto del encalado ha incrementado las cargas eléctricas negativas dependientes del pH.

4.6.2. Bases Cambiables.

4.6.2.1. Calcio intercambiable (Ca²⁺).

Cuadro 24. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca²⁺cmol (+) kg⁻¹, en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	3,54 a	2,83 a
	44	2,92 a	3,79 a
25 - 50	44	1,52 a	2,34 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

El análisis de la varianza para los valores de Ca^{2+} (Anexo 27) no evidenció diferencias estadísticas significativas a los 44 meses después de la plantación en ambas capas (00 – 25 y 25 – 50 cm) para el factor fertilización (cuadro 24). Los valores del CV variaron entre 31,35% y 38, 33 % lo que indica que no hubo uniformidad para esta variable.

En las dos capas, a los 44 meses el Ca^{2+} aunque no se presentaron diferencias estadísticas, se incrementó en los tratamientos con fertilización en relación a aquellos sin fertilización. En la capa de 00 -25 cm el ligero incremento aunque manteniéndose dentro del mismo rango bajo se atribuye a la aplicación de 3 t ha^{-1} de CaCO_3 ; mientras que, en la capa de 25-50 cm, el ligero incremento (muy bajo a bajo) sugiere que este elemento se movilizó desde la capa superior, aunque los valores permanecen en el rango bajo.

4.6.2.2. Magnesio intercambiable (Mg^{++}).

Cuadro 25. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg^{2+} (cmol (+) kg^{-1}), en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	2,09 a	1,81 a
	44	2,25 a	2,54 a
25 - 50	44	1,22 b	1,84 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En la capa de 00-25 cm, a los 44 meses, no se encontraron diferencias estadísticas para ningún factor ($p < 0,05$). Únicamente existe diferencia estadística altamente significativa para el factor fertilización en la capa de 25-50cm. Los CV oscilan entre 10,36% 52,16 %, (Anexo 28) lo que indica que no hubo homogeneidad para esta variable.

En los tratamientos con fertilización en la capa de 25 - 50 cm a los 44 meses, se incrementaron significativamente los valores del Mg^{2+} respecto a aquellos sin fertilización del rango bajo al medio respectivamente (Cuadro 25). En la capa de 00– 25 cm el Mg^{2+} se incrementó al rango medio lo cual se

atribuye a la aplicación de 118 kg ha⁻¹ del elemento. Se asume que para la capa de 25-50 el incremento se debió a la movilización del elemento desde la capa superior.

4.6.2.3. Potasio intercambiable (K⁺).

Cuadro 26. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K+cmol (+) kg⁻¹, en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,33 a	0,30 a
	44	0,36 a	0,78 a
25 - 50	44	0,16 b	0,43 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

No se encontraron diferencias estadísticas significativas para el factor fertilización en la capa de 00-25 cm, y altamente significativas a los 44 meses en la capa de 25-50 cm. Los valores del CV están en el rango de 109,57% y 126,97% (Anexo 29).

En las capas 25 - 50 cm y a los 44 meses el K⁺ se incrementó significativamente en los tratamientos con fertilización frente a aquellos sin fertilización. El incremento del K⁺ del rango bajo al medio (Cuadro 26) se atribuye a la aplicación de 200 kg ha⁻¹ del elemento con la fertilización. Lo que se asume que el incremento se debió a la movilización del K desde la capa superior.

4.6.2.4. Saturación de bases (%).

Cuadro 27. Promedios y prueba de Tukey al 5% para el porcentaje de SB, en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	70,62 a	58,18 a
	44	75,84 a	79,88 a
25 - 50	44	48,03 a	60,11 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

En las capas de 00-25 y 25 -50 cm a los 44 meses, para el porcentaje de saturación de bases (% SB), no se encontró diferencia estadística

significativas para el factor fertilización. Los valores del CV variaron entre 12,62% y 22,69% (Anexo 30).

En las capas de 00-25 y 25 - 50 cm, aunque no se registraron diferencias estadísticas la %SB se incrementó s en los tratamientos con fertilización frente a aquello sin fertilización (Cuadro 27), ubicándose el valor del % SB en el rango alto. Ello probablemente se debió a la aplicación de la cal y de los elementos Mg, K y Zn con la fertilización.

4.7. DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES.

4.7.1. Nitrógeno Disponible.

El análisis de varianza para los contenidos de nitrógeno disponible a los 44 meses en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, se evidenció diferencia significativa para el factor fertilización. Los valores de los CV oscilan en el rango de 107,75% y 114,41% (Anexo 31).

El nitrógeno disponible en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, en los tratamientos sin y con fertilización se mantuvo en el rango de bajo. Aunque en los tratamientos con fertilización se aplicaron 200 kg ha⁻¹ de N, sin embargo los contenidos de la forma aprovechable del elemento se ubican en el rango de bajo, lo cual se explicaría por la absorción del mismo por las especies arbóreas, lixiviación por la lluvia y hasta volatilización de las formas gaseosas.

4.7.2. Fósforo Disponible.

Cuadro 28. Promedios y prueba de Tukey al 5% para fósforo disponible mg kg⁻¹ en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,89a	1,69a
	44	4,64 b	36,15 a
25 - 50	44	3,49 b	14,78 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Para el factor fertilización, en las dos capas se observó diferencias estadísticas altamente significativas para P⁺⁺ a los 44 meses. Los valores de los CV se ubicaron en el rango de 175,0% a 151,50 (Anexo 32).

En la capa de 00-25 cm, el fósforo disponible se incrementó significativamente en los tratamientos con fertilización frente a aquellos sin fertilización (Cuadro 28), ello se atribuye, por un lado al efecto de la aplicación de 150 kg ha⁻¹ de este elemento; y, por otro, a la neutralización parcial del aluminio soluble como respuesta a la aplicación de 3 t ha⁻¹ de cal, lo cual habría evitado la precipitación total del elemento en forma de compuestos insolubles.

En la capa de 25-50 cm, que existió diferencia estadísticamente altamente significativa a los 44 meses, el contenido de fósforo se incrementó al nivel medio (10-20 mg kg⁻¹). Dada la baja movilidad del elemento en el suelo, la explicación tendría dos opciones, la primera, que fue tomado por las raíces de los árboles y que estas al morir parcialmente dejaron el elemento en esa capa; y, la segunda, que al extraer la muestra se podría haber tomado también una parte de la capa superior.

4.7.3. Potasio Disponible.

Cuadro 31. Promedios y prueba de Tukey al 5% para potasio disponible (mg kg⁻¹), en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	103,25 a	79,36 a
	44	140,07 a	191,01 a
25 - 50	44	101,55 b	162,63 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

A los 44 meses en la capa de 00-25 cm, los contenidos promedio de K disponible no se evidenciaron diferencia estadística significativa, para el factor fertilización, y en la capa de 25-50 cm a los 44 meses se evidenciaron diferencias estadísticas altamente significativas lo cual sugiere una cierta movilización del elemento desde la capa superior (Cuadro 31). Los valores del

CV oscilaron entre 36,4% y 52%, lo que indica heterogeneidad del experimento. (Anexo 33).

4.7.4. Calcio Disponible.

Cuadro 19. Promedios y prueba de Tukey al 5% para calcio disponible Ca kg⁻¹ en las capas de 00 -25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	195,24a	160,80a
	44	200,20 b	345,54 a
25 - 50	44	144,28 a	233,12 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

En la capa de 00-25 cm se evidenció diferencias altamente significativas a los 44 meses, únicamente para el factor fertilización (Cuadro 29). Los valores de los CV oscilaron en el rango de 25,26% a 41, 59% (Anexo 34). Ello lo corrobora el hecho de que el contenido de Ca se incrementó significativamente en los tratamientos con fertilización versus aquellos sin fertilización, lo cual es obvio por la aplicación de 3 t ha⁻¹ de cal agrícola.

El incremento en la capa 25 - 50 cm se atribuiría a la movilización del elemento desde la capa superior.

4.7.5. Magnesio Disponible.

Cuadro 20. Promedios y prueba de Tukey al 5% para magnesio disponible (mg kg⁻¹), en las capas de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	82,03 a	82,78 a
	44	138,97 a	205,91 a
25 - 50	44	102,55 a	170,55 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

En la variable Mg disponible no se observaron diferencias estadísticas significativas para el factor fertilización a los 44 meses en las capas de 0 -25

cm y 25 - 50 cm (Anexo 35). Los valores del CV oscilaron en el rango de 14,4% a 26,9%, indistintamente en ambas capas.

Al inicio, los contenidos de Mg se encontraron en el rango bajo (<100 mg kg⁻¹). En la capa de 00 - 25 cm en los tratamientos con fertilización se incrementó a rango alto (>200 mg kg⁻¹), se debió por la adición de este elemento (118 kg ha⁻¹). En tanto que en la capa de 25 -50 cm, se incrementó del rango bajo hasta el medio (Cuadro 30), debido a la movilización del Mg aplicado en la capa superior.

4.7.6. Zinc Disponible.

Cuadro 32. Promedios y prueba de Tukey al 5% para zinc disponible (Zn kg⁻¹), en las capas de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio y 44 meses después de la fertilización. Los Zapotes, Panguintza, Noviembre 2013.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,64 a	0,60 a
	44	2,10 b	8,79 a
25 - 50	44	1,31 a	3,52 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Los contenidos promedio de Zn disponible evidenciaron diferencia estadística altamente significativa a los 44 meses para el factor fertilización en las capas de 00 – 25, mas no para la capa de 25 - 50 cm en, lo cual guarda correspondencia con la aplicación de 40 kg de este elemento con la fertilización. Ello se corrobora con el incremento desde el rango bajo al alto en la capa de 00-25 cm. El incremento del elemento en la capa de 25-50 cm estaría asociado a una movilización parcial desde la capa superior (Cuadro 32).

Los valores del CV oscilaron entre 107,2% y 130,1%, lo que también sugiere una elevada variabilidad del suelo para la forma disponible de este elemento (Anexo 36).

Los contenidos de Fe (400 – 337 mg kg⁻¹) y Mn (165 – 71 mg kg⁻¹) disponible en la capa de 00 – 25 cm, en los tratamientos con fertilización, disminuyeron, pero solo se detectó diferencia significativa para el Mn, en

comparación a aquellos sin fertilización; sin embargo, los valores se mantuvieron en el rango alto como consecuencia de una acumulación residual de estos elementos en los suelos del trópico húmedo.

4.8. CAPTURA DE CARBONO POR LAS ESPECIES ARBÓREAS MADERABLES Y APORTE AL SUELO.

4.8.1. Biomasa y Contenido de Carbono en las Especies Arbóreas.

Para el peso seco de la biomasa aérea se observaron diferencias altamente significativas únicamente para los factores especies arbóreas (melina y pachaco), dosis de carbón vegetal (0 t ha^{-1} , 3 t ha^{-1} y 6 t ha^{-1}) e interacciones más no para el factor fertilización (N + P + K + S + Mg +Zn + cal agrícola); y para el carbono almacenado en ésta se observaron diferencias altamente significativas para los factores especies arbóreas (melina y pachaco), dosis de carbón vegetal (0 t ha^{-1} , 3 t ha^{-1} y 6 t ha^{-1}) e interacciones y para el factor fertilización (N + P + K + S + Mg +Zn + cal agrícola); El CV fue de 51% y 48,7% para la biomasa y el carbono, respectivamente.

Para los tratamientos sin y con fertilización, los valores de la masa seca de la biomasa aérea fueron de $46,6 \text{ t ha}^{-1}$ y $66,18 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente; mientras que el peso de C almacenado en la biomasa fue de $25,13 \text{ t ha}^{-1}$ y $38,14 \text{ t ha}^{-1}$, en su orden. De ello resulta que el peso de la biomasa y concomitantemente de C almacenado en la parte aérea de los árboles con fertilización fue en proporción 1,5:1 en comparación a sin fertilización.

4.8.2. Carbono en el Suelo.

Para el peso del C a los 44 meses en la capas 00 - 25 cm y 25 – 50 cm no se detectaron diferencias estadísticas significativas para ningún factor en estudio. Los valores del CV oscilaron entre 21,6% y 20,7% (Anexo 37). La ausencia de diferencia estadística significativa sugiere que el suelo inicialmente tuvo una importante cantidad de este elemento, lo cual no se modificó con la

aplicación de las dosis de 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal, ni con la aplicación de 5 t ha⁻¹ de carbonato de calcio que se adicionó en la fertilización para disminuir la acidez. Al respecto, Campbell *et al.*, (2005) señalan que los cambios anuales del contenido de C son muy pequeños en relación a aquel existente; y, que, su variabilidad espacial puede ser muy grande.

4.8.3. Almacenamiento de C en la Biomasa y en el Suelo.

Para el peso de C en la biomasa y en las dos capas de suelo (00 - 25 cm y 25 - 50 cm), no se observaron diferencias significativas para el factor fertilización, al igual para los factores especies arbóreas, carbón vegetal (0 t ha⁻¹, 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹) e interacciones. El CV fue del 16,57%, considerado como aceptable (Anexo 37).

En los tratamientos con fertilización el valor promedio de C en el sistema (C hasta 50 cm en el suelo + C biomasa aérea) fue de 152 t ha⁻¹, correspondiendo el 80% al C en el suelo hasta 50 cm de profundidad y el 20% al C de la biomasa aérea. En los tratamientos sin fertilización el promedio del C total en el sistema fue de 144,0t ha⁻¹, con el 85,0% y 15,0% en el suelo y biomasa, respectivamente. El incremento del C total en el sistema por efecto de la fertilización fue de 8,0t ha⁻¹.

El incremento de la biomasa aérea de 19.6t ha⁻¹ y del C almacenado en ésta fue de 13,0t ha⁻¹, se atribuyen al efecto combinado de los nutrientes aplicados (N + P + K + Ca + S + Mg +Zn) y del carbonato de calcio, que neutraliza el aluminio soluble del suelo y, de esta forma, facilita la absorción de los nutrientes, especialmente el fósforo, que como es sabido es precipitado por la acción del aluminio.

Aunque no se evidenciaron diferencias estadísticas para el total del C almacenado en la biomasa y en el suelo, hasta una profundidad de 50 cm para el factor fertilización, podemos indicar que existió una diferencia de 8,31t ha⁻¹, nuevamente enfatiza el efecto de la aplicación de los nutrientes deficientes y de la disminución de la acidez sobre el desarrollo de la biomasa aérea. En todo caso, el gran reservorio de C en el sistema (rango de 80% a 85,0%) constituye

el suelo, lo cual coincide con la afirmación de Anikwe (2010), quien indica que el suelo es el gran reservorio activo del C orgánico que contiene alrededor del doble del C de la atmósfera.

Cabe recalcar que no se evidencian aún respuesta de los niveles de carbón 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal, para las dos especies arbóreas, bajo el efecto de fertilización, es decir los efectos del carbón aparentemente son anulados por la fertilización. Probablemente los efectos del carbón aparecerán cuando no estén enmascarados por la fertilización, aunque todavía es prematuro justificar estos comportamientos. Es posible que para ello se requiera más tiempo, y que la respuesta a la aplicación de carbón vegetal (como enmendador de suelos) sea tardía (Cheng *et al.*, 2008; Major *et al.*, 2010; Ascough *et al.*, 2011), lo cual estaría corroborado por los resultados reportados por (Kimetu *et al.*, 2008) en un Ultisol degradado de Kenia (ácido, altamente meteorizado y pobre en nutrientes), en el que la producción de maíz se duplicó después de tres aplicaciones repetidas de 7 t ha⁻¹ de carbón a lo largo de 2 años. Sin embargo, Major *et al.*, 2010, no encontraron cambio en la producción de maíz en el primer año, pero si un aumento significativo en el tercer año después de la aplicación de una dosis única de 20 t ha⁻¹ de carbón en un Oxisol en la Sabana Colombiana.

Sobre lo indicado es preciso señalar que en los dos experimentos La Victoria del cantón Zamora y Los Zapotes en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cónдор, la respuesta de los cultivos a las enmiendas con carbón vegetal dependen de las propiedades físicas y químicas de éste, las condiciones climáticas, las condiciones del suelo y el tipo de cultivo (Zwiten *et al.*, 2010; Yamato *et al.*, 2006; Gaskin *et al.*, 2010; Haefele *et al.*, 2011). En esta línea, varios autores han reportado efectos agronómicos tanto positivos como negativos de las aplicaciones de enmiendas de biocarbón en los suelos (Atkinson *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2003; Lehmann *et al.*, 2011; Major *et al.*, 2010; Novak *et al.*, 2009; Spokas *et al.*, 2011). Ello sugiere que la aplicación de biocarbón al suelo no es una enmienda de talla única que calce a todos los paradigmas (Spokas *et al.*, 2011), sino más bien requiere de consideraciones cuidadosas de sus propiedades relacionadas con cada material particular de

biocarbón y cómo esas propiedades pueden remediar una deficiencia específica en el suelo (Novak y Bussher, 2011).

Se debe reconocer que la naturaleza química y la composición del biocarbón varía ampliamente, dado que consiste en una colección heterogénea de estructuras carbonizadas, elementos inorgánicos atrapados, así como estructuras químicas heredadas del material de origen, sustancias volátiles adsorbidas y ceniza (Brewer *et al.*, 2009; Keiluwet *et al.*, 2010; Spokas *et al.*, 2011). Esta variabilidad es evidente cuando se examina la información sobre la composición orgánica e inorgánica del biocarbón que se reporta en la literatura. Incluso biocarbones obtenidos del mismo material, bajo condiciones similares de pirolisis, pero en unidades diferentes, pueden presentar características químicas diferentes. Además, diferencias en las propiedades físicas y químicas pueden resultar en función del tamaño de la partícula en el mismo tipo de biocarbón (Francioso *et al.*, 2011; Nocentini *et al.*, 2010).

La composición de los grupos superficiales es una característica importante para la exitosa utilización del biocarbón como enmendador de suelos, y podría ayudar en la comprensión de la respuesta tardía de las enmiendas de carbón que ocasionalmente se han observado (Ascough *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2008; Major *et al.*, 2010). Esto podría explicar la aún no evidente respuesta de pachaco y melina a las diferentes dosis de biocarbón. En este contexto es pertinente hacer referencia a los resultados reportados por Kimetu *et al.*, (2008), en un Ultisol degradado de Kenia (ácido, altamente meteorizado y pobre en nutrientes), que indican que la producción acumulativa de maíz se duplicó después de tres aplicaciones repetidas de 7 tha^{-1} de biocarbón a lo largo de dos años. Sin embargo, Major *et al.*, (2010) no encontraron cambio en la producción de maíz en el primer año, pero sí un aumento significativo en el subsecuente tercer año después de la aplicación de una dosis única de 20 tha^{-1} de biocarbón de madera en un Oxisol (de similares propiedades químicas que el Ultisol) en la Sabana Colombiana.

5. CONCLUSIONES

- La aplicación de cal (5 t/Ha) más fertilización incrementó el $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ en comparación con los tratamientos sin fertilización ni cal, al inicio del experimento en los tratamientos sin fertilización ni cal el pH se mantuvo en el rango de muy fuertemente ácido, disminuyendo a los 44 meses al rango de fuertemente ácido en los dos sectores de estudio.
- La aplicación de cal más fertilizantes disminuyó la acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) en el primer sector La Victoria del cantón Zamora, desde el rango alto a medio, en la capa 00 - 25 cm; mientras que, para el segundo sector “Los Zapotes”, en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cóndor si existió una ligera disminución pero se mantuvo en el rango alto.
- Por efecto de la fertilización más la aplicación de cal, la CIC efectiva se elevó en el suelo aunque permaneciendo dentro del mismo rango en los dos sectores de estudio, rango bajo, para Zamora y rango medio, para Panguintza.
- La fertilización más la aplicación de cal incrementaron las concentraciones de las bases intercambiables (Ca^{++} y Mg^{++}) en la capa de 00 – 25 cm, y el K^+ solo se incrementó en la capa de 25 – 50 cm, mientras que, para el segundo sector “Los Zapotes”, en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cóndor si existió un incremento de las concentraciones de las bases intercambiables (Ca^{++} , Mg^{++} y K^+) en las dos capas
- La fertilización más la aplicación de la cal, elevó el porcentaje de saturación de bases en la capa 00 – 25 cm en los dos sectores de estudio, manteniéndose dentro del mismo rango alto.
- En los dos sectores de estudio la aplicación de fertilización más cal,

incrementó los contenidos de N, P, K, Ca, Mg y Zn en la capa de 00 - 25cm; mientras que, en la capa de 25 – 50 cm la disponibilidad de estos elementos es menor, el N se mantuvo en el rango bajo.

- La aplicación de cal más la fertilización en relación a los tratamientos sin fertilización ni cal, elevó el peso de la biomasa aérea de 26,9 t ha⁻¹ a 36,6 t ha⁻¹ y la acumulación del C en la biomasa de 12,5 t ha⁻¹ a 20,6t ha⁻¹, respectivamente, para el sector La Victoria del cantón Zamora; mientras que, para el sector “Los Zapotes”, en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cóndor los valores fueron más elevados en la biomasa aérea de 46,6t ha⁻¹ a 66,18 t ha⁻¹y la acumulación de C de 25,13 t ha⁻¹ a 38,14 t ha⁻¹.
- La aplicación de cal más la fertilización mejoró la acumulación total del Carbono en el sistema (C total en la biomasa y en el suelo en la capa de 00 - 50 cm), con una captura de 152 t ha⁻¹para el sector La Victoria del cantón Zamoray 204,7 t ha⁻¹ para el sector “Los Zapotes”, en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cóndor.

6. RECOMENDACIONES.

- Es necesario incorporar cantidades adecuadas de cal más fertilización en los suelos del Sur de la Amazonia Ecuatoriana, pues incrementa el pH y la CIC atribuido al efecto neutralizador de la cal, lo cual coadyuva a la disminución de la acidez cambiante.
- Incluir en el manejo sostenido de los suelos, la aplicación de cal más fertilización es vital, pues incrementa las concentraciones de las bases cambiantes y el porcentaje de saturación de bases.
- Debido a que en los suelos intervenidos del Sur de la Amazonia Ecuatoriana los nutrientes se lixivian fácilmente por las excesivas precipitaciones, la aplicación de cal, fertilización y biocarbon vegetal es recomendable, ya que incrementan la disponibilidad de los nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y Zn), en las capas superficiales del suelo.
- Promover la aplicación de cal más fertilización en sistemas de repoblación forestal productivos es primordial, debido a que aumentan la cantidad de biomasa y la acumulación total de Carbono, coadyuvando a la fijación de CO₂ uno de los principales causantes del calentamiento global.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. ACOSTA, M. *et al.*, 2001. Un método para la medición del carbono en los comportamientos subterráneos (raíz, suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terreno de ladera en México. 13 pp.
2. ANIKWE, M. 2010. Carbon storage in soils of Southeastern Nigeria under different management practices. © 2010 Anikwe; licensee BioMed Central Ltd. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. 7 pp.
3. BARRAGÁN, D. 2008. Tesis. Aporte y descomposición de biomasa aérea en asociaciones agroforestales y su influencia en los cultivos de cacao y café. Tesis previa a la obtención de título de Ingeniero Forestal. 86 pp.
4. CALDERÓN, D; SOLÍS, D. 2012. Tesis Cuantificación del carbono almacenado en tres fincas en tres estados de desarrollo del bosque de Pino (*Pinus oocarpa*, L.) Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua. Tesis para optar al Título de Ingeniero Forestal. 79 pp.
5. CUSTODE, E; VIENNOT, M. 1983. El riesgo de erosión en la región amazónica. "seminario políticas sobre la conservación de los recursos renovables en particular del recurso suelo. PRONACOS con ayuda de la UNESCO. 88 pp.
6. CORDOVA, J; NOBOA, V. 2010. Experiencias de manejo de cuencas en los países andinos problemática, experiencias y enfoque sobre la erosión, manejo y conservación de suelos de ladera en Ecuador. Técnicos del Departamento de Suelos y Agua de la Estación Experimental "Santa Catalina", INIAP, Ecuador. 14 pp.
7. FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michel Robert Institut national de recherche agronomique París, Francia. 83 pp.

8. GLASER, B. GUIGGENBERGER, G. Zech, W. 2002. Past anthropogenic influence on the influence on the present soil properties of anthropogenic dark earth (Tetra Petra) in Amazonia. Brazil.
9. GROSSMAN, J. 2012. Carbon in Terrestrial Systems. This article was downloaded by: [SENESCYT]. Pleasescrolldownforarticle. 27 pp.
10. LEBLANC, H; et, al. 2006. Universidad Earth. Tierra Tropical. Informe sobre la fijación de carbono en palma aceitera en la Región Tropical húmeda de Costa Rica. 6 pp.
11. LLERENA, C; et, al. 2006. Debate agrario sobre las Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas. 32 pp.
12. LEHMANN, J. 2011. Department of crop and soil Sciences. CornellUniversity.
13. LOTER, D. 2002. Tropical soil fertility, tetra Preta soil of the Amazon. New and research. The new farm.
14. MOSQUERA, L. 1967. Génesis y propiedades de los suelos de una secuencia topográfica en trópico húmedo cálido. 135p.
15. Ortiz, I; *et al.* 2007. Informe de las técnicas de recuperación de los suelos contaminados. CITME. Enlace industria Gráfica. Huelva-España. 119 pp.
16. PANDURO, C. *et al.* 2012. Informe sobre el estudio de la transformación química de la madera de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales. Asociación para la investigación y Desarrollo Çintegral (AIDER). Lima-Perú. 18 pp.
17. ROSERO, G; CABRERA, E. (2011). Tesis Determinación de la distribución horizontal de las emisiones producidas en los hornos artesanales para elaboración de carbón vegetal en el cantón Quevedo.” tesis previo a la obtención del título de ingeniero en gestión ambiental. 89 pp.
18. SWAAMY, S; PURI, S. 2005. Biomass production and C-sequestration of Gmelina arborea in plantation and agroforestry system in India. Department of Forestry, Indira Gandhi Agricultural

University, Raipur (C.G.) 492 006, India; *Author for correspondence. 15 pp.

19. URREGO, J. 2004. Growth potential of *Gmelina arborea* at 3 years of age in Colombia New Forest 28: 269–276, 2004.
20. VALAREZO, C. 2004. Características, distribución, clasificación y capacidad de uso de los suelos en la Región Amazónica Ecuatoriana (universidad Nacional de Loja-Program de Modernización de los Servicios Agropecuarios-PROMSA. Editorial Universitaria, Loja.
21. VALAREZO, C. IÑIGUEZ, M, VALAREZO, L Y GUAYA, P. 1998. Condiciones físicas de los suelos de la Región Sur del Ecuador. Una guía para proyectos de riego, drenaje, manejo y conservación de suelos Universidad Nacional de Loja- Ecuador.
22. VILLAMAGUA, M. 2013. Almacenamiento de carbono y evolución de la fertilidad de un suelo desarrollado sobre granodiorita, en la fase inicial de una plantación de *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum* con enmiendas de carbón vegetal, en la zona sur de la amazonia ecuatoriana. 112 pp
23. ZAMBRANO, A; et al., 2004. Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistema forestales. Rev. For. Lat. N° 35/2004. 1-10 pp.
24. WIKIPEDIA, 2013. Rocas volcánicas, Andesita. Obtenida el 23 de junio del 2013, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Andesita>.
25. WIKIPEDIA, 2013. *Gmelina* arbóreas. Obtenida el 17 de marzo de http://es.wikipedia.org/wiki/Gmelina_arborea.
26. WIKI DEL HUERTO. 2009. Captación y sumideros CO₂. n.d. de <https://sites.google.com/site/huertocampoamor/apartados-del-proyecto/captacion-y-sumideros-de-co2>.
27. HOSTARTING. 2002. El Efecto Invernadero y el Dióxido de Carbono. Obtenida el 07 de septiembre del 2002. De <http://www.todo-ciencia.com/biologia/0i17885400d1031408591.php>)
28. SCHLEGEL, B; GAYOSO, J; Guerra, J. 2002. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. s.e. 17p.

29. WALKLEY, A AND BLACK, I. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method, Soil Sci. 37: 29-38.
30. CHAPMAN H.D., PRATT P.F. 1973. Manual de Análisis para Suelos, Aguas y Plantas. Ed.Trillas, México. Pp.195
31. RUIZ, A. 2002. Fijacion y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividadeconomica en Matiguas, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 119 p.

8. ANEXOS.

Anexo 1. Esquema de distribución de los tratamientos y una subparcela

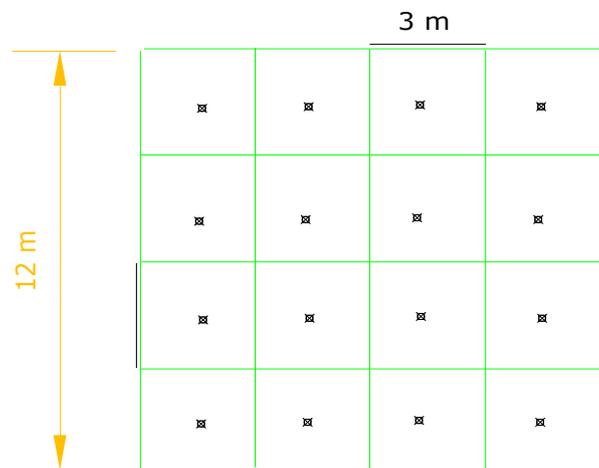
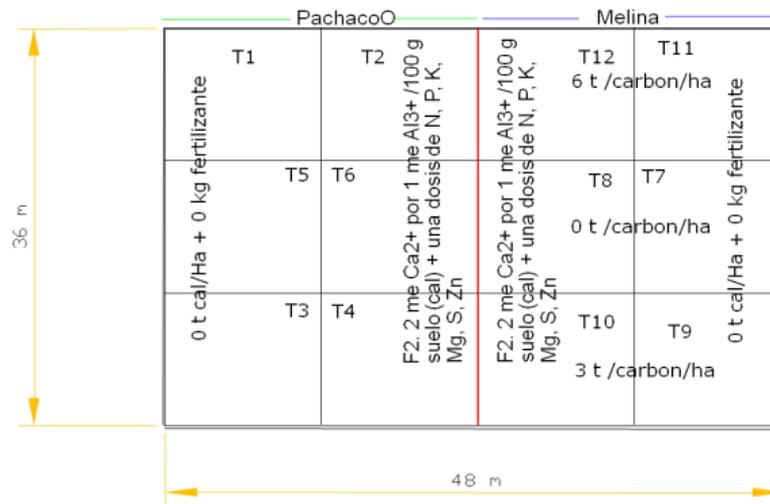


Figura 2: Esquema de una sub-subparcela

Anexo2. Medición del pH



Pesaje de las muestras



Agitador

pHmetro

Anexo3. Muestreo de campo



Selección y tumba de los arboles



Medición de altura comercial y total



Corte del fuste recto y torcido



Separación en ramas, hojas y fuste del árbol.



Pesaje del fuste



Pesaje del follaje



Recolección de muestras de ramas, hojas y fuste para el laboratorio.

Anexo4. Procesamiento de las muestras



Saturación de las muestras de fuste para obtener la densidad.



Medición del volumen

Secado al horno después de la medición.

Anexo5. Determinación del carbono en la biomasa.



Secado de las muestras y triturado



Muestras trituradas y determinación de carbono en el Analyzer.

ANEXOS DEL SUELO TYPIC KANDIHUMULTS

Anexo 6. Adeva para el pH_{H_2O} en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios pH_{H_2O}		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 meses	25-50 cm 44 meses
Bloques	0,06 ns	0,19	0,09
Especie arbórea	0,03 ns	2,8E-03	1,5E-03
Error experimental (a)	0,02	0,03	0,02
Fertilización	0,01 ns	0,45 (0,042)	0,07
Fertilización. x E. arbórea	0,02 ns	0,01	4,4E-03
Error experimental (b)	0,02	0,07	0,04
Carbón	0,03 ns	0,03	0,02
Fertilización x Carbón	0,004 ns	0,05	0,07
E. arbórea x Carbón	0,01 ns	0,04	0,02
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,01 ns	2,6E-03	0,06
Error experimental (c)	0,02	0,04	0,04
Coefficiente de variación (%)	3,1	4	3,87

Anexo 7. Adeva para la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) $cmol (+) kg^{-1}$ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios ($Al^{3+} + H^+$) $cmol (+) kg^{-1}$		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	4,21 ns	2,62	1,11
Especie arbórea	4,32 ns	1,32	0,06
Error experimental (a)	0,69	0,49	0,19
Fertilización	0,29 ns	8,18 (0,0096)	0,17
Fertilización. x E. arbórea	0,42 *	0,04	0,02
Error experimental (b)	0,48	0,58	0,26
Carbón	0,05 ns	0,41	0,11
Fertilización x Carbón	0,47 ns	0,01	0,49
E. arbórea x Carbón	0,41 ns	0,15	0,42
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,09 ns	0,09	0,25
Error experimental (c)	0,31	0,40	0,17
Coefficiente de variación (%)	16,84	36,42	16,85

Anexo 8. Adeva para la CICE en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios CICE cmol (+) kg ⁻¹		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	4,55 ns	3,31	4,42
Especie arbórea	3,31 ns	0,12	3,3E-03
Error experimental (a)	0,68	0,99	1,06
Fertilización	0,33 ns	0,91	1,54 (0,04)
Fertilización. x E. arbórea	0,04 ns	4,08	0,33
Error experimental (b)	0,32	0,66	0,23
Carbón	0,18ns	2,12	1,76
Fertilización x Carbón	0,23 ns	2,32	0,34
E. arbórea x Carbón	0,2 ns	0,62	0,95
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,15 ns	4,17	0,71
Error experimental (c)	0,21	0,79	0,71
Coeficiente de variación (%)	10	19	21

Anexo 9. Adeva para el Ca⁺⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios Ca ⁺⁺ cmol (+) kg ⁻¹		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,02 ns	0,57 (0,043)	0,74
Especie arbórea	0,2 ns	1,24 (0,018)	0,10
Error experimental (a)	0,04	0,06 (0,006)	0,80
Fertilización	0,09 ns	10,04	0,72
Fertilización. x E. arbórea	0,02 ns	2,34	7,5E-04
Error experimental (b)	0,06	0,57	0,17
Carbón	0,09 ns	0,20	1,07
Fertilización x Carbón	0,05 ns	1,27	0,37
E. arbórea x Carbón	0,14*	0,18	0,20
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,03ns	2,56	0,01
Error experimental (c)	0,03	0,69	0,40
Coeficiente de variación (%)	22	39	64

Anexo 10. Adeva para el Mg⁺⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios Mg cmol(+) kg ⁻¹		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,03 ns	0,35	0,82 (0,013)
Especie arbórea	0,01 ns	0,01	0,02
Error experimental (a)	0,01	0,07	0,03
Fertilización	0,01 ns	0,02	0,03
Fertilización. x E. arbórea	0,01 ns	0,12	0,06 (0,020)
Error experimental (b)	0,01	0,10	0,01
Carbón	0,01 ns	0,02	0,03
Fertilización x Carbón	0,01 ns	0,04	0,02
E. arbórea x Carbón	0,01 ns	0,10	0,04
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,01 ns	0,11	0,01
Error experimental (c)	0,01	0,08	0,02
Coefficiente de variación (%)	38	32	23

Anexo 11. Adeva para el K⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios K cmol(+) kg ⁻¹		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,010ns	0,12	0,01
Especie arbórea	0,003ns	0,03	0,09 (0,016)
Error experimental (a)	0,005	0,10	3,8E-03
Fertilización	0,001ns	0,01	0,10 (0,01)
Fertilización. x E. arbórea	0,020ns	0,01	0,09 (0,013)
Error experimental (b)	0,010	0,04	0,01
Carbón	0,001ns	0,02	0,01
Fertilización x Carbón	0,010ns	0,10	6,5E-05
E. arbórea x Carbón	0,020ns	0,01	0,01
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,010ns	0,06	0,01
Error experimental (c)	0,010	0,04	0,03
Coefficiente de variación (%)	58	83	114

Anexo 12. Adeva para el Na⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios Na cmol(+) kg ⁻¹		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,020ns	0,16 (0,031)	0,16 (0,017)
Especie arbórea	0,0001ns	4,4E-03	0,01
Error experimental (a)	0,003	0,01	0,01
Fertilización	0,004ns	3,3E-03	1,8E-03
Fertilización. x E. arbórea	0,004ns	3,0E-03	0,02
Error experimental (b)	0,004	3,7E-03	3,1E-03
Carbón	0,010ns	1,1E-03	0,01
Fertilización x Carbón	0,002ns	5,4E-04	9,0E-04
E. arbórea x Carbón	0,010ns	3,0E-03	4,7E-03
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,020*	0,01	2,9E-03
Error experimental (c)	0,004	4,7E-03	0,01
Coefficiente de variación (%)	24	12	12

Anexo 13. Adeva para la SB % en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios % SB cmol(+) kg ⁻¹		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	133,9ns	278,75	98,21
Especie arbórea	216,8ns	361,90	6,02
Error experimental (a)	51,7	56,90	64,59
Fertilización	12,0ns	2491,20 (0.007)	337,08
Fertilización. x E. arbórea	176,3ns	254,84	54,61
Error experimental (b)	83,8	156,38	60,89
Carbón	1,0ns	6,99	123,84
Fertilización x Carbón	114,1ns	52,52	5,34
E. arbórea x Carbón	111,8ns	47,62	0,69
E. arbórea x Fert. x Carbón	47,3ns	64,11	62,32
Error experimental (c)	55,9	122,60	80,55
Coefficiente de variación (%)	23	16	19

Anexo 14. Adeva para la N en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios N			
	00-25 cm 18 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 18 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	4,3ns	38,93	1,89ns	9,28
Especie arbórea	5,32ns	59,85	8,29ns	7,36
Error experimental (a)	1,85	36,72	6,29	25,27
Fertilización	13,42*	36,40	2,46ns	14,52
Fertilización. x E. arbórea	1ns	28,83	1,71ns	57,64
Error experimental (b)	1,56	13,33	2,22	7,21
Carbón	4,46ns	16,10	0,56ns	3,15
Fertilización x Carbón	1,6ns	8,10	0,79ns	6,96
E. arbórea x Carbón	0,93ns	14,80	0,09ns	16,70
E. arbórea x Fert. x Carbón	1,06ns	9,73	0,06ns	0,44
Error experimental (c)	1,14	12,68	0,39	19,15
Coefficiente de variación (%)	13	40.6	12	60

Anexo 15. Adeva para el P disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios P		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques Fuente	6,95ns	423,66	51,97
Especie arbórea	1,24ns	644,71	432,26
Error experimental (a)	2,49	410,04	77,68
Fertilización	1,90E-03ns	928,07	388,76 (0.017)
Fertilización. x E. arbórea	1,96ns	746,89	210,11
Error experimental (b)	0,72	375,01	36,47
Carbón	1,59ns	174,88	6,75
Fertilización x Carbón	2,52ns	169,48	6,99
E. arbórea x Carbón	1,16ns	174,25	26,92
E. arbórea x Fert. x Carbón	4,36ns	216,82	3,42
Error experimental (c)	1,25	234,10	75,13
Coefficiente de variación (%)	17	251	190

Anexo 16. Adeva para el K disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios K		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques Fuente	1358ns	4048,15	563,49
Especie arbórea	807ns	92,96	11718,75
Error experimental (a)	224	2574,25	1430,97
Fertilización	2108ns	7585,24	10902,24 (0.012)
Fertilización. x E. arbórea	359ns	5852,08	9402,40 (0.016)
Error experimental (b)	464	4014,18	861,90
Carbón	479ns	2644,12	1216,85
Fertilización x Carbón	340ns	1722,70	1161,74
E. arbórea x Carbón	656ns	525,71	5037,05
E. arbórea x Fert. x Carbón	447ns	1082,91	1991,63
Error experimental (c)	299	1864,55	2266,79
Coefficiente de variación (%)	22	46	74

Anexo 17. Adeva para el Ca disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios Ca		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	2216ns	20535,62	1590,69
Especie arbórea	1302ns	75113,36	3320,01
Error experimental (a)	1017	10385,43	2497,27
Fertilización	271ns	477962,17 (0.0007)	11587,87 (0.03)
Fertilización. x E. arbórea	1261ns	3097,65	4957,27
Error experimental (b)	688	11909,86	1388,80
Carbón	1392ns	496,93	900,35
Fertilización x Carbón	842ns	3052,05	5652,32 (0.006)
E. arbórea x Carbón	600ns	3452,94	2086,01
E. arbórea x Fert. x Carbón	247ns	972,43	462,17
Error experimental (c)	945	6850,70	903,13
Coefficiente de variación (%)	32	34	47

Anexo 18. Adeva para el Mg disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios Mg		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	152ns	1254,18	11402,62
Especie arbórea	9ns	1897,64	364,47
Error experimental (a)	80	1565,21	379,38
Fertilización	39ns	575,23	136,52
Fertilización. x E. arbórea	285ns	299,28	179,98
Error experimental (b)	112	677,45	544,83
Carbón	82ns	229,61	863,48
Fertilización x Carbón	109n	1602,17	707,00
E. arbórea x Carbón	46ns	94,75	542,15
E. arbórea x Fert. x Carbón	118ns	837,01	1225,88
Error experimental (c)	97	374,66	440,40
Coeficiente de variación (%)	40	29	32

Anexo 19. Adeva para el Zn disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios Zn		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,05ns	17,21	6,33
Especie arbórea	0,15ns	13,61	2,48
Error experimental (a)	0,1	5,14	1,44
Fertilización	0,06ns	35,40 (0.014)	0,49
Fertilización. x E. arbórea	0,78*	0,80	14,57
Error experimental (b)	0,11	2,97	4,97
Carbón	0,22ns	5,38	5,18
Fertilización x Carbón	0,21ns	4,28	8,82
E. arbórea x Carbón	0,21ns	7,69	6,08
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,68*	7,53	5,51
Error experimental (c)	0,13	3,11	5,55
Coeficiente de variación (%)	62	54	126

Anexo 20. Adeva para el Cu disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios Cu		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,38ns	0,82	2,05
Especie arbórea	0,03ns	0,29	0,01
Error experimental (a)	0,07	0,12	0,17
Fertilización	0,01ns	0,29	1,1E-03
Fertilización. x E. arbórea	0,08ns	0,18	0,02
Error experimental (b)	0,11	0,05	0,06
Carbón	0,1ns	0,17	0,11
Fertilización x Carbón	0,03ns	0,01	0,07
E. arbórea x Carbón	0,29ns	0,02	0,02
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,07ns	0,01	0,04
Error experimental (c)	0,06	0,11	0,05
Coefficiente de variación (%)	24	27	20

Anexo 21. Adeva para el Fe disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios Fe		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	72891ns	18225,05	5683,54
Especie arbórea	230ns	1,20	160,60
Error experimental (a)	7647	1376,52	24891,63
Fertilización	2715ns	35186,67	3336,67 (0049)
Fertilización. x E. arbórea	3056ns	9492,19	8780,43
Error experimental (b)	6015	5853,50	895,83
Carbón	6445ns	5246,64	3831,09
Fertilización x Carbón	1089ns	2888,48	1359,42
E. arbórea x Carbón	2049ns	246,07	1590,19
E. arbórea x Fert. x Carbón	11439ns	5619,74	9997,14
Error experimental (c)	4405	3402,95	5505,26
Coefficiente de variación (%)	17	33.1	55.9

Anexo 22. Adeva para el Mn disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios Mn		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	3668ns	1261ns	1186
Especie arbórea	176ns	602ns	569
Error experimental (a)	536ns	152ns	615ns
Fertilización	0ns	558	72
Fertilización. x E. arbórea	182,13	26,55	37,15
Error experimental (b)	2,85	105,91	30,87
Carbón	34,55	7,70	15,15
Fertilización x Carbón	39,03	34,90	31,5
E. arbórea x Carbón	18,71	5,33	2,96
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,00	13,23	11,91
Error experimental (c)	5,61	3,02	7,84
Coefficiente de variación (%)	12,47	4,61	40,7

Anexo 23. Análisis de varianza de biomasa aérea, C en la biomasa, C en el suelo ($t\ ha^{-1}$) en las capas; y C total (biomasa + C 00-50 cm suelo), a los 44 meses después de la plantación.

Fuente de variación	CUADROS MEDIO CO TOTAL				
	Biomasa aérea	C biomasa	00 a 25 cm	25 a 50 cm	C Total: biomasa + 00 a 50 cm
Bloques	1970,14	377,92	733,94	144,73	1801,53
Especie arbórea	15844,33 (0,016)	3694,28 (0,01)	443,60	1634,50	1,8E-12
Error experimental (a)	654,77	135,26	228,21	1055,88	2042,80
Fertilización	1140,75	793,00 (0,02)	94,36	1,96	1539,07
Fertilización. x E. arbórea	3,3E-03	32,51	4,88	101,21	184,87
Error experimental (b)	551,29	78,31	50,00	284,73	399,08
Carbón	9,51	10,56	2,22	25,22	8,20
Fertilización x Carbón	194,09	25,18	68,91	221,54	592,21
E. arbórea x Carbón	257,32	26,26	435,00	58,38	787,32
E. arbórea x Fert. x Carbón	127,35	36,52	2,09	307,26	153,56
Error experimental (c)	165,62	54,07	144,83	136,32	339,08
Coefficiente de variación (%)	40.55	44.5	10.4	17.2	9.3

Anexos del suelo Rhodic Kandiudults

Anexo 24. Adeva para el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$			
	00-25 cm 24 mes	00-25 cm 44 meses	25-50 cm 24 meses	25-50 cm 44 meses
Bloques	0,06ns	0,30	0,08ns	0,30
Especie arbórea	0,09ns	0,67	0,04ns	0,67
Error experimental (a)	0,01	0,21	0,02	0,21
Fertilización	0,83**	0,25	0,61**	0,25
Fertilización. x E. arbórea	0,07ns	0,10	0,03ns	0,10
Error experimental (b)	0,01	0,06	0,03	0,06
Carbón	0,14ns	0,39	0,04ns	0,39
Fertilización x Carbón	0,01ns	0,14	0,03ns	0,14
E. arbórea x Carbón	0,03ns	0,08	0,08ns	0,08
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,01ns	0,16	0,01ns	0,16
Error experimental (c)	0,09	0,16	0,04	0,16
Coefficiente de variación (%)	6,2	7,9	4,6	7,7

Anexo 25. Adeva para la acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) cmol (+) kg^{-1} en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) cmol (+) kg^{-1}		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	5,96 ns	4,96	9,63
Especie arbórea	0,47 ns	1,01	0,11
Error experimental (a)	1,87	0,18	1,19
Fertilización	4,48 ns	3,9E-03	1,77
Fertilización. x E. arbórea	0,03 ns	0,03	0,78
Error experimental (b)	1,54	0,95	2,64
Carbón	0,81 ns	0,55	0,84
Fertilización x Carbón	0,35 ns	0,09	0,56
E. arbórea x Carbón	0,07 ns	0,79	5,17
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,92 ns	0,57	1,55
Error experimental (c)	1,9	0,54	0,97
Coefficiente de variación (%)	53,9	44.23	28,46

Anexo 26. Adeva para la CICE en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios CICE		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	26,96 ns	57,92	8,48
Especie arbórea	37,82 ns	11,31	21,87
Error experimental (a)	8,3	1,49	3,06
Fertilización	1,73 ns	30,24 (0,03)	48,80 (0,04)
Fertilización. x E. arbórea	1,03 ns	5,67	7,36
Error experimental (b)	8,66	3,89	7,50
Carbón	2,06 ns	9,79	1,25
Fertilización x Carbón	3,83 ns	4,54	6,59
E. arbórea x Carbón	1,65	0,38	1,31
E. arbórea x Fert. x Carbón	8,05	17,49	5,56
Error experimental (c)	2,17	5,46	4,20
Coefficiente de variación (%)	18,32	25,53	26,45

Anexo 27. Adeva para el Ca⁺⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios Ca ⁺⁺		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	12,14 ns	14 ns	1,38
Especie arbórea	14,19 ns	19 ns	5,05
Error experimental (a)	2,06	06	0,73
Fertilización	4,55 ns	55 ns	8,03
Fertilización. x E. arbórea	0,69ns	69ns	0,65
Error experimental (b)	7,55	55	1,61
Carbón	1,82ns	82ns	0,19
Fertilización x Carbón	2,82 ns	82 ns	0,66
E. arbórea x Carbón	0,22 ns	22 ns	0,51
E. arbórea x Fert. x Carbón	4,37ns	37ns	0,55
Error experimental (c)	2,26	26	0,54
Coefficiente de variación (%)	47,15	15	38,33

Anexo 28. Adeva para el Mg⁺⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios Mg ⁺⁺		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	765,21 ns	5,51	2,58
Especie arbórea	266,78 ns	3,62	5,38
Error experimental (a)	45,02	1,97	1,99
Fertilización	5,14 ns	0,99	4,59 (0,02)
Fertilización. x E. arbórea	7,65 ns	0,13	0,56
Error experimental (b)	118,45	0,40	0,44
Carbón	6,96 ns	0,57	0,15
Fertilización x Carbón	92,46 ns	0,72	0,38
E. arbórea x Carbón	99,19 ns	0,84	1,07
E. arbórea x Fert. x Carbón	11,50 ns	0,21	0,58
Error experimental (c)	72,85	0,55	0,64
Coefficiente de variación (%)	10,36	31,07	52,16

Anexo 29. Adeva para el K⁺ en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios K ⁺		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,01 ns	1,25	0,25
Especie arbórea	0,04 ns	0,78	0,19
Error experimental (a)	0,08	0,44	0,01
Fertilización	0,02ns	2,06	0,88 (0,04)
Fertilización. x E. arbórea	0,10 ns	2,48	0,02
Error experimental (b)	0,06	0,67	0,13
Carbón	0,01 ns	2,5E-03	0,49
Fertilización x Carbón	0,05 ns	0,69	0,11
E. arbórea x Carbón	0,03 ns	0,47	0,05
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,08 ns	0,24	0,28
Error experimental (c)	0,06	0,38	0,15
Coefficiente de variación (%)	80,55	108,36	132,44

Anexo 30. Adeva para la SB % en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios % SB		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	48,58 ns	257,49	514,15
Especie arbórea	47,38 ns	457,57	464,39
Error experimental (a)	13,05	119,23	121,31
Fertilización	11,67 ns	2260,51	2752,76
Fertilización. x E. arbórea	0,72 ns	75,50	0,26
Error experimental (b)	12,57	37,95	204,35
Carbón	5,49 ns	62,74	88,61
Fertilización x Carbón	6,26 ns	35,60	24,96
E. arbórea x Carbón	1,34 ns	24,84	89,79
E. arbórea x Fert. x Carbón	13,34 ns	23,61	41,16
Error experimental (c)	6,91	49,64	63,31
Coefficiente de variación (%)	47,76	10,34	15,33

Anexo 31. Adeva para N disponible, dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	00-25 cm 14 mes	Cuadrados medios N		
		00-25 cm 44 mes	25-50 cm 14 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	44,73 ns	3787,62	50,94 ns	3021,79
Especie arbórea	30,25 ns	3718,88	12,13 ns	57,42
Error experimental (a)	29,65	2722,45	18,06	112,03
Fertilización	73,39 ns	12828,21 (0,036)	2,51 ns	12425,99 (0,014)
Fertilización. x E. arbórea	5,92 ns	1831,51	6,50 ns	938,99
Error experimental (b)	12,72	1791,77	14,04	1074,00
Carbón	2,11 ns	744,83	13,40 ns	1628,87
Fertilización x Carbón	6,80 ns	590,61	1,31 ns	2676,33
E. arbórea x Carbón	24,93 ns	1335,20	26,96 ns	421,57
E. arbórea x Fert. x Carbón	6,40 ns	1438,65	39,82 ns	431,64
Error experimental (c)	8,48	1665,94	23,52	1161,96
Coefficiente de variación (%)	11,10	107,75	20,35	114,44

Anexo 32. Adeva para el P disponible en cuatro fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios P		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,81 ns	2265,25	190,80
Especie arbórea	3,93 ns	26,70	60,75
Error experimental (a)	0,01	1917,94	13,69
Fertilización	5,68ns	11913,3(0,029)	1530,02 (0,008)
Fertilización. x E. arbórea	0,67 ns	1,92	465,01
Error experimental (b)	0,77	1481,09	103,28
Carbón	1,18 ns	891,70	67,34
Fertilización x Carbón	1,62 ns	1042,02	118,96
E. arbórea x Carbón	1,94 ns	283,23	10,81
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,05 ns	188,58	45,81
Error experimental (c)	0,30	1272,89	191,47
Coeficiente de variación (%)	42,37	174,96	151,50

Anexo 33. Adeva para el K disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios K		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	6644,69ns	17437,88	10709,50
Especie arbórea	2585,72ns	540,69	8509,35
Error experimental (a)	3018,18	7503,19	415,61
Fertilización	5138,50ns	31135,55	44780,2 (0,0001)
Fertilización. x E. arbórea	2435,42ns	1871,25	4754,11
Error experimental (b)	1472,58	8728,52	440,74
Carbón	704,25ns	8267,43	9658,49
Fertilización x Carbón	4558,55ns	22,01	2835,61
E. arbórea x Carbón	4092,24ns	759,79	7698,48
E. arbórea x Fert. x Carbón	6389,54ns	494,16	11144,45
Error experimental (c)	3584,46	3635,93	4727,74
Coeficiente de variación (%)	65,57	36,43	52,05

Anexo 34. Adeva para el Ca disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm.

Fuente de variación	Cuadrados medios Ca		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	121 009,80*	472231,61	131435,06
Especie arbórea	58 793	539518,82	110870,58
Error experimental (a)	11 756,96	18160,67	30937,96
Fertilización	6 331,91	421181,54 (0,014)	169491,99
Fertilización. x E. arbórea	528,68	14032,26	15240,38
Error experimental (b)	25 271,42	36398,60	62272,38
Carbón	232,67	57057,03	14344,34
Fertilización x Carbón	8 982,39	20380,28	14712,92
E. arbórea x Carbón	807,5	54747,47	50927,82
E. arbórea x Fert. x Carbón	19 647,72	8794,03	59486,51
Error experimental (c)	8 439,63	26296,61	28187,77
Coefficiente de variación (%)	62,3	25,26	44,59

Anexo 35. Adeva para el Mg disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios Mg		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	765,21 ns	3289,97	11964,98
Especie arbórea	266,78ns	116,25	4900,52
Error experimental (a)	45,02	3295,78	1529,02
Fertilización	5,14 ns	0,15	610,61
Fertilización. x E. arbórea	7,65ns	3,47	258,54
Error experimental (b)	118,45	362,06	1478,30
Carbón	6,96ns	175,79	225,98
Fertilización x Carbón	92,46ns	145,80	679,05
E. arbórea x Carbón	99,19ns	1343,86	1181,50
E. arbórea x Fert. x Carbón	11,50	293,93	6,78
Error experimental (c)	72,85	400,75	817,84
Coefficiente de variación (%)	10,36	14,44	26,95

Anexo 36. Adeva para el Zn disponible en dos fechas de muestreo, en las capas de suelo de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm

Fuente de variación	Cuadrados medios Zn		
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 44 mes	25-50 cm 44 mes
Bloques	0,74ns	9,33	37,75
Especie arbórea	0,11ns	51,46	11,90
Error experimental (a)	0,19	63,29	19,48
Fertilización	0,02ns	536,67(0,01)	59,19
Fertilización. x E. arbórea	0,0044ns	38,34	8,25
Error experimental (b)	0,19	44,38	23,50
Carbón	0,19ns	39,50	1,16
Fertilización x Carbón	0,16ns	61,84	1,62
E. arbórea x Carbón	0,02ns	30,44	9,15
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,14ns	40,65	14,10
Error experimental (c)	0,20	34,06	9,90
Coefficiente de variación (%)	71,32	107,21	130,1

Anexo 37. Análisis de varianza de biomasa aérea, C en la biomasa, C en el suelo (t ha⁻¹) en las capas; y C total (biomasa + C 00-50 cm suelo), a los 44 meses después de la plantación.

Fuente de variación	CUADRADOS MEDIO CO TOTAL				
	Biomasa aérea	C biomasa	00 a 25 cm	25 a 50 cm	C Total: biomasa + 00 a 50 cm
Bloques	2472,74	756,18	2749,48	1332,16	4099,96
Especie arbórea	10995,88 (0,025)	2504,19 (0,037)	144,97	1,17	1371,74
Error experimental (a)	637,36	196,49	194,68	175,67	780,69
Fertilización	4600,13	2031,90 (0,047)	263,34	0,01	830,00
Fertilización. x E. arbórea	3,15	0,46	1,22	145,95	154,80
Error experimental (b)	1019,11	330,30	845,25	27,64	1496,65
Carbón	39,48	43,02	63,60	11,47	61,81
Fertilización x Carbón	1071,07	348,98	504,24	94,59	2505,26
E. arbórea x Carbón	173,53	65,83	271,25	93,74	932,09
E. arbórea x Fert. x Carbón	1644,35	487,99	460,63	8,07	2044,70
Error experimental (c)	826,36	236,89	272,29	68,56	602,59
Coefficiente de variación (%)	50,98	48,65	21,56	20,70	16,57