

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS, COMO ENMIENDA  
ORGÁNICA, EN LA RECUPERACIÓN DE UN SUELO DISTURBADO POR  
ACTIVIDAD EXTRACTIVA EN LA CANTERA SORATAMA, LOCALIDAD DE  
USAQUÉN, BOGOTÁ D.C.



CONVENIO 017/2003 DAMA – PUJ

SUSAN MARITZA GUACANEME MEDINA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES  
CARRERA DE ECOLOGIA  
BOGOTÁ D.C.

2005

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS, COMO ENMIENDA  
ORGÁNICA, EN LA RECUPERACIÓN DE UN SUELO DISTURBADO POR  
ACTIVIDAD EXTRACTIVA EN LA CANTERA SORATAMA, LOCALIDAD DE  
USAQUÉN, BOGOTÁ D.C.

SUSAN MARITZA GUACANEME MEDINA

Proyecto de grado para optar el título Profesional de  
ECÓLOGA

Director

JOSÉ IGNACIO BARRERA

Biólogo MSc.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES  
CARRERA DE ECOLOGIA  
BOGOTÁ D.C.

2005

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS, COMO ENMIENDA  
ORGÁNICA, EN LA RECUPERACIÓN DE UN SUELO DISTURBADO POR  
ACTIVIDAD EXTRACTIVA EN LA CANTERA SORATAMA, LOCALIDAD DE  
USAQUÉN, BOGOTÁ D.C.

SUSAN MARITZA GUACANEME MEDINA

APROBADO

---

José Ignacio Barrera, Biólogo. MSc.

Director

---

Mario Opazo (Ingeniero Sanitario).

Universidad Javeriana

Jurado

---

Domingo Mendivelso (Geólogo).

IGAC

Jurado

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS, COMO ENMIENDA  
ORGÁNICA, EN LA RECUPERACIÓN DE UN SUELO DISTURBADO POR  
ACTIVIDAD EXTRACTIVA EN LA CANTERA SORATAMA, LOCALIDAD DE  
USAQUÉN, BOGOTÁ D.C.

SUSAN MARITZA GUACANEME MEDINA

APROBADO

---

Luis Miguel Renjifo

Decano Académico

---

Juan Ricardo Gómez

Director de Carrera

## CAMBIAR EL MUNDO

*“Todo tiene que equilibrarse  
La naturaleza está equilibrada  
Las bestias viven en armonía  
Los seres humanos no han aprendido a hacerlo  
Siguen destruyéndose  
No hay armonía, no hay proyectos  
En la naturaleza todo es muy diferente  
La naturaleza es energía y vida..... Y restitución  
En cambio los seres humanos sólo destruyen  
Destruyen la naturaleza  
Destruyen a los demás  
Y acabarán por destruirse a sí mismos”.*

*Tomado de: Brian Weiss, Los Mensajes de los Sabios*

*A Dios, por ser el guía de mi vida, mi consejero, mi fortaleza, mi paño de lágrimas en las tristezas y alegrías y por quién finalmente existo.*

*A mis Padres, quienes con su amor, confianza, tolerancia, ejemplo y valioso apoyo permitieron que este sueño y meta se hiciera realidad. Igualmente me han enseñado que los grandes triunfos sólo se logran con esfuerzo y dedicación.*

*A Erika, y David por escuchar mi historia cotidiana, por estar ahí y siempre.*

*A mi familia, y amigos Adriana, Javier y Jairo, que estuvieron conmigo durante este tiempo y me apoyaron incondicionalmente*

*A quienes de alguna manera contribuyeron a la realización de este valioso proyecto*

**Susan.**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

Departamento Administrativo Técnico del Medio Ambiente (DAMA) por la financiación del trabajo y apoyo en la investigación. En especial a la Doctora Sandra Montoya por su gestión en el proyecto.

José Ignacio Barrera, Biólogo MSc., Profesor Departamento de Biología, Universidad Javeriana, por su paciencia, enseñanza y dirección del trabajo.

Oriol Ortiz, Profesor Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) España, por sus asesorías e incondicional amistad.

Bogotana de Aguas y Saneamiento Ambiental, por la financiación del proyecto. En especial al Ingeniero Gian Paolo Daguer por su colaboración.

Jorge Gallardo, Ingeniero Agrónomo, Laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), por su constante apoyo, asesoría y amistad.

Claudia Campos, Profesora Universidad Javeriana, por su colaboración y asesoría.

Juan Carlos Vaca, Profesor Universidad Javeriana, por su colaboración y gran amistad.

A las Unidades de Saneamiento y Biotecnología Ambiental, y Fisiología Vegetal, de la Universidad Javeriana, por facilitarme sus equipos e instalaciones para la realización de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	22
ABSTRACT.....	23
1. INTRODUCCIÓN.....	24
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	26
2.1. ANTECEDENTES.....	26
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	26
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	28
2.2. DISTURBIOS COMO CAUSA DE LA TRANSFORMACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS.....	30
2.2.1 Concepto de disturbio.....	30
2.2.2 Tipos de disturbio.....	30
2.2.3 Efectos del disturbio.....	31
2.2.4 Disturbios de los Cerros Orientales de Bogotá.....	31
2.3. LA MINERÍA A CIELO ABIERTO COMO UN TIPO DE DISTURBIO.....	31
2.3.1 Definición industria minera.....	31
2.3.2 Extracción de los minerales e impactos sobre el ecosistema.....	32
2.3.3 Impacto de la minería sobre el compartimiento del suelo.....	33
2.3.4 Aspecto Legal.....	34
2.3.5 Situación de la Minería Colombiana.....	35
2.3.5.1 Situación Nacional.....	35

2.3.5.2 Situación en Bogotá.....	35
2.4. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA COMO ESTRATEGIA DE RECUPERACIÓN DE ECOSISTEMAS DISTURBADOS.....	36
2.4.1 Definiciones ecología de la restauración y restauración ecológica.....	36
2.4.2 Definiciones restauración y rehabilitación ecológica.....	36
2.5. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE CANTERAS.....	37
2.5.1 Restauración de los compartimentos del ecosistema.....	37
2.6. PROPIEDADES EDÁFICAS DEL COMPARTIMENTO DEL SUELO A RECUPERAR.....	38
2.6.1 Definición de un suelo.....	38
2.6.2 Importancia de la materia orgánica.....	38
2.6.3 Efectos de la materia orgánica.....	39
2.6.3.1 Propiedades físicas.....	39
2.6.3.2 Propiedades químicas.....	39
2.6.3.3 Propiedades biológicas.....	42
2.7. ENMIENDAS EDÁFICAS COMO ELEMENTO PARA MEJORAR LAS CONDICIONES DEL SUELO.....	43
2.7.1 Tipos de enmiendas edáficas de acuerdo a su composición.....	43
2.7.2 Fuentes de sustancias minerales y sustratos orgánicos.....	44
2.8. BIOSÓLIDOS Y SU USO COMO ENMIENDA ORGÁNICA.....	45
2.8.1 Definición.....	45
2.8.2 Clasificación.....	45
2.8.3 Alternativas de aprovechamiento.....	45

2.8.4	Uso y disposición Internacional.....	46
2.8.5	Utilización a nivel Nacional.....	46
2.8.6	Requerimientos del biosólido y terrenos a recuperar.....	47
2.8.7	Tipos de mezcla de los biosólidos y tierra o estéril.....	48
2.8.8	Efecto del biosólido como enmienda orgánica del suelo.....	48
2.8.8.1	Aspectos favorables.....	48
2.8.8.2	Aspectos desfavorables.....	49
2.8.9.	Aspectos legales que influyen en la utilización de los biosólidos .....	50
2.8.10	Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de la Planta	
	El Salitre en Bogotá.....	52
2.8.11	Características de los biosólidos de la Planta El Salitre.....	53
3.	MARCO GEOGRÁFICO DE LA CANTERA.....	56
3.1	Ubicación y Características de la cantera.....	56
4.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	62
4.1	Formulación del problema.....	62
4.2	Justificación de la investigación.....	63
4.3	Pregunta de investigación.....	65
4.4	Hipótesis pregunta de investigación.....	65
5.	OBJETIVOS.....	66
5.1	Objetivo general.....	66
5.2	Objetivos específico.....	66
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	66
6.1	Diseño experimental.....	66

6.2 Delimitación y adecuación del área experimental.....	68
6.3 Preparación de las mezclas de biosólidos y estériles.....	70
6.4 Transporte y Ubicación de las mezclas hasta el área experimental.....	70
6.5 Toma de las muestras de biosólidos y estériles en campo.....	72
6.6 Toma de muestras en los diferentes tratamientos para la caracterización físicoquímica.....	73
6.7. Fase de laboratorio en los diferentes tratamientos para la caracterización de las variables físicoquímicas.....	75
7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	77
8. RESULTADOS.....	78
8.1 Variables Químicas.....	78
8.1.1 Comportamiento del carbono orgánico en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	78
8.1.2 Comportamiento del nitrógeno total en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	81
8.1.3 Comportamiento de la relación C/N en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	83
8.1.4 Comportamiento del pH en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	85
8.1.5 Comportamiento del fósforo en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.....	87
8.1.6 Comportamiento de la conductividad eléctrica en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del	

bosque.....	89
8.1.7 Comportamiento de la acidez intercambiable y de la saturación de la acidez en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.....	91
8.1.8 Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	92
8.1.9 Comportamiento del calcio en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	95
8.1.10 Comportamiento del magnesio en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	97
8.1.11 Comportamiento del potasio en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.....	99
8.1.12 Comportamiento del sodio en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.....	101
8.1.13 Comportamiento de las bases totales en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	103
8.1.14 Comportamiento de la saturación de bases en los tratamientos durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque .....	105
8.2 Variables físicas.....	107
8.2.1 Comportamiento de la densidad aparente en los tratamientos durante cada muestreo y en el tiempo .....	107

8.2.2 Comportamiento de la densidad real en los tratamientos durante cada muestreo y en el tiempo .....	110
8.2.3 Comportamiento de la porosidad en los tratamientos durante cada muestreo y en el tiempo.....	113
8.2.4 Comportamiento de la humedad en los tratamientos durante cada muestreo y en el tiempo .....	116
9. DISCUSIÓN.....	119
9.1 Comportamiento de las variables químicas en los diferentes tratamientos con biosólidos.....	119
9.2 Comportamiento de las variables físicas en los diferentes tratamientos con biosólidos.....	125
10. CONCLUSIONES.....	127
11. RECOMENDACIONES.....	128
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
ANEXOS.....	139
GLOSARIO.....	165

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales fertilizantes inorgánicos.....	44
Tabla 2. Principales fertilizantes orgánicos.....	44
Tabla 3. Correlación de las concentraciones de metales pesados en el biosólido de la PTAR El Salitre con las normas RAS, 98 y EPA 503-13 .....	54
Tabla 4. Comparación de los parámetros microbiológicos del biosólido de la PTAR El Salitre según los criterios de la norma EPA 40 CFR 503.....	54
Tabla 5. Características químicas de los biosólidos de la PTAR El Salitre.....	55
Tabla 6. Características físicas de los biosólidos de la PTAR El Salitre.....	55
Tabla 7. Datos físico - químicos de las Zonas de Depósito de Descapote y Estériles, Patios y Relicto de Vegetación.....	61
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del Biosólido de la Planta del Salitre y Estériles de la Cantera Soratama.....	72
Tabla 9. Variables físicas y químicas con las unidades en que se representan, su indicación y el método por el cual se obtienen .....	76
Tabla 10. Comparación del carbono orgánico durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque .....	80
Tabla 11. Comparación de la materia orgánica durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	80
Tabla 12. Comparación del nitrógeno total durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	82

Tabla 13. Comparación de la relación C/N el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación Burbano (1989).....	84
Tabla 14. Comparación del pH durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	86
Tabla 15. Comparación del fósforo disponible durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	89
Tabla 16. Comparación de la conductividad eléctrica durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	91
Tabla 17. Comparación de la saturación de la acidez durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC. ....	92
Tabla 18. Comparación de la C.I.C durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	94
Tabla 19. Comparación del calcio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	96
Tabla 20. Comparación del magnesio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC. ....	98

Tabla 21. Comparación del potasio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	100
Tabla 22. Comparación del sodio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	102
Tabla 23. Comparación del carbono orgánico durante el noveno mes entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque.....	104
Tabla 24. Comparación de la saturación de bases durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.....	106

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona depósito de descapote y zona de depósito de estériles.....	58
Figura 2. Zona de patios, con los estériles remanentes de la explotación.....	59
Figura 3. Relicto de bosque altoandino.....	60
Figura 4. Distribución de las parcelas en el área experimental.....	67
Figura 5. Zanjas para la evacuación del agua.....	67
Figura 6. Delimitación del área experimental.....	68
Figura 7. Nivelación del terreno y trinchos de contención.....	69
Figura 8. Ubicación de los costales hacia la parte norte del terreno.....	69
Figura 9. Elaboración de las mezclas por medio de un Bobcat.....	70
Figura 10. Transporte de las mezclas hacia el área experimental.....	71
Figura 11. Construcción de las parcelas.....	71
Figura 12. Selección de puntos de muestreo para las propiedades físicas y químicas en cada parcela.....	74
Figura 13. Banca utilizada en los muestreos para no compactar el suelo.....	75
Figura 14a. Variación del carbono orgánico (%) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	79
Figura 14b. Variación del carbono orgánico (%) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.....	79
Figura 15a. Variación del nitrógeno total (%) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	81
Figura 15b. Variación del nitrógeno total (%) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo y durante el mismo muestreo.....	82
Figura 16a. Variación de la relación C/N en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	84
Figura 16b. Variación de la relación C/N en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.....	84
Figura 17a. Variación del pH en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	86

Figura 17b. Variación del pH en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.....	86
Figura 18a. Variación del fósforo disponible (ppm) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	88
Figura 18b. Variación del fósforo disponible (ppm) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.....	88
Figura 19a. Variación de la CE (dS/m) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	90
Figura 19b. Variación de la CE (dS/m) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.....	90
Figura 20a. Variación de la C.I.C. (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través el tiempo.....	93
Figura 20b. Variación de la C.I.C. (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo. ....	94
Figura 21a. Variación del calcio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo. ....	96
Figura 21b. Variación del calcio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo. ....	96
Figura 22a. Variación del magnesio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo. ....	98
Figura 22b. Variación del magnesio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo. ....	98
Figura 23a. Variación del potasio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo. ....	100
Figura 23b Variación del potasio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo. ....	100
Figura 24a. Variación del sodio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo. ....	102
Figura 24b. Variación del sodio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo. ....	103

Figura 25a. Variación de las bases totales (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	104
Figura 25b. Variación de las bases totales (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.....	105
Figura 26a. Variación de la saturación de bases (%) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.....	106
Figura 26b. Variación de la saturación de bases (%) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo. ....	106
Figura 27a. Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo.....	108
Figura 27b. Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 a 20 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos.....	108
Figura 27c. Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 20 a 30 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos.....	109
Figura 27d. Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo. ....	109
Figura 28a. Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo. ....	111
Figura 28b. Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 a 20 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos. ....	111
Figura 28c. Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 20 a 30 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos. ....	112
Figura 28d. Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo. ....	112
Figura 29a. Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo. ....	114
Figura 29b. Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 10 a 20 cm durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos. ....	114
Figura 29c. Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 20 a 30 cm durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos. ....	115

Figura 29d. Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo. ....	115
Figura 30a. Variación de la humedad (%) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo. ....	117
Figura 30b Variación de la humedad (%) en la profundidad de 10 a 20 cm durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos. ....	117
Figura 30c. Variación de la humedad (%) en la profundidad de 20 a 30 cm durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos. ....	118
Figura 30d. Variación de la humedad (%) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo. ....	118

## INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Mapa de ubicación de la cantera Soratama.....	142
Anexo 2. Secuencia fotográfica.....	143
Anexo 2a. Panorámica planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre.....	143
Anexo 2b. Subproducto del tratamiento de aguas residuales (biosólidos) .....	143
Anexo 2. Control: c) muestreo 2, d) muestreo 3 y e) muestreo 4.....	144
Anexo 2. Tratamiento 1: f)muestreo 2, g)muestreo 3 y h)muestreo 4.....	145
Anexo 2. Tratamiento 2: i) muestreo 2, j) muestreo 3 y k) muestreo 4.....	146
Anexo 2. Tratamiento 3: l) muestreo 2, m) muestreo 3 y n) muestreo 4.....	147
Anexo 3. Técnicas de laboratorio (variables físicas).....	148
Anexo 4. Tablas estadísticas de las variables físicas y químicas.....	150
Anexo 5. Calificación propiedades químicas (IGAC).....	162
Anexo 6. Calificación propiedades físicas (Montenegro, 2003).....	163
Anexo 7. Datos climatológicos.....	164

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar durante nueve meses, el efecto del biosólido en la recuperación de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva. Para ello, se efectuó un diseño experimental de una vía con tres niveles y tres repeticiones más el control, para un total de 12 parcelas (4 x 4.5 m x 30 cm) dispuestas completamente al azar en el terreno. Posteriormente se realizaron diferentes tratamientos con proporciones medidas en volumen / volumen de Estéril y Biosólido de la siguiente manera: Tratamiento uno (T1) con una proporción de 8:1, tratamiento dos (T2) con una proporción de 4:1, tratamiento tres (T3) con una proporción de 2:1 y las parcelas control sin biosólido. Los resultados mostraron que la adición del biosólido como enmienda orgánica, incrementó significativamente y proporcional a las dosis aplicadas, los contenidos de carbono orgánico, pH, nitrógeno, fósforo, capacidad de intercambio catiónico, bases totales, humedad y porosidad. Inicialmente se presentó un mayor contenido de carbono orgánico en la profundidad de 15 a 30 cm que de 0 a 15 cm, debido al proceso de lixiviación. Gracias a que el biosólido contiene carbonatos de calcio, que favorecieron el incremento del pH, no se evidenció aluminio disponible en las parcelas con biosólidos, que puede llegar a ser tóxico para la vegetación. No obstante, la adición del biosólido generó un aumento paulatino en la salinidad del suelo, lo cual se hace más notorio en el noveno mes. Este experimento indica que el tratamiento tres podría generar más efectos benéficos sobre el suelo debido a que aumentó los contenidos de nutrientes, mejoró las condiciones físicas y se acercó en mayor proporción al suelo menos disturbado del bosque adyacente.

## ABSTRACT

The objective of this research consisted of evaluating during nine months, the effect of the sewage sludge in the recuperation of the physical and chemistries properties of a disturbed soil by extractive activity. For it, an experimental design of one way with three levels and three repetitions plus the control, for a total of 12 parcels (4 x 4,5 ms x 30 cm) ready completely at random in the land. Later different treatments with proportions were made, measures in volume/ volume of sewage sludge and spoil, in the following way: Treatment one (T1) with a proportion of 8 (Spoil): 1 (sewage sludge), treatment two (T2) of 4:1, treatment three (T3) of 2:1 and parcels control without sewage sludge. The results showed the addition of sewage sludge as organic amends, increased significantly and proportional to the applied doses; the organic carbon contents, nitrogen, phosphorus, capacity of cationic interchange, total bases, moisture and porosity. As well, a greater content of organic carbon appeared initially to depth from 15 to 30 cm than 0 to 15 cm, owing leaching process. On account os the sewage sludge contain calcium carbonate that protected to increase the pH, don't make evident aluminium available in the plots with sewage sludge that can't be able to toxic for vegetation. Nevertheless, addition of the sewage sludge generated a gradual increase in the salinity of the soil, that which more notorious in the ninth month. The present experiment indicate that treatment number three, could generate profit effects on the ground in terms of the contribution of nutrients, the recovery of the physical properties and bring nearer at the less disturbed soil of a follow wild.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales factores que ha generado la situación social y económica que ha atravesado el país, son las frecuentes migraciones humanas hacia diversas ciudades, entre ellas Bogotá, la cual ha sido objeto de un acelerado crecimiento de la población principalmente en las últimas décadas, un ejemplo de ello se muestra en el año de 1960 donde había aproximadamente 500.000 habitantes y actualmente existen 7.000.000 millones (Peñalosa, 1974; Villa, 1996; Amortegui, 2003). Dicho crecimiento ha causado una gran demanda de viviendas, vías e infraestructura en general, que ha generado la necesidad de extraer materiales como lo son: gravas, gravillas, arcillas, arenas y piedras; los cuales han sido obtenidos principalmente de las estribaciones de los Cerros nororientales, surorientales y suroccidentales de Bogotá. (Pérez, 1980; Vadillo, 1991; Correa, 2000b; Salamanca & Camargo, 2002; Delgado & Mejía, 2002a; Delgado & Mejía, 2002b).

La industria extractiva a cielo abierto genera y ha generado diversos impactos ambientales durante la explotación y posterior a ella, tales como: 1) alteración de los cauces del agua, 2) procesos erosivos y de remoción en masa, 3) desplazamiento de las especies de la fauna, 4) pérdida de la vegetación y 5) eliminación completa del suelo, ya que se retira tanto su componente orgánico como mineral, entre otros. (Ayala *et al*, 1989; Vadillo, 1991; Delgado & Mejía, 2002a).

Por ello, cuando se termina una explotación se deben implementar diversos métodos correctivos que permitan la recuperación de los elementos y funciones que pierde el ecosistema, mediante la alternativa de ejecutar planes de restauración ecológica. En este sentido, la recuperación de los terrenos afectados por minería es limitada principalmente por la falta de un sustrato edáfico que brinde las condiciones mínimas de fertilidad, para favorecer los estadios sucesionales. (Vadillo, 1991; Bradshaw, 1997; Alcañiz *et.al*, 1998).

Los biosólidos aportan gran cantidad de materia orgánica, macro y micronutrientes, aumentan el pH de los suelos ácidos, la porosidad y la capacidad de retención hídrica, entre otros. Debido a los beneficios que genera pueden ser implementados como fuente orgánica que contribuya a la recomposición de las propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo disturbado en aras de beneficiar el establecimiento vegetal y animal (Sort & Alcañiz, 1996; Alcañiz *et al*, 1998; Wong *et al*, 1998; Sort & Alcañiz, 1999a; Sort & Alcañiz, 1999b; García, 2001; Amezquita, 2002).

El presente trabajo evaluó los cambios en el tiempo de las condiciones edáficas en términos de las variables físico-químicas como: textura, porosidad, densidad aparente, humedad; nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico. Para ello, se realizaron diferentes tratamientos con proporciones medidas en volumen / volumen de Biosólido y Estéril, de la siguiente manera: Tratamiento uno (T1) con una proporción de 8:1, tratamiento dos (T2) con una proporción de 4:1, tratamiento tres (T3) con una proporción de 2:1 y las parcelas control sin biosólido; con el fin de comprobar si dichas dosis contribuyen a recuperar la estructura, los elementos y las funciones de un suelo disturbado por actividad extractiva en la Cantera Soratama de Bogotá.

Tal investigación hizo parte del proyecto piloto “Restauración Ecológica de la Cantera Soratama” en el marco del convenio 017/2003, celebrado entre el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) – Pontificia Universidad Javeriana y también cofinanciado por la empresa Bogotana de Aguas y Saneamiento Ambiental (BAS). En el convenio se encuentran seis trabajos paralelos a este estudio, dos de los cuales están enmarcados en la caracterización de la vegetación y la fauna coleóptera de las zonas adyacentes a la cantera y los otros cuatro, en la sucesión vegetal, en el repoblamiento de la macrofauna edáfica, y en la persistencia de virus y bacterias, sobre los diferentes tratamientos con biosólidos más los controles.

## 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 ANTECEDENTES

#### 2.1.1 Antecedentes Internacionales

Gómez *et al.* (1994), valoraron el efecto del aporte de nitrógeno, fósforo y potasio de un lodo de depuradora, como fertilizante sobre un suelo calizo y lo compararon con un abono químico de las mismas características. Los resultados evidenciaron que el nitrógeno aumentó en el tiempo, así mismo los contenidos de fósforo se redujeron en todos los tratamientos. En conclusión, el biosólido aportó más nitrógeno, que el abono químico y el suelo calizo, pero no mayor cantidad de fósforo ni potasio.

Alcañiz *et al.* (1996), publicaron un manual acerca del manejo de los biosólidos como enmienda orgánica para mejorar los substratos edáficos que resultaban de las explotaciones mineras a cielo abierto para favorecer el desarrollo vegetal. Los autores formularon que los biosólidos pueden ser excelentes en el suministro de los elementos principales para las plantas como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, de igual forma dichos biosólidos aportaban al mismo tiempo hierro y micronutrientes. De la misma manera, por contener concentraciones de carbonato de calcio, mejoraban el pH a condiciones óptimas para bloquear los posibles contaminantes.

Paralelo a lo anterior, recomendaron que en el momento de efectuar los proyectos de restauración del suelo con lodos de depuradora se debe tener en cuenta los principales parámetros edáficos a controlar, como lo son: granulometría, pH, sales solubles, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo y potasio asimilable. De igual forma, expresan que se deben controlar los metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg) y los contaminantes orgánicos (hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, entre otros).

Sort & Alcañiz (1996 - 1999), al evaluar el efecto del biosólido sobre la agregación del suelo con el fin de experimentar si el biosólido contribuía a reducir la erosión en una cantera de calizas, demostraron el efecto benéfico de los biosólidos en el mantenimiento y adecuación de la estructura, debido al incremento en el tamaño medio de los agregados y en el aumento de los poros de aireación y circulación del agua. Así mismo, la erosión medida en las parcelas con biosólidos en ausencia de vegetación representó un 10% menos que en las parcelas con suelo calizo, similar tendencia se evidenció en las parcelas con vegetación.

Alcañiz *et al.* (1998), manifestaron que los estudios generados en Cataluña con lodos de depuradora, se efectuaron con la finalidad de conseguir un sustrato fértil que facilitara la rápida revegetalización de la zona a restaurar y mitigara el control de la erosión. En concordancia, se demostró que los lodos contribuían a: reducir la erosión, aumentar su capacidad de cambio catiónico, descomponer e integrar la materia orgánica al suelo, e inmovilizar los metales pesados al igual que los contaminantes orgánicos. Al contrario, en determinadas circunstancias podrían limitar temporalmente el desarrollo de la vegetación, por el incremento temporal de la salinidad del suelo debido a la fuerte mineralización de la materia orgánica.

Navas *et al.* (1998), tras monitorear la evolución de propiedades físicas y químicas de un suelo Gypsisol después de la aplicación de biosólido, concluyeron que el biosólido favoreció los contenidos de carbono orgánico y nitrógeno, así mismo aumento la humedad y la porosidad. También, contribuyó en la disminución del pH en comparación con el suelo original, que fue calificado como medianamente alcalino.

Wong *et al.* (1998), tras evaluar el efecto del biosólido sobre un suelo arenoso, en términos de la mineralización de nutrientes, encontraron que dicha enmienda orgánica favoreció los contenidos de amonio, nitratos y fosfatos, los cuales incrementaron proporcionalmente con respecto a las dosis aplicadas, además, mejoraron las características del pH. No obstante, la adición excesiva generó un aumento paulatino en la salinidad del suelo y la disminución del porcentaje de mineralización del carbono, nitrógeno y potasio.

García (2001), reestableció la fertilidad de un suelo degradado por efectos de la erosión, basado en las fracciones orgánicas de residuos urbanos o lodos de depuradora. Los resultados permitieron evidenciar que el biosólido incide sobre las propiedades físicas y químicas, debido al aumento en los contenidos de carbono orgánico y por tanto de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, porcentaje de poros, capacidad de retención hídrica. A su vez incrementa los contenidos de salinidad del suelo.

Alcañiz (2001), indicó que la aplicación de lodos supone un aumento proporcional de acuerdo a la dosis de aplicación, sobre los metales pesados como el Zn, Pb, y Cu, mientras que para el Ni, Cd, y Cr, no detectaron incrementos significativos. A su vez, los contaminantes orgánicos se degradaron progresivamente o se volatilizaron, la materia orgánica se mineralizó pero posteriormente hubo un incremento por los aportes de la vegetación, las concentraciones de nitratos aumentaron al poco tiempo de aplicación, pero disminuyeron consecutivamente. De igual manera, los contenidos de fósforo total fueron elevados y cambiaron relativamente poco en cinco años.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

En Colombia, han sido pocos por no decir que ninguno, los estudios acerca de la aplicación de biosólidos para la recuperación de suelos de canteras. Sin embargo, dicha recuperación se ha basado en el recubrimiento del terreno deteriorado con un substrato orgánico, para dar inicio a procesos de revegetalización (Correa, 2000a; Amezcuita, 2002).

Amezquita (2002), efectuó un trabajo de tipo investigativo con la finalidad de evaluar el uso potencial de los biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, en la recuperación del suelo degradado por actividad extractiva en la Cantera La Fiscala.

Para ello, aplicó un sustrato de mezcla entre biosólido y tierra de cobertura orgánica en las siguientes proporciones: 100% biosólido; 75% biosólido y 25% tierra; 50% biosólido y 50% tierra; 25% biosólido y 75% tierra; 100% tierra de cobertura orgánica.

Los resultados obtenidos equivalen proporcionalmente al porcentaje de biosólido aplicado, los cuales indicaron que la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el fósforo, el calcio y el potasio se incrementaron. Así mismo, la textura del suelo en cada tratamiento presentó una tendencia de franco-arenoso a franco arcilloso, y el pH se mantuvo extremadamente ácido en todos los tratamientos, a excepción del 100% de biosólido.

Pacheco & Patiño (2003), evaluaron la aplicación de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, en la revegetalización del Relleno Sanitario Doña Juana. Para ello, midieron factores microbiológicos (Coliformes Fecales), Bioacumulación de metales pesados en la especie *Pennisetum clandestinum*, y propiedades físicas y químicas del suelo a través de un sustrato de mezcla entre biosólido y tierra de cobertura orgánica en las siguientes proporciones: 100% biosólido; 75% biosólido y 25% tierra; 50% biosólido y 50% tierra; 25% biosólido y 75% tierra; 100% tierra de cobertura orgánica.

Los resultados en cuanto a las propiedades edáficas del suelo arrojaron que los contenidos de carbono orgánico, nitrógeno, capacidad de intercambio catiónico y humedad aumentaron de manera substancial con la adición de biosólidos; el fósforo total aumentó inicialmente pero con el tiempo decreció debido a la utilización de este elemento por parte de la vegetación y de los microorganismos; el pH se neutralizó pero a través del tiempo se acidificó debido a los procesos de degradación de la materia orgánica; la salinidad incrementó, sin embargo disminuyó en el tiempo tal vez por efecto del lavado de las aguas lluvias; la porosidad fue muy alta, dificultando el contacto entre el suelo y las raíces, la densidad aparente y real disminuyeron con la aplicación de biosólidos, lo cual generó una menor compactación del suelo.

## **2.2 DISTURBIOS COMO CAUSA DE LA TRANSFORMACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS**

### **2.2.1 Concepto de Disturbio**

El concepto de disturbio ha sido definido por varios autores entre la década de los 70 y 80 del siglo pasado. Entre ellos, Whittaker (1975) planteó que los disturbios generan cambios en la oferta de los recursos, mientras que Grime (1979) los definió como el conjunto de mecanismos que restringen el aumento de la biomasa en la vegetación; de igual manera, Sousa (1984) propone que son eventos irregulares, que ocasionan cambios drásticos en la estructura de las comunidades. Actualmente la definición más aceptada corresponde a que son eventos discretos que rompen parcial o totalmente la estructura y función de los compartimentos del ecosistema, debido a que se generan cambios en la diversidad y abundancia de especies, en la biomasa vegetal, en la disponibilidad de recursos y sustratos (Pickett & White, 1985; Mooney & Godrón, 1983).

### **2.2.2 Tipos de disturbios**

De acuerdo al origen, los disturbios son clasificados en: 1) Naturales y 2) Antrópicos. Los primeros son dados por condiciones naturales del ambiente tales como: huracanes, terremotos, tormentas, glaciaciones, entre otros, mientras que los segundos son generados por actividades del hombre como lo son: la explotación minera, la agricultura, el pastoreo, las plantaciones forestales (Bazzas, 1983; Chapin, 1983; Canham & Marks, 1985). Dichos disturbios afectan en mayor o menor medida los compartimentos del ecosistema, lo cual depende del área afectada, la frecuencia, la duración de tiempo y la magnitud (Bazzas, 1983; Runkle, 1985; Sousa, 1984).

### **2.2.3 Efectos del disturbio**

En concordancia con lo anterior, el tipo y las características del disturbio generan aspectos favorables y desfavorables temporalmente y a largo plazo en el ecosistema. En primer lugar los aspectos favorables se evidencian en el aumento de la luz, el agua y los nutrientes del suelo, los cuales contribuyen al establecimiento y mantenimiento de la diversidad de las especies, y en segundo lugar los aspectos no benéficos se manifiestan en la alteración de los recursos y del sustrato, cambios en el ciclaje de nutrientes, incrementó en la tasa de migración y extinción, disminución de las abundancias relativas de las especies, entre otros efectos (Chapin, 1983; Sousa, 1984; Canham & Marks, 1985; Pickett & White, 1985).

### **2.2.4 Disturbios de los Cerros Orientales de Bogotá**

Los cerros orientales de Bogotá han sido afectados por disturbios de tipo natural como incendios forestales, lluvias de cenizas volcánicas y glaciaciones, los cuales han contribuido en la formación del suelo y en la incorporación de nutrientes; y antrópicos como la deforestación, el pastoreo, los incendios, la apertura de vías y las canteras, éstas últimas han causado gran daño en el compartimiento del suelo, debido a la eliminación de la capa orgánica, el lavado de nutrientes, la compactación, la contaminación y en la pérdida total del suelo. (Bradshaw, 1997; Barrera & Ríos, 2002; Salamanca & Camargo, 2002).

## **2.3 LA MINERIA A CIELO ABIERTO COMO UN TIPO DE DISTURBIO**

### **2.3.1 Definición de la industria minera**

La industria minera es una clase de disturbio que tiene como propósito la extracción subterránea y a cielo abierto de metales y piedras preciosas (oro, plata, platino, esmeraldas), minerales no metálicos (sal terrestre, arenas, arcillas, calizas, azufre), minerales metálicos (ferróníquel, mineral de hierro, cobre), minerales combustibles como el carbón, entre otros (Ayala *et al*, 1989; Correa, 2000a; Uribe, 1996; Minminas & Upme 2002).

Las canteras son definidas como un sistema de explotación a cielo abierto que permite la extracción de arenas, arcillas, gravas y piedra, que por sus características físicas, químicas y mecánicas, son útiles en la industria de la construcción (Ayala *et al*, 1989; Ortiz, 1992; Correa, 2000b).

### **2.3.2 Extracción de los minerales e impactos sobre el ecosistema**

La obtención de los materiales para la construcción se efectúa con la retirada y almacenaje del descapote y si es posible de los diferentes horizontes del suelo, posteriormente se extrae el material útil para la construcción desde la parte superior del cerro hacia la parte baja, mediante la realización de estructuras de banqueo o terraceo para evitar el desprendimiento y desplome del substrato y a su vez se realizan canales alternos a las terrazas para manejar las aguas de escorrentía (Ayala *et al*, 1989; Correa, 2000a; Delgado & Mejía, 2002b)

En las actividades realizadas por la minería se generan impactos negativos sobre los diferentes ecosistemas, que se acrecientan debido al incorrecto manejo en la explotación. Entre los impactos más relevantes se puede encontrar:

1. Disminución o pérdida total de la flora, que origina fluctuaciones diarias de humedad y temperatura. Así mismo, ocasiona la pérdida del hábitat que influye en la reducción de la fauna, debido a la dispersión y concentración hacia otros lugares.
2. Eliminación total del suelo, que deja un substrato con concentraciones mínimas o ausentes de materia orgánica. A su vez, se presenta una disminución en la porosidad y la capacidad para retener agua, aumenta la densidad aparente y por tanto la compactación y se incrementan los procesos erosivos y de remoción en masa.
3. Transformación en las geoformas del paisaje debido a los procesos de extracción que origina cambios en los grados de inclinación, lo cual provoca inestabilidad, desplomes y hundimientos del terreno; y genera modificaciones en el drenaje superficial, al igual que incrementos en el material particulado que se concentra sobre los cuerpos de agua y sobre la atmósfera.

4. Como problemática social se presenta el riesgo de derrumbes del material inestable que queda por efectos de la extracción minera, hacia los habitantes que se concentran alrededor de las canteras (Ayala *et al*, 1989; Correa, 2000a; Salamanca & Camargo, 2002).

### **2.3.3 Impacto de la minería sobre el compartimiento del suelo**

En las actividades que se realizan para la extracción de materiales, se elimina completamente el suelo, el cual debe ser almacenado adecuadamente en pilas para conservarlo y usarlo posteriormente en los procesos de recuperación. De lo contrario, se reducen las posibilidades de éxito al implementarlos de nuevo en las áreas donde se desarrolló la explotación (Ayala *et al*, 1989; Vadillo, 1991).

La eliminación del suelo deja sobre el terreno afectado un sustrato mineral que presenta una alteración de la estructura, función y uso, que se evidencia en la transformación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, tales como:

1. pH: De acuerdo a los valores se puede generar mayor o menor disponibilidad de nutrientes para las plantas acorde a sus requerimientos. A su vez, se pueden originar suelos extremadamente ácidos o alcalinos; los primeros causan problemas a la vegetación, porque liberan elementos tóxicos (aluminio, manganeso, cobre, etc) y porque concentran mayores cantidades disponibles de metales pesados (selenio, cromo, níquel y cadmio), mientras que los segundos ocasionan problemas de toxicidad por exceso de sodio principalmente, además de limitar la disponibilidad de algunos nutrientes, como el hierro o el fósforo.
2. Disminución de las proporciones de macro y micronutrientes, (N, P, K, S, Na, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, entre otros) debido a la pérdida de la materia orgánica y al declive de los microorganismos que la descomponen, dando como resultado deficiencias y/o retardo en las plantas.

3. La pérdida de la materia orgánica, incrementa los procesos erosivos y de remoción en masa. De igual manera, se compacta el terreno reduciendo el espacio poroso, porque mitiga el oxígeno del suelo y la circulación de gases, viéndose esto reflejado en la disminución de los microorganismos y la respiración de las raíces
4. Exposición de material rocoso a condiciones climáticas severas como vientos, fluctuaciones de temperatura, alta radiación, entre otros, lo cual crea condiciones adversas no sólo para el desarrollo inicial de las plantas, sino para la formación del suelo por la biota edáfica y por aporte orgánico de la misma vegetación (Chapin, 1983; Porta & López, 1993; Bradshaw, 1997; Alcañiz *et al*, 1998).

#### **2.3.4 Aspecto legal**

En Colombia existe actualmente en normatividad minera el Código de Minas (Ley 685 de 2001), que propone "estimular las actividades mineras en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país." (Correa & Correa, 2003)

El Código de Minas y la legislación establecida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial exige al sector minero como primero medida un estudio de impacto ambiental para definir medidas de prevención y corrección del proyecto, posteriormente basado en éste estudio la autoridad competente otorgará o negará una Licencia Ambiental (Resolución 222 de 1994) y así mismo, la solicitud de un plan de manejo, recuperación o restauración ambiental, la cual no podrá ser superior a ocho años, (Resolución 1277 de 1996) además impondrá una póliza minero-ambiental de cumplimiento (Art. 60) entre otras leyes (Hernández, 1996; Correa & Correa, 2003).

## **2.3.5 Situación de la Minería Colombiana**

### **2.3.5.1 Situación Nacional**

De las 6.737 minas inventariadas en el país 3.409 son canteras dedicadas a la extracción de materiales para la construcción, de las cuales la mayor demanda ocurre para las arenas y gravas con un 50%, seguidas de las arcillas con un 35%, las calizas con un 11% y por último las rocas ornamentales con un 4% (Cárdenas & Duitama, 2001).

### **2.3.5.2 Situación en Bogotá**

La minería de gran magnitud constituye un 10% y es desarrollada en la localidad de Tunjuelito, seguida de una mediana minería que representa el 17% en las zonas de Usaquén, Usme, Ciudad Bolívar y una pequeña minería que constituye el 73% restante de las actividades (Delgado & Mejía, 2002a).

Existen 144 predios con industrias extractivas entre canteras, ladrilleras, chircales y areneras, los cuales se encuentran distribuidos por zonas de la siguiente manera: Rafael Uribe con 39 predios, San Cristóbal con 19, Tunjuelito con 7 y Usaquén con 16. En esta última zona se encuentran siete industrias activas, cinco inactivas y cuatro abandonadas (Delgado & Mejía, 2002a).

El Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), lleva a cabo un plan de acción frente a la situación minera de Bogotá, con el fin de incorporar los 144 predios al entorno urbano, a través de las técnicas y estrategias que ofrece la restauración ecológica (Delgado & Mejía, 2002a).

## **2.4 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA COMO ESTRATEGIA DE RECUPERACIÓN DE ECOSISTEMAS DISTURBADOS.**

### **2.4.1 Definiciones de ecología de la restauración y restauración ecológica**

Dado que las actividades extractivas suponen una fuerte alteración sobre las comunidades y ecosistemas, la recuperación de las zonas afectadas se pueden explicar y organizar teniendo en cuenta los principios básicos de ecología de la restauración.

En este sentido, la ecología de la restauración es una ciencia que tiene como objetivo “estudiar, analizar e interpretar” los procesos que ocurren durante la restauración en un área disturbada; mientras que la restauración ecológica consiste en la aplicación de técnicas y estrategias para el reestablecimiento total o parcial de la estructura y función de ecosistemas disturbados, tomando como punto de referencia los ecosistemas predisturbios, con el fin de llevarlos a su estado original, aprovechando los mismos procesos ecológicos que se dan en la zona a restaurar (Brown & Lugo, 1994; MacMahon, 1997; Barrera & Ríos, 2002). Es decir, en cierta manera la restauración, pretende crear unas condiciones iniciales favorables, a partir de las cuales se pueda reestablecer el ecosistema disturbado de manera natural.

### **2.4.2 Definiciones de recuperación y rehabilitación ecológica**

Como la restauración de los ecosistemas disturbados en muchas ocasiones no permite llegar a las condiciones originales, investigadores de la ecología de la restauración han propuesto otros conceptos que consideran la teoría ecológica y pueden ser enmarcados como etapas menos complejas de la restauración ecológica tales como:

- *Rehabilitación*: hace referencia al retorno de un ecosistema transformado o degradado a un ecosistema totalmente funcional, que no necesariamente debe ser igual al original (Brown & Lugo, 1994; MacMahon, 1997). Paralelo a ello, Salamanca y Camargo (2002) retoman este concepto para explicar que la rehabilitación es el reestablecimiento de los procesos ecológicos que permite que los ecosistemas deteriorados se mantengan y regeneren por sí solos.
- *Recuperación*: se refiere a la recuperación de un elemento, productividad o función biótica sobre un sitio degradado severamente, sin necesidad de llegar a las condiciones y características iniciales antes del disturbio (Brown & Lugo, 1994; MacMahon, 1997). De igual manera Salamanca y Camargo (2002), sintetizan que la recuperación es el intervalo de la restauración que va de ecosistemas degradados a ecosistemas productivos para la obtención de bienes o servicios ambientales.

## **2.5 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE CANTERAS**

La restauración de canteras se lleva a cabo debido a que la regeneración natural del ecosistema resultante se da en períodos de tiempo muy prolongados; en especial si el substrato no aporta condiciones óptimas de fertilidad (como es el caso de las arenas) y los estados del medio como la temperatura, la radiación solar, los vientos, las precipitaciones, los deslizamientos y derrumbes, son adversos para propiciar un ambiente favorable que induzca al establecimiento de la vegetación y de otros organismos que contribuyen en la formación del suelo (Alcañiz *et al*, 1996; Bradshaw, 1997; Salamanca & Camargo, 2002).

### **2.5.1 Restauración de los compartimentos del ecosistema**

Paralelo a lo anterior, la restauración de terrenos afectados por minería debe cumplir el objetivo de restaurar zonas en términos de los compartimentos del ecosistema, lo cual consiste en estabilizar los taludes en el caso de que la

explotación no haya sido efectuada mediante terrazas, a su vez es indispensable manejar la escorrentía superficial para evitar el arrastre de las partículas minerales y el substrato orgánico que posteriormente se vaya a emplear para recuperar el suelo; en este sentido, se puede utilizar la misma tierra y cobertura que se sustrajo al principio de la explotación o a través de la implementación de enmiendas orgánicas como, compost, humus, biosólidos entre otros, por último, implementar vegetación que posea características típicas de estrategia r, que permitan mantenerse en el ecosistema y a su vez favorecer la llegada y el establecimiento de otras especies. (Ayala *et al*, 1989; Hernández, 1996; Barrera & Rios, 2002; Salamanca & Camargo, 2002).

## **2.6 PROPIEDADES EDÁFICAS DEL COMPARTIMIENTO DEL SUELO A RECUPERAR**

### **2.6.1 Definición de un suelo**

Un suelo es un sistema natural desarrollado a partir de una mezcla de minerales (arcillas, limos y arenas) y restos orgánicos (residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición) bajo la influencia de factores formadores (clima, pendiente, medio biológico) y del tiempo. Así mismo, se diferencia en horizontes y se le atribuyen funciones que consisten en suministrar oxígeno, agua, sustancias nutritivas y anclaje mecánico para las plantas (Soil survey, 1962; Thompson, 1974; Porta & Lopez, 1993; Kim, 1996).

### **2.6.2 Importancia de la materia orgánica**

La materia orgánica del suelo es un indicador importante para determinar las funciones del suelo en términos agrícolas y ambientales, debido a que participa activamente en la formación del suelo y en la relación suelo-planta-microorganismos, al influir en las propiedades edáficas del suelo. Prácticamente, todas las características del suelo se ven en mayor medida influenciadas por la presencia y el tipo de materia orgánica. Dicha materia sufre un proceso esencial

denominado mineralización, que consiste en la transformación de un elemento en forma orgánica a una inorgánica. De igual manera, se genera un proceso inverso, donde existe una inmovilización temporal de los nutrientes por parte de la biomasa microbiana para su metabolismo. (Thompson, 1974; Porta & Lopez, 1993; Burbano, 1989; Navarro & Navarro, 2002).

### **2.6.3 Efectos de la materia orgánica sobre el suelo**

Los principales efectos benéficos de la materia orgánica se dan sobre ciertas propiedades del suelo, tales como:

#### *2.6.3.1 Propiedades Físicas:*

La materia orgánica favorece la estructuración del suelo debido a la formación y estabilización de los agregados que permite mitigar los procesos erosivos. Por otra parte, al disminuir la densidad aparente se reduce la compactación del suelo, aumenta el porcentaje de poros, lo cual mejora la aireación, la circulación del agua y el enraizamiento de las plantas, a su vez la textura incrementa el almacenamiento de los nutrientes y del agua. Paralelo a esto, es importante tener en cuenta que un mismo suelo puede presentar distintas densidades debido a la cantidad de materia orgánica y volumen de poros que contenga (Thompson, 1974; Porta & López, 1993; Burbano, 1989; Montenegro, 2003).

#### *2.6.3.2 Propiedades Químicas:*

Al descomponerse la materia orgánica, suministra al suelo intercambio de cationes, que favorece el almacenamiento de los nutrientes, inactivación de un gran número de contaminantes orgánicos; proporciona elementos nutricios que cumplen funciones definidas en la planta para su crecimiento y desarrollo, los cuales se encuentran de tres maneras en el suelo: 1) De forma no asimilable, 2) De forma intercambiable y 3) en solución (fácilmente asimilable en el suelo). La primera forma es aquella en la cual el elemento se encuentra combinado formando parte de un

compuesto que no es accesible a la absorción de las plantas hasta que el elemento no se descompone o se libere de la matriz donde se establece; la segunda forma se da cuando alguno de los elementos se presenta como catión o anión en la superficie de los compuestos orgánicos o de las arcillas, y la tercera se presenta cuando el elemento está disuelto totalmente en el agua, siendo mayor la movilidad en algunos elementos y por ende siendo disponible para la vegetación o insuficientes debido a que en términos generales se pueden perder por lixiviación, volatilización o erosión (Thompson, 1974; Burbano, 1989; Porta & López, 1993; Navarro & Navarro, 2002).

Algunos atributos químicos influenciados directamente por la presencia de materia orgánica son:

a) Nitrógeno:

Proviene de la atmósfera como nitrógeno gaseoso que es fijado principalmente por algunas bacterias. A su vez, el primer producto resultante de la descomposición de proteínas, aminoácidos y otros compuestos de la materia orgánica es el amonio ( $\text{NH}_4$ ), el cual se transforma primero en nitrito ( $\text{NO}_2$ ) gracias a las bacterias del género nitrosomonas y posteriormente se convierte en nitrato ( $\text{NO}_3$ ) mediante la acción del género nitrobacter. Así mismo, la conversión del nitrato en nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ) incorporado de nuevo a la atmósfera se denomina desnitrificación (Thompson, 1974; Porta & López, 1993; Navarro & Navarro, 2002; Ramírez, 2003).

El cambio del nitrógeno a formas orgánicas o inorgánicas está gobernado principalmente por la relación C/N de la materia orgánica que se descompone. En este sentido a medida que la relación carbono a nitrógeno es mayor a 25, se produce una inmovilización del nitrógeno como resultado del aumento de la población y actividad microbiana y si dicha relación es inferior a 25, se favorece la descomposición de la materia orgánica. (Thompson, 1974; Porta & López, 1993; Burbano, 1989).

b) Fósforo:

Las plantas absorben el fósforo en forma inorgánica gracias a la mineralización como ión monovalente  $\text{H}_2\text{PO}_4$  (fosfato), que se encuentra principalmente en la materia orgánica, los microorganismos y algunos minerales. Dicho elemento al ser muy reactivo principalmente con el hierro, aluminio, manganeso, caolinita, complejos de humus-Al, entre otros, no permanece disponible para las plantas; sin embargo la aplicación de otros nutrientes como el calcio, el azufre y el amonio, pueden incrementar la disponibilidad del fósforo. (Thompson, 1974; Burbano, 1989; Navarro & Navarro, 2002).

c) Calcio – Magnesio – Potasio – Sodio:

Debido a que estos nutrientes se presentan en el suelo como cationes, son gobernados por los fenómenos del intercambio catiónico que se generan en la superficie de las diferentes clases de arcillas y en la materia orgánica. Así mismo el ión calcio se halla más retenido en la superficie absorbente de las arcillas que el magnesio, por esta razón el magnesio es desplazado con más facilidad que el calcio; mientras que el sodio y el potasio están unidos por una sola carga, siendo más fácilmente movilizados que los iones divalentes (Thompson, 1974; Álvarez, 1979; Burbano, 1989).

d) pH:

El grado de acidez o alcalinidad de un suelo indica las cantidades relativas de iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  que contiene la solución del suelo. En este sentido, dado que el pH condiciona la solubilidad de un gran número de elementos, esta variable explica las condiciones de fertilidad de un suelo en términos de los elementos disponibles a cierto pH. Entonces, la mineralización del nitrógeno orgánico en su máxima expresión se genera en un pH de 6 a 8, la del fósforo entre 6.5 a 7.5; la del hierro y aluminio por debajo de 5.5; potasio asimilable por encima de 8.5, calcio y magnesio entre 6.5 a 8.5 y sodio por encima de 8.0 u 8.5 (Thompson, 1974; Álvarez, 1979; Porta & López, 1993; Navarro & Navarro, 2002).

e) Acidez intercambiable:

Constituida por el aluminio, el cual resulta tóxico en condiciones solubles para las plantas en valores de pH por debajo de 5.5, que disminuye la disponibilidad del fósforo y la absorción del calcio, magnesio, potasio hierro y boro. Por esta razón, se aumenta el pH del suelo por medio de cal o carbonatos de calcio, para inhibir la disponibilidad del aluminio (Thompson, 1974; Álvarez, 1979; Espinosa, 2003).

f) Conductividad eléctrica:

Se correlaciona con la salinidad de una muestra en condiciones de saturación de agua, es decir, si hay gran cantidad de sales (cloruros, nitratos, fosfatos, sulfatos, carbonatos) retenidas en el agua genera deficiencia en la absorción de nutrientes y la disponibilidad del agua para el crecimiento y desarrollo de las plantas. (Thompson, 1974; Álvarez, 1979; García, 2003).

*2.6.3.3. Propiedades Biológicas:*

Cuando la materia orgánica contiene cantidades óptimas de humedad, se estimula la actividad biológica de los microorganismos que la descomponen o mineralizan y que a su vez se favorecen por los nutrientes que le son proporcionados. Por otro lado, la acidez y las temperaturas bajas pueden restringir la actividad de la mayoría de los microorganismos del suelo (Thompson, 1974; Porta & López, 1993; Burbano, 1989; Espinosa, 2003).

La mayoría de las propiedades mencionadas anteriormente, se encuentran afectadas en mayor o menor medida por la presencia de la materia orgánica del suelo. Por esta razón, el uso de enmiendas orgánicas resulta aconsejable en trabajos de restauración de suelos degradados, en especial cuando la fracción orgánica ha sido eliminada totalmente.

## **2.7 ENMIENDAS EDÁFICAS COMO ELEMENTO PARA MEJORAR LAS CONDICIONES DEL SUELO.**

En condiciones de baja fertilidad natural el suelo no proporciona los nutrientes suficientes para el adecuado desarrollo de la cubierta vegetal; por esta razón es necesario suplir las deficiencias nutricionales propias del suelo por medio de enmiendas edáficas (Ayala *et al*, 1989; Graetz, 1992; Simpson, 1999).

### **2.7.1 Tipos de enmiendas edáficas de acuerdo a su composición**

#### *Tipo Orgánico:*

Se basa en el suministro de un sustrato orgánico como: Tierra vegetal, turbas, estiércol, humus, biosólidos, etc., los cuales no sólo proporciona nutrientes continuamente sino que contribuye a modificar las condiciones físicas del suelo, al mejorar la capacidad de retención del agua, la aireación, el pH, la capacidad de intercambio catiónico que reduce el lavado de nutrientes, entre otros. (Ayala *et al*, 1989; Graetz, 1992; Simpson, 1999).

#### *Tipo inorgánico:*

Consiste en la aplicación directa de compuestos que contienen macronutrientes y micronutrientes que actúan inmediatamente en el suelo. Es decir, que la biodisponibilidad de los elementos nutritivos contenidos en estas enmiendas depende de la rapidez de su liberación, que por lo general es más rápida que la de las enmiendas orgánicas. Ello puede suponer un mayor riesgo de lixiviación de nutrientes, especialmente en suelos arenosos de zonas lluviosas, lo cual genera la contaminación de las aguas freáticas. (Ayala *et al*, 1989; Graetz, 1992; Simpson, 1999).

### 2.7.2 Fuentes de sustancias minerales y sustratos orgánicos

Las sustancias minerales y sustratos con materia orgánica pueden ser proporcionadas por una amplia variedad de fuentes, las cuales algunas como el compost, el humus y los purines no se encuentran en suficiente cantidad para recuperar las extensas áreas descubiertas que quedan después de una explotación minera, lo cual podría aumentar los costos de una restauración (Tabla 1 y 2).

**Tabla 1.** Principales fertilizantes inorgánicos.

#### FERTILIZANTES MINERALES

<u>Nitrógenados</u>	<u>Fosfatos</u>	<u>Potásicos</u>
Nitrato amónico	Fosfato de amonio	Cloruro potásico
Urea	Ácido fosfórico	Sulfato potásico
Sulfato de amonio	Superfosfato triple	Nitrato potásico
Cloruro amónico	Mineral o roca fosfórica	Carbonato potásico
Nitrato de sodio		
Amoniaco		

Fuente: Ayala *et al*, 1989.

**Tabla 2.** Principales fertilizantes orgánicos

#### FERTILIZANTES ORGÁNICOS

Abonos	Turbas	Compost
Residuos de hongos	Purines	Biosólidos
Residuos domésticos	Humus	Estiercol

Fuente: Ayala *et al*, 1989.

## **2.8 BIOSÓLIDOS Y SU USO COMO ENMIENDA ORGÁNICA**

### **2.8.1 Definición**

Los biosólidos: son sólidos obtenidos como subproducto del tratamiento de aguas residuales, que contienen materia orgánica estabilizada mediante un proceso biológico, físico o químico, con el fin de reducir el volumen de patógenos, humedad y olores. (BAS, 2002).

### **2.8.2 Clasificación**

Dicho subproducto se clasifica en tipo A y B con respecto a la reducción de patógenos, tal y como lo propone la norma 503 de la Agencia de protección Ambiental (EPA). En este sentido, los biosólidos de clase A pueden ser utilizados sin ninguna restricción en cultivos de consumo directo por lo cual se consideran de excelente calidad, mientras que los de clase B, poseen ciertas condiciones que no los hacen aptos para utilizarlos en consumo directo (EPA, 1995).

### **2.8.3 Alternativas de aprovechamiento**

Los biosólidos pueden ser aprovechados en diferentes tipos de usos entre los cuales se encuentran:

- 1) Recuperación de terrenos,
- 2) Reforestación,
- 3) Separadores de vías,
- 4) Biorremediación de suelos contaminados,
- 5) Elaboración de materiales de construcción,
- 6) Floricultura,
- 7) Cobertura de rellenos sanitarios, entre otros (BAS, 2002).

Cuando los biosólidos no son utilizados en algunos de los usos indicados, son depositados de tres maneras:

- 1) Codisposición: hace referencia a la mezcla de biosólidos con residuos sólidos urbanos los cuales son ubicados en rellenos sanitarios.
- 2) Monodisposición: consiste en la disposición de biosólidos en rellenos exclusivos.
- 3) Incineración: está determinada por la reducción en volumen del biosólido lo cual deja como resultado final un substrato de cenizas (BAS, 2002).

#### **2.8.4 Uso y disposición Internacional**

En países como Francia, Estados Unidos, Irlanda y España, entre otros, han reutilizado el biosólido como abono o enmienda orgánica para la agricultura y la recuperación de terrenos principalmente. Por otro lado, en la Comunidad Europea el 37% de los lodos se recicla en la agricultura; el 44% se deposita en vertederos, el 9% se destina a incineración, el 7% se vierte directamente al mar y el 3% restante tiene diversos destinos (FRET, 2001).

#### **2.8.5 Utilización a nivel Nacional**

Los principales destinos que se le han dado a los biosólidos en Colombia son: 67% para cobertura final, 29% para recuperación de suelos, 1% para aprovechamiento forestal y agrícola. (Daguer, 2003).

Las principales Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del país como El Salitre en Bogotá; San Fernando en Medellín, Cañaveralejo en Cali, y Río Frío en Bucaramanga, han utilizado los biosólidos con diferente propósito, tales como:

- Preparación de compostaje
- Biorremediación de suelos contaminados
- Aprovechamiento forestal
- Recuperación de suelos degradados
- Indicadores de contaminación fecal en lodos y biosólidos
- Aprovechamiento agrícola de biosólidos

- Aprovechamiento de biosólidos como agregado fino en mezclas de concreto (Daguer, 2003).

### **2.8.6 Requerimientos del biosólido y terrenos a recuperar.**

Alcañiz y colaboradores (1996), en el manual de restauración de zonas afectadas por actividad minera, recomiendan los siguientes requisitos con el fin de descartar tierras demasiadas permeables que no puedan retener posibles lixiviados de los lodos y así mismo, garantizar una correcta incorporación de la materia orgánica a las partículas minerales del suelo.

#### **a) Condiciones de la tierra o estériles**

Con respecto a la tierra o estériles a ser restaurados con lodos, debe tenerse en cuenta algunos parámetros físico-químicos como: materia orgánica, pH, con un rango de 5.5 a 7, textura o fracción fina máximo del 20%; elementos gruesos menores de 50%; así mismo la salinidad debe ser menor de 2dS/m, debido a que el biosólido aumenta temporalmente este factor por efectos de la mineralización, además las condiciones climáticas no deben ser áridas o de lo contrario incrementaría las concentraciones de sales. Por otro lado, recomiendan restaurar el suelo con una profundidad entre 20 a 30 cm, con el fin de asegurar una cubierta vegetal herbácea y para no sobrecargar el suelo de nutrientes y posibles contaminantes (Alcañiz, *et al*, 1996; Alcañiz, *et al*, 1998).

#### **b) Requisitos del biosólido**

Para recuperar los terrenos o suelos se recomienda emplear biosólidos de origen domésticos, ya que tienen menos concentraciones de metales pesados y patógenos, los cuales hayan pasado por un proceso de estabilización biológica o físico-química de los componentes orgánicos, para que la materia orgánica permanezca bastante estabilizada y se mitiguen los problemas de malos olores y de excesiva descomposición inicial en el suelo; a su vez, el biosólido debe pasar por un tratamiento de espesamiento y deshidratación para reducir el contenido de agua

final. En este sentido los biosólidos que tengan un 18% de materia seca, se comportan como sólidos pastosos que pueden ser manipulados con la maquinaria habitual de una cantera. Además, la materia orgánica no debe sobrepasar un valor del 70%, ya que es un indicio de que no está suficientemente digerida, de igual forma es importante conocer su contenido de compuestos y elementos potencialmente tóxicos (Alcañiz *et al*, 1996; Alcañiz *et al*, 1998).

### **2.8.7 Tipos de mezcla de los biosólidos y tierra o estéril**

Después de tener en cuenta los requisitos que deben cumplir tanto los terrenos a recuperar como los biosólidos que pueden ser implementados, la aplicación de éstos lodos no puede ser utilizados en la restauración de una cantera sin ser mezclados o incorporados al suelo.

Por esta razón, se efectúan tres tipos de mezclas que consisten en: a) Mezcla en lecho de tierra; en el cual se prepara una capa uniforme de la tierra o estériles donde posteriormente se descargarán los lodos, procurando que queden bien esparcidos. b) Aplicación directa y mezcla; como su nombre lo dice se realiza una aplicación directa del biosólido en el terreno plano que luego es arado para incorporarlo al suelo; este tipo de mezcla es principalmente utilizado para la agricultura, y c) Mezcla previa, es el método más utilizado porque homogeniza la mezcla de tierra ó estéril y el lodo mediante una pala mecánica que amontona en una pila la mezcla para luego extenderla sobre el terreno (Alcañiz *et al*, 1998).

### **2.8.8 Efecto del biosólido como enmienda orgánica de suelos**

#### **2.8.8.1 Aspectos favorables**

Debido al aporte de materia orgánica, la aplicación de biosólidos mejora las propiedades físicas y químicas del suelo porque contribuye entre otras cosas a:

- Reducir la densidad aparente del suelo.

- Promover la estabilidad de los agregados del suelo y la estructura del mismo.
- Aumentar la porosidad y la capacidad de retención hídrica que genera un mejor crecimiento de las raíces.
- Disminuir la erosión.
- Presenta concentraciones altas de los nutrientes más importantes para las plantas (nitrógeno y fósforo), los cuales contribuyen al desarrollo de la vegetación.
- A la vez, contiene grandes cantidades de biomasa microbiana de origen fecal, que favorece los procesos de mineralización lo cual contribuye al aporte de elementos nutricios para la vegetación y energía para la misma vida microbiana.
- Incrementan la C.I.C. en el suelo, que mantiene disponible los nutrientes como el potasio, el calcio, el sodio y el magnesio a lo largo del tiempo.
- Presenta valores de pH neutro a ligeramente alcalino, lo cual influye en la disponibilidad del aluminio y de otros elementos (Sort & Alcañiz, 1996; Alcañiz, 2001; Amezquita, 2002).

#### **2.8.8.2 Aspectos desfavorables**

Una excesiva implementación de biosólidos, puede generar un incremento en los compuestos nitrógenados que pueden lixiviarse, contaminando los cuerpos de agua. Sin embargo, esta pérdida no se da tan rápido, como si ocurre con los fertilizantes químicos, que presentan un mayor riesgo de contaminación. Así mismo, el biosólido concentra sales que pueden limitar la toma de agua y nutrientes en algunas especies de tipo vegetal (EPA, 1995).

De acuerdo a la procedencia ya sea de aguas domésticas, industriales o mixtas, los biosólidos contienen en mayor o menor medida elementos como metales pesados (Cd, Cr, Pb, Ni, As, Hg y Zn) y contaminantes orgánicos (alquil -bencen-sulfonatos

lineales, hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados, benceno, cloroformo, toluenos, xilenos, entre otros) los cuales resultan potencialmente tóxicos para la vegetación y para otros organismos. De igual manera, presentan organismos patógenos que pueden ser perjudiciales para la salud humana, lo que constituye un material importante para el estudio epidemiológico y sanitario (EPA, 1999; Alcañiz, 2001; Pacheco & Patiño, 2003).

### **2.8.9. Aspectos legales que influyen en la utilización de los biosólidos**

Para la adecuada utilización y disposición de los biosólidos es indispensable tener en cuenta sus diferentes características y posibles consecuencias luego de su uso. En este sentido se hace necesaria la generación y aplicación de diferentes normas con respecto a su manejo.

#### **a) Normatividad Internacional**

En Estados Unidos las principales normas que regulan la utilización del biosólido consisten en:

- NORMA EPA 40CFR503: Recomienda calcular las tasas de aplicación de acuerdo al contenido de nutrientes del biosólido y de la cantidad necesaria que requiere los cultivos agrícolas
- NORMA 40CFR258: Presenta criterios mínimos para todos los rellenos municipales, incluso los usados para disponer lodos residuales.
- NORMA 40CFR261: Establece criterios de peligrosidad (CRETIB) y toxicidad (TCLP) (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), en cuanto a concentraciones de metales pesados.

En el ámbito de los países latinoamericanos se encuentra que:

- La dosis anual para la implementación de biosólidos, se calcula en función de la concentración de metales pesados o por criterios agronómicos (contenido de nutrientes requeridos por los cultivos, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio disponibles).
- No debe utilizarse biosólidos para el mejoramiento de suelos en las siguientes situaciones: En suelos con una permeabilidad mayor a 10<sup>-3</sup> cm/seg, en zonas cubiertas con nieve o ubicadas a menos de quince metros de la ribera de cursos de agua superficiales o con riesgo de inundación, en pendientes superiores al 15%, en áreas vecinas a centros poblados o con acceso público masivo, excepto cuando se compruebe que el empleo de biosólidos no supone un incremento en el riesgo a la salud humana (Daguer, 2003).

#### b) Normatividad en Colombia

En el caso de Colombia no existe aún una normatividad específica para la disposición de biosólidos, aunque existen algunas normas generales que podrían relacionarse con ello tales como:

- Manejo y protección de recursos naturales: Ley 99/93 y sus normas reglamentarias
- Manejo y disposición de residuos sólidos: Res. 189/94, Decreto 605/96, RAS/2000
- Aguas Residuales: Decreto 1594/84
- Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 1998). Resolución 822 de 1998. Define el término “lodo biológico”, pero no existe desarrollo sobre el tema.
- RAS 2000. Resolución 1096 de 2000. Define el término “biosólido” pero no reglamenta la gestión (Daguer, 2003).

### **2.8.10 Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de la Planta El Salitre en Bogotá**

La Planta El Salitre de Bogotá es la primera con que cuenta la ciudad para el tratamiento de sus aguas residuales. Inició sus operaciones en septiembre de 2000 y recibe las aguas residuales domésticas provenientes del alcantarillado del área norte de la ciudad y poblaciones circunvecinas.

La Planta El Salitre, esta diseñada para tratar un caudal de  $4\text{m}^3/\text{seg}$ , que es equivalente más o menos a 1'500.000 habitantes. Para tal fin, maneja varias etapas antes de dar como resultado final los biosólidos. Tales etapas incluyen:

1. *Toma de agua y pretratamiento:* El agua residual llega por el alcantarillado hasta la toma de agua donde se encuentran las rejillas para retener basuras, así como un sistema desarenador. De igual manera, mediante un proceso de flotación se extraen las grasas.
2. *Decantación primaria:* En grandes tanques de 44m de diámetro se logra remover gran cantidad de materia orgánica en forma de lodo primario.
3. *Descarga al río Bogotá:* El agua sale sin basuras, ni grasa, ni arena, ni materia orgánica (sedimentable), la cual es descargada al río Bogotá.
4. *Bombeo de lodos primarios:* Este proceso consiste en la utilización de bombas sumergibles que envían el lodo hacia la etapa de espesamiento estático. Diariamente se producen en promedio  $7500\text{ m}^3$  de lodos decantados.
5. *Espesamiento de lodos primarios:* Consta de dos unidades de 29 metros de diámetro y 4 metros de altura lateral que aumenta la concentración de lodos antes de enviarlos a digestión. Luego de este proceso, el agua que resulta del escurrimiento es retornada al final del pretratamiento. Finalmente de los

casi 7.500m<sup>3</sup> de lodos primarios que llegan a los espesadores salen 1.300m<sup>3</sup> de lodos espesados.

6. *Digestión de los lodos:* En tres tanques llamados digestores se almacenan los lodos primarios a una temperatura de 35°C, durante un tiempo de 22 días aproximadamente. Mediante este procedimiento se efectúa la descomposición de la materia orgánica por medio de la acción de bacterias anaeróbicas, las cuales la convierten en gas y biosólido. Diariamente se producen unos 1300m<sup>3</sup> de biosólidos líquidos.
7. *Almacenamiento de los lodos digeridos:* Éstos son almacenados en un tanque de 2700m<sup>3</sup>, el cual contiene agitadores sumergibles que evacuan los lodos hacia el proceso de deshidratación.
8. *Deshidratación:* Mediante la utilización de filtros, los biosólidos líquidos son desecados para reducir su volumen y facilitar su transporte. De esta manera se obtiene unos 150m<sup>3</sup> de biosólidos secos que sirven como producto orgánico
9. *Gasómetro:* En un día se almacenan unos 15.000m<sup>3</sup> de biogas. Una parte se usa para generar calor y calentar la digestión de los lodos hasta 35°C.
10. *Tea:* La mayor parte del biogas es quemado en una tea para evitar la salida de gases explosivos (BAS, 2002) (Anexo. 2)

#### **2.8.11 Características de los biosólidos de la Planta de Tratamiento El Salitre**

1. Comprenden concentraciones de metales pesados con valores por debajo de los límites máximos permisibles, establecidos por la Agencia Ambiental de los EEUU (EPA) en su norma 503-13, BEQ (biosólido de excepcional calidad) y RAS 98 (límites máximos para compost) (Tabla, 3).

**Tabla 3.** Valores de las concentraciones de metales pesados en el biosólido de la PTAR El Salitre y valores considerados por las normas EPA 503 -13 y RAS, 98.

Parámetro (mg/Kg) base seca	Promedio	Rango Colombia	Límites máximos permisibles para compost (RAS 98)	Límites máximos permisibles (EPA 503-13)	Biosólido de excelente calidad (EPA 503-13)
Arsénico	0.4	0.4 – 0.6	54	75	41
Cadmio	4.7	0.4 – 4.7	18	85	39
Cobre	140	61 - 446	1200	4300	1500
Cromo	60	59 - 2693	1200	No regulado	-
Mercurio	1.4	<0.01-1.7	5	57	17
Níquel	36.1	33 - 137	180	420	420
Plomo	114	36 - 114	300	840	300
Selenio	0.2	0.04 - 0.9	14	100	100
Zinc	1027	482-1587	1800	7500	2800

Fuente: BAS, (2002-2003).

2. De acuerdo a la normatividad de la EPA, las concentraciones de coliformes fecales del biosólido del Salitre se clasifica en tipo B, mientras que para los huevos de helminto se califica como tipo A (BAS, 2002) (Tabla, 4).

**Tabla 4.** Comparación de los parámetros microbiológicos del biosólido de la PTAR El Salitre según los criterios de la norma EPA 40 CFR 503

PARÁMETRO MICROBIOLÓGICO	BIOSÓLIDO PTAR EL SALITRE	Norma EPA 40 CFR 503
Coliformes fecales (NMP** /100g)	$1.6 \times 10^5$ UFC */ gramo de peso seco	<2.000.000 (Clase B) <1000 (Clase A)
Huevos de Helminto	< 1	<1(Clase A) >1 (Clase B)

\*UFC, Unidad Formadora de Colonia

\*\* Número Más Probable

Fuente: León y Trejos, (2005)

3. En cuanto a las características químicas del biosólido se evidencia que posee gran cantidad de nutrientes esenciales para la vegetación (BAS, 2002) (Tabla, 5).

**Tabla 5.** Características químicas de los biosólidos de la PTAR El Salitre

PARAMETRO	BIOSÓLIDO PTAR EL SALITRE
Nitrógeno total (mg/kg)	20456
Nitrógeno orgánico (mg/kg)	15951
Nitratos (mg/kg)	413
Nitritos (mg/kg)	4.8
Fósforo total (mg/kg)	31804
PH	7.8
CIC (meq/100g)	38.9
Calcio (ppm)	5990
Potasio (ppm)	321
Sodio (ppm)	170
Magnesio (ppm)	199
Carbono orgánico %	9.8
Conductividad eléctrica (humos/cm)	1733
Sólidos totales (mg/Kg)	342699
Sólidos volátiles (mg/Kg)	167660

Fuente: BAS, (2002)

4. Por otro lado, el biosólido contiene otras propiedades físicas que permiten establecer su utilización para diferentes usos (BAS, 2002) (Tabla, 6).

**Tabla 6.** Características físicas de los biosólidos de la PTAR El Salitre

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Consistencia	Semisólida blanda, no fluida tipo plastilina
Apariencia	Tierra negra esponjosa
Materia Seca	33%
Humedad	67%
Olor	No ofensivo, tipo humus.
Color	Fresco: negro intenso Luego de secado: café grisáceo.

Fuente: BAS, (2002).

Las 130 a 150 toneladas diarias de biosólidos que genera la Planta El Salitre, han sido dispuestas únicamente en el relleno sanitario Doña Juana desde el mes de julio de 2001, a partir de la aplicación de mezclas biosólido-tierra en diferentes zonas del relleno, tales como: los taludes de la celda contingente de residuos sólidos, taludes de las vías del relleno y desde marzo de 2002 se ha realizado la aplicación a gran escala como capa orgánica para la cobertura final de las celdas de residuos sólidos ya clausuradas (BAS, 2002).

### **3. MARCO GEOGRÁFICO DE LA CANTERA**

#### **3.1. Ubicación y Características de la Canteras**

La Canteras Soratama se encuentra ubicada en los cerros nororientales de la ciudad de Bogotá, entre las cotas de 2810 m.s.n.m. y 2925 m.s.n.m., en las coordenadas 106900 E y 116000 N.

Hace parte de la localidad de Usaquén y comprende un área de 5.8 hectáreas, colindando hacia el oriente con los cerros de la Calera, hacia el sur con la Canteras Servitá y hacia el occidente con el perímetro urbano de Bogotá, exactamente 1 Km al oriente de la Kr. 7ª con calle 167 (Delgado & Mejía, 2002a).

Según la estación climática de Torca (Cr.7 con 220) se registra rangos promediales de precipitación de 1220 mm. Dicha precipitación contienen una variabilidad interanual alta y un régimen bimodal, con periodos de lluvias más intensas entre septiembre y noviembre, y periodos más secos entre diciembre y febrero (Delgado & Mejía, 2002a). Durante el trabajo en campo, es decir de noviembre/2003 a octubre/2004, la Estación de Usaquén - Santa Ana registró en promedio una precipitación anual de 93.1mm (Anexo 7).

Por otro lado, la temperatura media multianual es de 14°C, con variaciones anuales inferiores a un grado y con tendencia a un régimen bimodal. En los meses más secos se registran variaciones muy altas de temperatura con valores máximos en el día de 27°C y mínimos de 4°C (Delgado & Mejía, 2002a). Durante el trabajo en campo, a partir de diciembre/2003 y hasta julio/2004, la Estación Climatológica de la Cantera Soratama, registro valores de temperatura en promedio de 12°C a lo largo de esos ocho meses (Anexo 7).

Los suelos corresponden a la Familia Cabrera, que según Cortés (1976) se caracterizan por presentarse en relieves ondulados, quebrados o muy quebrados, en altitudes que van desde los 2600 a 3200 metros (rangos en los que se encuentra la cantera), se derivan de areniscas, lutitas y arcillolitas de la Cordillera Oriental (Dystropepts), o de cenizas volcánicas (Dystrandeps, Placandeps) provenientes de la Cordillera Central que se establecieron sobre los materiales anteriores.

La cantera Soratama empezó a ser explotada en el año de 1965, donde se extraían las areniscas de la Formación Arenisca Tierna conformada por estratos de arenitas de cuarzo de grano variable que va desde grueso a muy grueso, separados por capas delgadas de lodolitas, limolitas y arcillolitas de tonos oscuros para la obtención principalmente de arena, y finalizó actividades hacia el año de 1995 (Delgado & Mejía, 2002a; Correa & Correa, 2003; Amortegui, 2003).

Después del abandono del terreno como resultado de la explotación, se han identificado cinco zonas de la siguiente manera: 1) zona de bosque adyacente a la cantera, 2) zona de relicto de bosque altoandino, 3) zona de patios, 4) zona de depósito de descapote y 5) zona de depósito de estériles. Para el presente trabajo, se mostraron los resultados de las propiedades químicas de las zonas dos, tres, cuatro y cinco, presentando éstas últimas una misma caracterización de los suelos, debido a que se agruparon en una misma zona (Sánchez, *et al.* 2003) (Anexo 1).

a) Zona depósito de descapote y zona de depósito de estériles

Estas zonas se encuentra en la parte baja de la cantera, entre las cotas de 2810 y 2845 m.s.n.m., y se identifican por la conformación de terracéos de origen antrópico, originadas por el vertimiento del descapote y de los estériles o subproductos extraídos de la misma explotación, las cuales presentan procesos de erosión laminar y en surcos (Figura. 1)



**Figura 1.** Zona depósito de descapote y zona de depósito de estériles

Dichas zonas se caracterizan por presentar una cobertura vegetal de tipo herbáceo y arbustivo con poca vegetación hacia la parte del sur, debido a los procesos erosivos que allí actúan. Los suelos muestran una clase textural Franco - arenosa, un pH fuertemente ácido (5.4) debido a la gran cantidad de areniscas que contienen, cantidades mínimas de materia orgánica (1.89%) con bajas tasas de nitrógeno (0.08%), fósforo (13.9 ppm), sodio (0.07 meq/100gr) y magnesio (0.97 meq/100gr). Presenta una C.I.C baja por deficiencia de arcillas y de materia orgánica, aceptables contenidos de aluminio (4.1%) y concentraciones bajas de sales (0.19 dS/m).

b) Zona de patios

Esta zona se encuentra ubicada en la parte central de la cantera, entre las cotas de los 2850 y 2860 m.s.n.m; se caracteriza por presentar una topografía plana, ya que se trata del área donde operaba la maquinaria y se procesaba el material de la explotación (Figura.2)



**Figura 2.** Zona de patios, con los estériles remanentes de la explotación

Dicha zona presenta en general condiciones muy adversas para el establecimiento de la vegetación porque se produjo la pérdida total de los diferentes horizontes del suelo, lo cual dejó expuesto un sustrato arenoso o estéril con escasez de nutrientes y drásticas limitaciones ambientales, debido a las grandes fluctuaciones de temperatura, fuerte radiación solar y drenaje excesivo, entre otros.

La zona de patios se identifica primordialmente por presentar una clase textural Arena – franca, un pH muy fuertemente ácido (5.0), contenidos mínimos de materia orgánica (0.17%). Los elementos que componen el complejo de cambio (Ca, Mg, Na, K), son muy bajos y los niveles de salinidad son aceptables, adicionalmente, el porcentaje de saturación por aluminio (15.2%) puede limitar el establecimiento de la vegetación.

c) Zona con relictos de vegetación nativa del bosque altoandino

La zona se encuentra influenciada por fuertes vientos y radiación solar, presentando una inestabilidad del terreno hacia la parte baja donde las pendientes son mayores como consecuencia de la explotación (Figura. 3).

Esta área presenta una textura Arenosa - franca, un pH fuertemente ácido (4.9), contenidos medios de materia orgánica (5.3%), y un porcentaje bajo de nitrógeno (0.23). La capacidad de intercambio catiónico es baja (9.6 meq/100gr), aunque se acerca a un valor medio, esto es consecuencia de la materia orgánica que permite incrementar el intercambio catiónico, aun con una saturación de bases baja (31.5 meq/100gr). Así mismo el % de saturación del aluminio aunque no es tóxico, es limitante para las plantas.



**Figura 3.** Relicto de bosque altoandino

**Tabla 7.** Datos físico - químicos de las Zonas de Depósito de Descapote y Estériles, Patios y Relicto de Vegetación.

VARIABLE	ZONA DE DEPÓSITO DE DESCAPOTE Y ESTÉRILES	ZONA DE PATIOS	RELICTO DE VEGETACIÓN NATIVA
Arena %	79.8	86.0	79.8
Limo %	10.1	6.0	12.1
Arcilla %	10.1	8.0	8.1
Clase textural	FA	AF	AF
Gravilla %	8.4	27.8	29.7
pH (1:1)	5.4	5.0	4.9
Al (meq/100 g)	0.36	0.27	0.55
S.A.I. %	4.1	15.2	15.4
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.19	0.27	0.27
% Carbono orgánico	1.1	0.10	3.10
Materia orgánica %	1.892	0.172	5.332
Nitrógeno total %	0.08	0.01	0.23
C/N	13.75	10	13.48
CIC (meq/100g)	5.5	1.1	9.6
Calcio (meq/100g)	7.3	1.3	1.8
Potasio (meq/100g)	0.11	0.03	0.10
Sodio (meq/100g)	0.07	0.04	0.07
Magnesio (meq/100g)	0.97	0.15	1.0
Bases Totales	8.4	1.5	3.0
SB%	SAT	SAT	31.5
Manganeso (ppm)	0.67	0.19	4.0
Hierro (ppm)	41.6	14.0	76.2
Zinc (ppm)	1.0	0.38	3.8g
Cobre (ppm)	0.25	0.09	0.31
Boro (ppm)	0.06	0.04	0.29
Fósforo (ppm)	13.9	2.7	2.7

Fuente: Delgado & Mejía, (2002).

El DAMA como entidad reguladora del ambiente en Bogotá, debió responsabilizarse de la recuperación ambiental de dicho terreno después de su abandono, considerando que su uso final sería un parque de recreación pasiva o aula ambiental piloto, donde se enseñe como pueden ser las explotaciones y la recuperación de canteras establecidas a lo largo de los cerros (Delgado & Mejía, 2002a; Amortegui, 2003).

## **4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

### **4.1 Formulación del problema**

Los Cerros Orientales de Bogotá, son de gran importancia en el ámbito ecológico debido a las múltiples funciones que cumplen como las de producción de oxígeno, hábitat para la fauna, alimento, regulación del microclima y alberga quebradas y arroyos, los cuales son importantes afluentes del río Bogotá. Éstas funciones se han visto alteradas por efecto de los disturbios naturales o antrópicos tales como: plantaciones forestales, expansión agropecuaria, expansión urbana, invasión de especies exóticas, incendios forestales, minería a cielo abierto, entre otros.

La actividad minera a cielo abierto en Bogotá, cuenta actualmente con 144 predios establecidos en diferentes áreas a lo largo de los cerros, los cuales han generado una pérdida notablemente de la cobertura vegetal y de todo el compartimento del suelo. Como consecuencia, se modificaron los atributos del suelo en cuanto a la estructura y función, lo cual generó un substrato con condiciones mínimas de fertilidad, debido a la pérdida de la materia orgánica, la alteración de la porosidad, textura, aireación y contenidos de nutrientes.

La extracción de materiales también ha generado terrenos con rocas descubiertas y taludes de elevadas pendientes que son susceptibles a deslizamientos, hundimientos y procesos erosivos, los cuales en conjunto han afectado el establecimiento de la vegetación y de otros organismos, lo que ha ocasiona que el

reestablecimiento del suelo por parte de éstos factores formadores transcurre lentamente a través del tiempo.

Posterior a la explotación, el primer paso a seguir es la recuperación del suelo mediante el uso del descapote que prevalecía antes, pero debido a que éste en muchas ocasiones no es almacenado correctamente en algunos terrenos mineros, se hace imprescindible la utilización de una enmienda orgánica que propicie cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, para que contribuya a agilizar los procesos sucesionales.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, genera entre 120 a 140 toneladas diarias de biosólidos, los cuales son utilizados principalmente como cubierta en el Relleno Sanitario Doña Juana. Es por ello, que se deben probar otras opciones de uso con dichos subproductos, una de esas alternativas puede ser la implementación como sustrato orgánico para la recuperación del suelo disturbado por minería, para minimizar los procesos erosivos y agilizar el establecimiento de la vegetación, con el fin de realizar una restauración de buena calidad y a un menor costo.

Por tal razón, surge la necesidad de conocer e implementar soluciones por medio de investigaciones que sean orientadas en la recuperación ecológica de canteras, para minimizar el deterioro continuo de los terrenos y así mismo, devolverlos a su entorno natural para favorecer la recuperación, conservación y mantenimiento de los servicios ambientales que prestan los Cerros Orientales de Bogotá, y en un segundo plano buscar otra alternativa de aprovechamiento de los biosólidos teniendo en cuenta los aspectos favorables y desfavorables que éstos brindan al suelo.

#### **4.2. Justificación de la Investigación**

El acuerdo 30 de 1976 del INDERENA aprobado por la resolución ejecutiva 76 de 1977, dictaminó que los Cerros Orientales de Bogotá comprenden áreas de Reserva Forestal, debido a las funciones que cumplen de producción de fuentes hídricas, de oxígeno, de captación de CO<sub>2</sub> y de escenario paisajístico, turístico y educativo.

Sin embargo, en algunas zonas de los cerros se han presentado disturbios que han alterado y modificado los ecosistemas en términos de la composición, estructura y función.

En este contexto, la minería a cielo abierto ha afectado negativamente todos los compartimentos de los ecosistemas; lo cual se refleja en la alteración de las geoformas, eliminación total del suelo, cambio en el uso del suelo, incremento de los procesos erosivos, pérdida de la cobertura vegetal y de algunas especies endémicas, entre otros.

Teniendo en cuenta que el artículo 344 de Plan de Ordenamiento Territorial (POT) exige el restablecimiento morfológico, paisajístico, ambiental y urbanístico de los predios mineros, se implementa la recuperación ecológica como herramienta que hace posible el restablecimiento parcial o total de componentes y/o elementos de los ecosistemas disturbados sin necesidad de que se llegue a las condiciones originales.

La recuperación del suelo puede llevarse a cabo mediante la implementación de enmiendas orgánicas (compost, humus, estiércol, biosólidos entre otros), no sólo, con el objetivo principal de acelerar la recomposición del mismo y por ende el establecimiento de la vegetación y de la fauna, sino que a su vez contribuya a solucionar los procesos erosivos y de remoción en masa. De lo contrario, los impactos negativos se incrementarían cada vez más, lo cual conllevaría no sólo a un mayor riesgo para los habitantes que se asientan en los alrededores de las canteras, sino acrecentar el deterioro paisajístico.

Los biosólidos son una interesante opción como enmiendas del suelo, porque contribuyen a reducir los procesos erosivos del suelo y la compactación, aumentan la porosidad y la capacidad de retener agua, así mismo contienen suficientes cantidades de materia orgánica, que al descomponerse aporta al suelo nutrientes (N, P, K, Ca), los cuales son necesarios para el desarrollo de la vegetación y para el aprovechamiento de la macrofauna y microorganismos del suelo, entre otros beneficios.

Por otro lado, es fundamental investigar el comportamiento de los metales pesados (Cu, Zn, Ni, As, Cd, Cr, Se, Pb, Hg), los contaminantes orgánicos y los organismos patógenos que contiene el biosólido cuando son implementados sobre suelos ácidos, para determinar los efectos que estos puedan generar en el ecosistema y así mismo poder proporcionar alternativas para su adecuado manejo.

Por tales argumentos, es necesario evaluar la integración del biosólido con los estériles cuando es aplicado en diferentes proporciones, mediante el seguimiento en el tiempo de las variables físicas y químicas; con el objeto de recomendar al DAMA si los biosólidos pueden ser o no usados en la recuperación de suelos disturbados por minería a cielo abierto.

#### **4.3 Pregunta de Investigación**

- ¿Cuál es el efecto de la aplicación de un biosólido como enmienda edáfica, en la recuperación de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva?

#### **4.4 Hipótesis de la pregunta de investigación**

La aplicación de biosólidos como enmienda edáfica favorece el reestablecimiento de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva, porque contienen cantidades de materia orgánica que mejoran la estabilidad de los agregados y la estructura del suelo, aumentan la porosidad, incrementan los valores de pH en suelos ácidos, son fuente de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg), aumentan la capacidad de intercambio catiónico, lo cual contribuye a la fijación de nutrientes durante más tiempo, entre otros (Sort & Alcañiz, 1996; Alcañiz *et al*, 1998; Wong *et al*, 1998; Sort y Alcañiz, 1999; García, 2001; Pacheco & Patiño, 2003).

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo General**

Evaluar la aplicación de un biosólido como enmienda orgánica, en el proceso de reestablecimiento de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva.

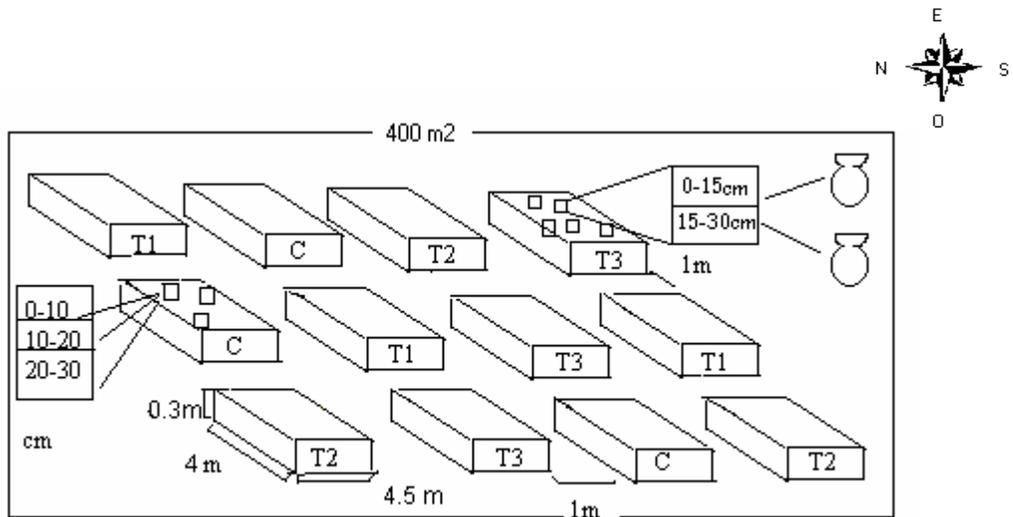
### **5.2 Objetivos específicos**

- Describir en el tiempo el cambio de las propiedades físico-químicas en los diferentes sustratos edáficos en recuperación.
- Comparar entre tratamientos el grado de recuperación de las propiedades edáficas tomando como referencia los suelos menos disturbados del área adyacente.
- Identificar el tratamiento que proporciona las mejores condiciones edáficas para recuperar los suelos disturbados por actividad extractiva.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1 Diseño experimental**

Para los diferentes tratamientos se efectuó un diseño experimental de una vía con tres niveles y tres repeticiones más el control, para un total de 12 parcelas (4 x 4.5 m x 30 cm) dispuestas completamente al azar en el terreno. Por otro lado, se dejó 1 metro de distancia entre las parcelas, donde se construyeron zanjas para evacuar las aguas de escorrentía y así evitar mezclas de los tratamientos por lixiviación; así mismo se construyeron zanjas perimetrales para evitar la contaminación de las zonas adyacentes (Figura 4 y 5).



**Figura 4.** Distribución de las parcelas en el área experimental



**Figura 5.** Zanjas para la evacuación del agua

## 6.2 Delimitación y adecuación del área experimental

Para llevar a cabo el experimento, primero se adecuó una vía de acceso, para permitir el paso de la maquinaria (bobcat y volquetas). Posteriormente, se delimitó un área de 400 m<sup>2</sup> en la zona de depósito de descapote; donde se procuró generar unas condiciones que fueran los más posiblemente homogéneas para evitar incidencia en los resultados de variables externas. Paralelamente se adecuó el lugar con la retirada manual de la vegetación herbácea. Una vez terminado este proceso, se efectuó la explanación y nivelación del terreno de manera manual y a través de la utilización de maquinaria bobcat. Para sostener el terreno se construyeron trinchos de madera ubicados hacia el costado occidental, norte y sur; a su vez, se rellenaron costales con arena que fueron dispuestos hacia el costado norte. Finalmente, se encerró el área con un cerca de alambre para evitar el paso tanto de personas como de algunos animales (Figuras 6, 7 y 8).



**Figura 6.** Delimitación del área experimental



**Figura 7.** Nivelación del terreno y trinchos de contención



**Figura 8.** Ubicación de los costales hacia la parte norte del terreno

### **6.3 Preparación de las mezclas de biosólidos y estériles.**

La preparación fue efectuada en el Frente de Explotación donde se encontraban los estériles y donde fueron ubicadas las 45 toneladas de biosólidos que transportaban las tres volquetas de BAS. Estos biosólidos fueron dejados al descubierto durante un mes, debido a la demora en la prestación de la maquinaria (bobcat), factor que retrasó la realización de las mezclas. Así mismo, es muy posible que elementos como la humedad y el carbono, hayan cambiado en el transcurso de este tiempo.

Las proporciones para realizar los diferentes tratamientos se midieron en volumen/volumen de Estéril y Biosólido, de la siguiente manera: Tratamiento uno (T1) con una proporción de 8:1, tratamiento dos (T2) con una proporción de 4:1, tratamiento tres (T3) con una proporción de 2:1 y las parcelas control sin biosólido. Posteriormente, los volúmenes tanto de biosólidos como de estériles fueron colocados en pilas y mezclados para ser homogenizados por un bobcat (Figura 9).



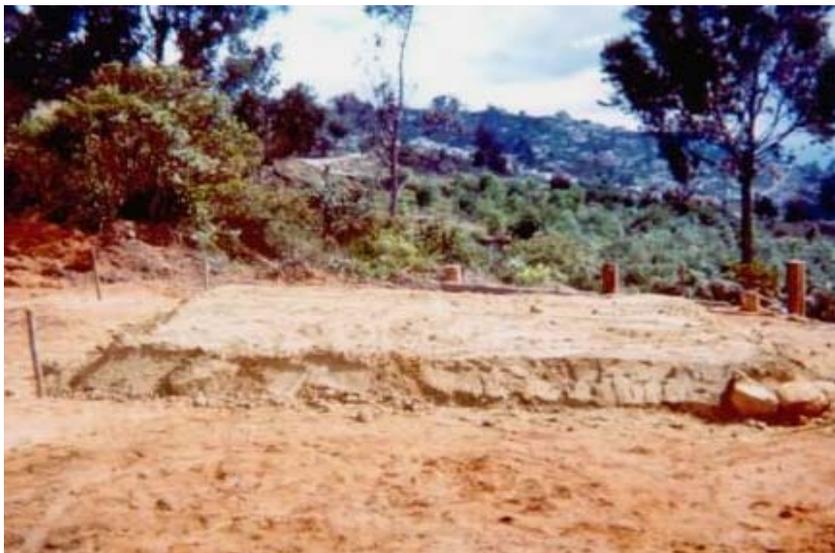
**Figura 9.** Elaboración de las mezclas por medio de un Bobcat

### **6.4 Transporte y ubicación de las mezclas hasta el área experimental**

Después de haber finalizado la preparación de las mezclas, se realizó el transporte hasta el área experimental mediante una volqueta; donde fueron construidas las parcelas con sus respectivos tratamientos (Figuras 10 y 11).



**Figura 10.** Transporte de las mezclas hacia el área experimental



**Figura 11.** Construcción de las parcelas

### 6.5. Toma de las muestras de biosólidos y estériles en campo

Previo a la realización de las mezclas se recolecto una muestra compuesta de biosólidos de 1 kilo, para su caracterización. De igual manera, dicho procedimiento se efectuó para los estériles. Las muestras fueron empacadas y marcadas debidamente para ser transportadas al laboratorio del IGAC.

En dicho laboratorio se analizaron los siguientes parámetros: pH, Carbono Orgánico, Nitrógeno total, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Calcio, Magnesio, Potasio, Sodio, Fósforo, Saturación de Bases, Conductividad eléctrica, Acidez Intercambiable y Clase Textural (Tabla, 8).

**Tabla 8.** Caracterización fisicoquímica del Biosólido de la Planta del Salitre y Estériles de la Cantera Soratama

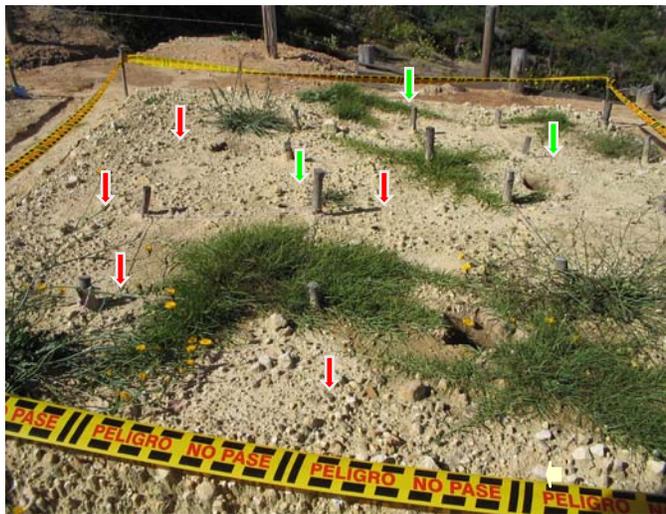
Variable	Biosólido	Estéril
Carbono orgánico%	11,7	0,09
pH	7,3	5,4
Nitrógeno total%	1,7	0,003
Fósforo(ppm)	166	4,3
Potasio(meq/100g)	0,55	0,02
Calcio(meq/100g)	67,0	0,20
Magnesio(meq/100g)	2,4	0,01
Sodio(meq/100g)	0,61	0,11
Al intercambiable(meq/100g)	-	1,1
%Saturación Al	-	75,7
CIC(meq/100g)	33,8	0,95
Bases totales(meq/100g) +	70,6	0,3
Saturación de bases%	SAT	35,8
Conductividad(dS/m)	4,4	0,13
Granulometría		
% Arena	Orgánico	82,0
% Limo	Orgánico	10,0
% Arcilla	Orgánico	8,0
% de Gravilla	-	6,5
Clase textural	Orgánico	AF

## **6.6 Toma de muestras en los diferentes tratamientos para la caracterización fisicoquímica.**

Se efectuaron cuatro muestreos en los diferentes tratamientos, en un período de tiempo de 9 meses de la siguiente manera: Muestreo 1 en el momento cero, Muestreo 2 a los tres meses, Muestreo 3 a los seis meses y Muestreo 4 a los nueve meses.

- El muestreo de las variables físicas se realizó teniendo en cuenta las siguientes etapas:
  - a) Selección de 3 puntos al azar para cada parcela en los respectivos tratamientos (Figura 12).
  - b) Extracción de las muestras en cada punto mediante un tubo aforado de pvc de 2 pulgadas por 50 cm de largo, en las profundidades de 10, 20 y 30 cm respectivamente. Debido al asentamiento del sustrato, a partir del segundo muestreo sólo se consideraron las profundidades de 0-10 cm y 10 cm en adelante.
  - c) Depositar cada muestra en una bolsa plástica de polietileno de 1kg, debidamente marcadas (nombre del lugar, fecha, identidad de campo, profundidad) y trasladarlas al laboratorio de la Universidad Javeriana, para la determinación física de las 108 muestras recolectadas
- El muestreo de las variables químicas se realizó teniendo en cuenta las siguientes etapas:
  - a) Selección de 5 puntos al azar para cada parcela en los respectivos tratamientos (Figura 12).

- b) Extracción de las muestras en cada punto mediante la utilización de un tubo aforado de pvc de 2 pulgadas por 50 cm de largo, a dos profundidades de 0 a 15 y de 15 a 30 cm.
- c) Incorporar las muestras extraídas en un balde y mezclar homogéneamente las cinco muestras en cada una de las profundidades medidas.
- d) Depositar las muestras en una bolsa plásticas de polietileno de 2 kg, debidamente marcadas (nombre del lugar, fecha, Identidad de campo, profundidad), para trasladarlas al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)



**Figura 12.** Selección de puntos de muestreo para las propiedades físicas y químicas en cada parcela.

Para evitar que el suelo fuera compactado por efecto de pisadas, se utilizó una banca de madera que atravesaba las parcelas de lado a lado, durante los diferentes muestreos (Figura 13).



**Figura 13.** Banca utilizada en los muestreos para no compactar el suelo.

### **6.7 Fase de laboratorio en los diferentes tratamientos para la caracterización de las variables fisicoquímicas.**

Para la determinación de las variables físicas en el laboratorio de la Universidad Javeriana se emplearon las siguientes técnicas: Densidad aparente: Método del cilindro, Densidad real: matr az aforado; Humedad y Porosidad: mediante f ormula (Tabla, 9) y (Anexo 3).

Para la determinación de las variables químicas en el laboratorio del IGAC, se emplearon las siguientes técnicas: Carbón orgánico (C.O.): Walkley - Black; Nitrógeno (N) total: Kjeldhal; Fósforo (P) disponible: Bray II; CIC (capacidad intercambio catiónico) y bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio): Acetato de amonio normal y neutro; Acidez intercambiable (A.I.): con KCl; Textura: Bouyoucos; Conductividad eléctrica (ce): Extracto de saturación; pH: Potenciómetro (Tabla, 9).

**Tabla 9.** Variables físicas y químicas con las unidades en que se representan, su indicación y el método por el cual se obtienen.

VARIABLES	UNIDADES	INDICACIÓN	MÉTODO
pH	Sin Unidades	Condiciones de fertilidad	Potenciómetro
Nitrógeno total	%	Reservas y disponibilidad del nitrógeno	Kjeldahl
Carbono Orgánico	%	Disponibilidad de nutrientes y C/N	Walkey _ Black
Fóforo	ppm	Fosforo disponible	Bray II
C.I.C.	meq/100gr	Bases intercambiables	Acetato de Amonio
Saturación de Bases	%	Saturación de cada base	Bases/CIC*100
Acidez intercambiable	meq/ 100gr	Toxicidad pH < 5,5	KCl
Potasio	meq/ 100gr	Disponibilidad	Acetato de amonio normal y neutro
Sodio	meq/ 100gr	Disponibilidad	
Magnesio	meq/ 100gr	Disponibilidad	
Calcio	meq/ 100gr	Disponibilidad	
Conductividad Eléctrica	dS/m	Cantidad de sales	Extracto de saturación
Densidad aparente	gr/cm <sup>3</sup>	Masa x unidad de volúmen	Cilindro
Densidad real	gr/cm <sup>3</sup>	Densidad de partículas sólidas	Matraz aforado
Porosidad	%	% de poros	Dr-Da/Dr*100
Textura	%	Distribución partículas minerales	Bouyocos
Humedad	%	Cantidad de agua en el suelo	Peso húmedo-Peso seco/ Peso seco * 100

Fuente: Alvarez, 1979; Olarte, *et al.*, 1980; Kaúrichev, 1980; Salinas & García, 1985.

## 7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico parte del planteamiento de las siguientes hipótesis

Hipótesis Nula ( $H_0$ )

La aplicación de biosólidos como enmienda edáfica no incide en el proceso de reestablecimiento de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva.

Hipótesis Alternativa ( $H_a$ )

La aplicación de biosólidos como enmienda edáfica incide en el proceso de reestablecimiento de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de comprobar si el biosólido como única variable de entrada influye directamente en la variabilidad de las propiedades físicas y químicas como variables de salida.

Tal análisis consistió en comparar los promedios o medias de las variables físicas y químicas (densidad aparente, densidad real, humedad, porosidad, textura, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo, capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables, acidez intercambiable, conductividad eléctrica y pH) de los T1-T2-T3 y C, para establecer si existen diferencias en cada una de las variables de los tratamientos a lo largo de los nueve meses y entre cada muestreo. Así mismo, también se utilizó un análisis de varianza para comparar las variables de los tratamientos, con el fin de describir que tanto se acercan dichos valores con respecto al suelo de un bosque adyacente a la cantera. Por otro lado, si se presentan diferencias significativas entre las medias, el análisis de varianza no especifica entre cuales tratamientos hay diferencias. Razón por la cual, se realizó una comparación adicional entre grupos de medias de los tratamientos, a través de la Prueba de Intervalos Múltiples de Duncan (Anexo. 4).

Para todos los análisis se utilizó el programa estadístico STAR GRAPHICS, en el cual las hipótesis nulas son rechazadas si el valor de  $p < 0.001$ .

## 8. RESULTADOS

### 8.1 VARIABLES QUÍMICAS

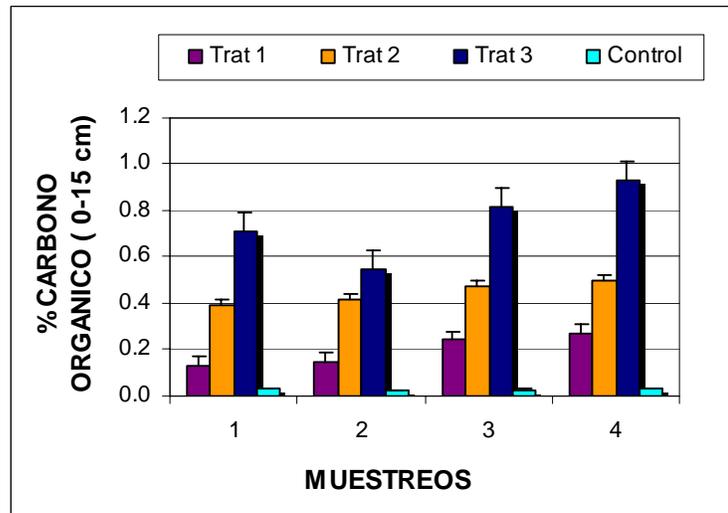
A continuación se presentan los cambios de las variables químicas y físicas de los diferentes tratamientos (T1-T2-T3 y C) dentro de cada muestreo (1-2-3 y 4) a lo largo del tiempo (0-3-6-9 meses) y con relación al suelo de un bosque adyacente a la cantera. Para la comparación entre los tratamientos y el suelo del bosque se describirán los resultados correspondientes al noveno mes.

#### 8.1.1 Comportamiento del carbono orgánico en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.

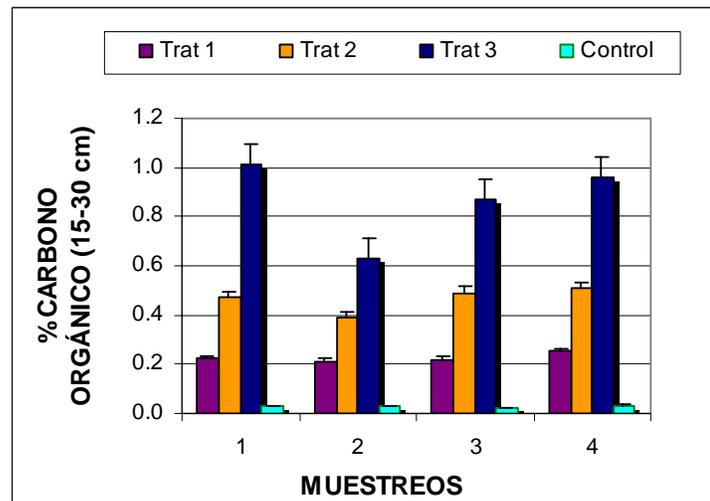
Durante los muestreos 1-2-3 y 4 en la profundidad de 0-15 cm, se evidencia un mayor contenido de carbono orgánico en el T3, seguido del T2, T1 y C. De igual manera, en el muestreo 1, 3 y 4 se observan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre todos los tratamientos, mientras que en el muestreo 2 se presenta una similitud estadísticamente entre los T2 y T3 y los T1 y Control (Figura 14a). Similar tendencia se presenta en la profundidad de 15 a 30 cm (Figura 14b). Paralelamente, una mayor proporción de carbono se tiende a presentar en la profundidad de 15 a 30 cm que de 0-15 cm, siendo este incremento más relevante en el primer muestreo (Figuras 14a y 14b).

Por otro lado, el carbono orgánico del T3 en la profundidad de 0-15 cm, tiende a aumentar a lo largo del tiempo, no obstante disminuye en el tercer mes, presentando diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) desde su inicio hasta el sexto mes. En los T2 y T1 se aprecia un aumento a lo largo del experimento, sin presentar dicho carbono diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) (Figura 14a). Con respecto a la profundidad de 15-30 cm, se presenta una similar tendencia que la del T3 de 0-15 cm; sin embargo, contrario a lo que se muestra en la profundidad de 0-15 cm, el carbono de los T1 y T2 disminuye en el tercer mes y posteriormente aumenta, sin presentar diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) a lo largo de los nueve meses (Figura 14b). Igualmente, se presenta una mayor cantidad de carbono en la profundidad de

15-30 cm, en el T1 al inicio y tercer mes, en el T2 en un tiempo inicial, al sexto y noveno mes, y en el T3 a lo largo del tiempo (Figuras 14a y 14b).



**Figura 14a.** Variación del carbono orgánico (%) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 14b.** Variación del carbono orgánico (%) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

Se aprecia en el control unas proporciones mínimas a casi nulas de carbono, durante el noveno mes. Por otro lado, existe una mayor cantidad de carbono orgánico en el T3 en ambas profundidades, en comparación con los otros tratamientos. Por esta razón, el T3 en el noveno mes es el que más se acerca al valor del suelo del bosque (Tabla 10). Dicha variable no contiene una clasificación dada por el IGAC.

**Tabla 10.** Comparación del carbono orgánico durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque.

CARBONO ORGÁNICO (%)					
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque
0 - 15 cm	0.03	0.27	0.50	0.93	3,1
15 - 30 cm	0.03	0.26	0.51	0.96	

Teniendo en cuenta la Tabla 11 de Clasificación del IGAC para zonas frías, el porcentaje de materia orgánica en todos los tratamientos incluido el control, son bajos. No obstante, el T3 en ambas profundidades, contiene una mayor cantidad de materia orgánica, seguido del T2 y T1. Debido a lo mencionado anteriormente, el T3 es el que más se acerca al valor del suelo del bosque; siendo este último clasificado en un rango medio, aunque se acerca más a una clasificación baja según el IGAC.

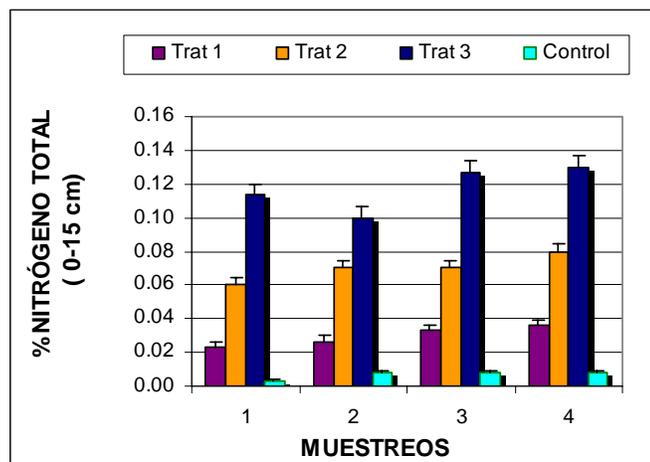
**Tabla 11.** Comparación de la materia orgánica durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

MATERIA ORGÁNICA (%)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	0,052	0,47	0,87	1,61	5,3	< 5 = Bajo
15 - 30 cm	0,058	0,44	0,88	1,66		5 - 10 = Medio
						> 10 = Alto

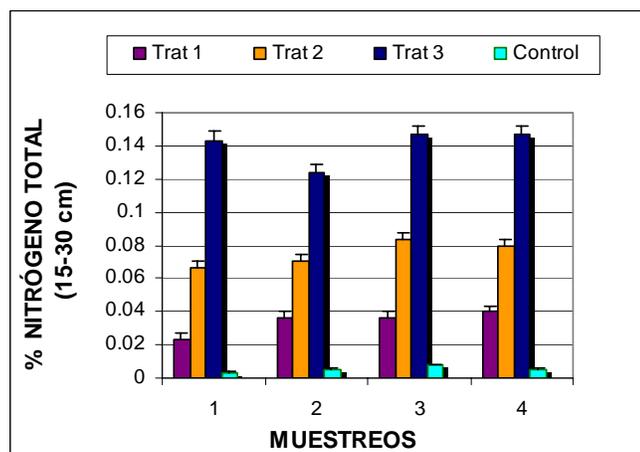
### 8.1.2 Comportamiento del nitrógeno total en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.

Durante los muestreos 1-2-3 y 4 en la profundidad de 0-15 cm, se presenta un mayor contenido de nitrógeno en el T3, seguido del T2, T1 y C. Igualmente, se registra en cada muestreo diferencias significativas ( $p < 0.001$ ), entre los diferentes tratamientos (Figura 15a). Similar tendencia se genera a la profundidad de 15-30 cm (Figura. 15b). Paralelamente, una mayor proporción de nitrógeno se presenta en el T3 en la profundidad de 15 a 30 cm, durante los diferentes muestreos (Figuras 15a y 15b).

Por otro lado, el nitrógeno del T3 en la profundidad de 0-15 cm, tiende a aumentar a lo largo de los nueve meses, no obstante disminuye en el tercer mes. Así mismo, se presenta entre la transición del tercero al sexto mes diferencias significativas ( $p < 0.001$ ). Se aprecia en el T2 y T1 un aumento del nitrógeno a lo largo del tiempo, sin diferencias significativas ( $p < 0.001$ ), mientras que en las parcelas de control, los valores no cambian en el tiempo Figuras 15a) Una similar tendencia sucede en la profundidad de 15-30 cm (Figura. 15b). Igualmente, en los T1 y T2 no se presenta una variación tan marcada del nitrógeno en ambas profundidades, a lo largo de los nueve meses, mientras que el T3 contiene una mayor cantidad de nitrógeno en la profundidad de 15-30cm (Figuras 15a y 15b).



**Figura 15a.** Variación del nitrógeno total (%) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 15b.** Variación del nitrógeno total (%) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo y durante el mismo muestreo.

El nitrógeno total en los tratamientos con biosólidos y en los controles, presenta valores más bajos que lo reportado por el IGAC para zonas frías (<0.25). No obstante, el T3 en ambas profundidades contiene más cantidad de nitrógeno seguido del T2 y T1. Por esta razón, el T3 es el que más se acerca al valor del suelo del bosque, que corresponde a un 0.23% y que es clasificado por el IGAC como bajo, sin embargo, dicho valor se acerca a un valor medio (Tabla. 12).

**Tabla 12.** Comparación del nitrógeno total durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

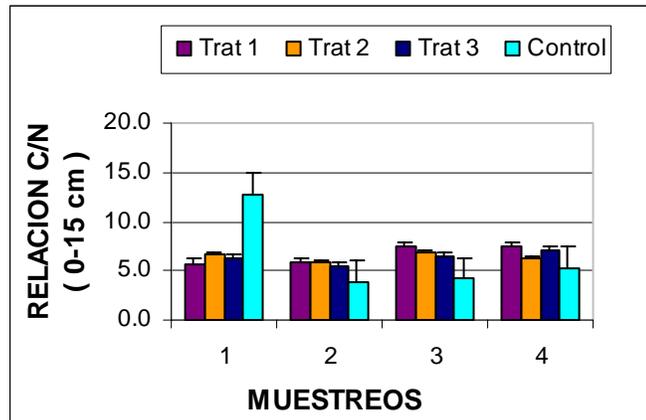
NITRÓGENO TOTAL (%)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	0,008	0,036	0,08	0,13	0,23	< 0.25 = Bajo
15 - 30 cm	0,005	0,04	0,08	0,15		0.26 - 0.5 = Medio
						> 5 = Alto

### **8.1.3 Comportamiento de la relación C/N en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.**

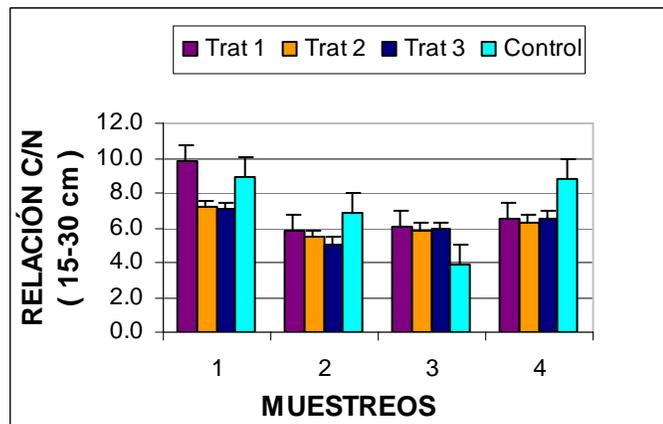
Se observa en el muestreo 1 de la profundidad de 0-15 cm, un aumento significativo ( $P < 0.001$ ) de la relación C/N del control con respecto a los otros tratamientos, mientras que en el muestreo 2, los valores de los T1-T2 y T3 fluctúan poco, siendo estadísticamente similar entre sí. Una tendencia a la del muestreo 2, se registra para el muestreo 3 y 4, sin embargo, se evidencia una mayor relación en el T1 (Figura 16a). Durante el muestreo 1 en la profundidad de 15-30 cm, se presenta un incremento no significativo ( $p > 0.001$ ) del T1 y el control. Aunque en el muestreo 2 y 4 se evidencia una mayor relación en el control, no existen diferencias significativas con los otros tratamientos ( $p > 0.001$ ) (Figura 16b) Paralelamente, se registra una mayor relación C/N en los tratamientos con biosólidos en los muestreos 2 - 3 y 4 en la profundidad de 0-15 cm, mientras que en las parcelas control se presenta todo lo contrario (Figuras 16a y 16b).

Por otro lado, las parcelas de control en la profundidad de 0-15 cm, muestran una disminución significativa de dicha relación en el tercer mes, posteriormente en el sexto y noveno mes aumenta, sin presentar diferencias significativas ( $p > 0.001$ ). El T1 y T3 tiende a aumentar a lo largo de los nueve meses, mientras que el T2 fluctúa por lo que disminuye y aumenta en el tiempo. Dichos tratamientos no contienen diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) (Figura 16a). Una similar tendencia se presenta en la profundidad de 15-30 cm (Figura 16b).

Como la Relación C/N en los tratamientos con biosólidos, en las parcelas control y en suelo del bosque es inferior a 25, no se presenta una inmovilización del nitrógeno para beneficio de los microorganismos, al contrario, existe un buen suministro de nitrógeno para la vegetación. No obstante, todos los tratamientos contienen valores por debajo del valor del suelo del bosque no disturbado (Tabla. 13).



**Figura 16a.** Variación de la relación C/N en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 16b.** Variación de la relación C/N en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

**Tabla 13.** Comparación de la relación C/N el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación Burbano (1989).

RELACIÓN CARBONO/ NITRÓGENO						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	Calificación
0 - 15 cm	5,33	7,42	6,25	7,15	13,47	< 25 = Mineralización
15 - 30 cm	8,78	6,48	6,33	6,52		> 25 = Inmovilización

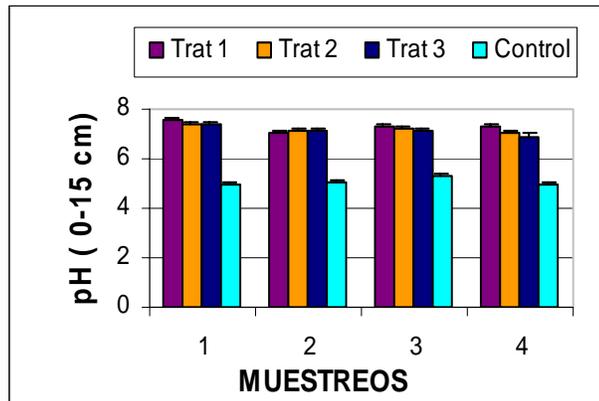
#### **8.1.4 Comportamiento del pH en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.**

Se observa en el muestreo 1 en la profundidad de 0-15 cm, un incremento significativo del pH en el T1 con respecto a los otros tratamientos, mientras que los T2 y T3 no presentan diferencias significativas entre sí, ya que poseen un mismo valor de pH, a diferencia del control que contiene un pH muy inferior al de los tratamientos con biosólidos. En el muestreo 2 y 3, no se presentan diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) entre los tratamientos con biosólidos, mientras que en las parcelas control si se registran diferencias. Así mismo, durante el muestreo 4, el pH es mayor en el T1, seguido del T2, T3 y C, entre los cuales prevalecen diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) (Figura 17a) Con respecto a la profundidad de 15-30 cm en el muestreo 1-2-3 y 4, los valores de pH son similares en los tratamientos con biosólidos, e incrementan significativamente en comparación con el control. Sin embargo, el T1 presenta diferencias significativas con respecto al T2 y T3 durante el muestreo 3 y 4 (Figura 17b).

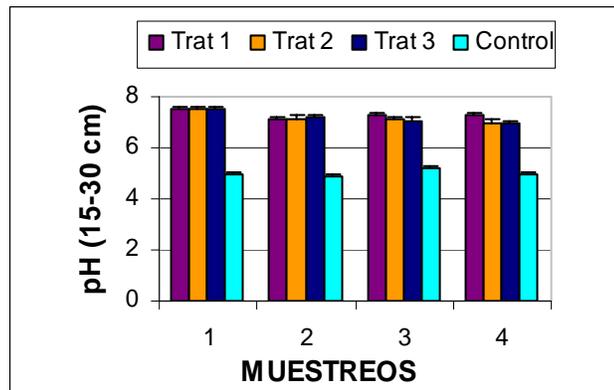
Los valores de pH, para el primer muestreo en los tratamientos con biosólidos en la profundidad de 0 a 15 cm son ligeramente alcalinos, mientras que para el segundo, tercero y cuarto muestreo son neutros. Una similar tendencia en la calificación del pH se evidencia en la profundidad de 15-30 cm.

Por otro lado, en todos los tratamientos con biosólidos y en las parcelas de control, en la profundidad de 0-15cm, los valores de pH fluctúan muy poco en el tiempo; disminuyendo significativamente en el tercer y noveno mes, con excepción del T1. (Figuras 17a). Una similar tendencia se presenta en la profundidad de 15 a 30 cm (Figuras 17b).

Según la Tabla 14 de calificación de pH del IGAC, las parcelas de control y el suelo del bosque contienen una clasificación muy fuertemente ácido. Al aplicar biosólidos en diferentes proporciones el pH, incrementa a valores neutros, sobrepasando así el valor del suelo del bosque no disturbado.



**Figura 17a.** Variación del pH en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 17b.** Variación del pH en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

**Tabla 14.** Comparación del pH durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

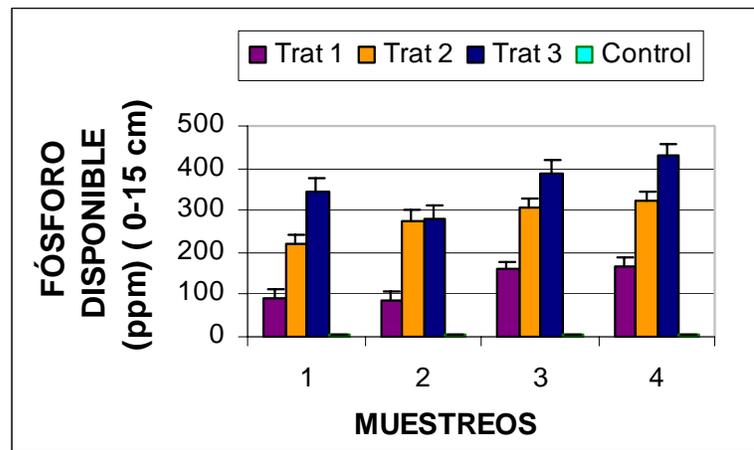
Profundidad/Tratamiento	pH					IGAC
	C	T1	T2	T3	Bosque	
0 - 15 cm	5,0	7,3	7,0	6,9	4,9	4.6 - 5.0
15 - 30 cm	5,0	7,3	6,96	6,9		6.6 - 7.3 Neutro

### **8.1.5 Comportamiento del fósforo en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.**

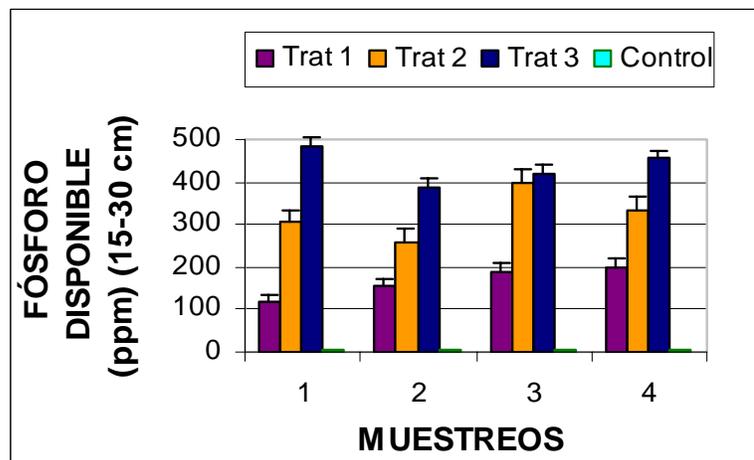
En los diferentes muestreos de 0-15 cm, se observa una mayor proporción de fósforo en el T3, seguido del T2, T1 y C. Durante el muestreo 1 y 4, se presentan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) en los tratamientos con biosólidos, incluidas las parcelas control, mientras que en el muestreo 2 y 3 sólo se registran diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) en el T1 y C (Figura 18a). Una similar tendencia de aumento se presenta en todos los tratamientos en la profundidad de 15 a 30 cm. Paralelamente, en el muestreo 1, 2 y 4, se evidencian diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) en todos los tratamientos, mientras que en el muestreo 3 sólo se registran diferencias en el T1 y C (Figura 18b). Así mismo, en el T3, seguido del T2, T1 y C, se evidencia una mayor cantidad de fósforo en la profundidad de 15 a 30 cm, a lo largo de los muestreos (Figuras 18a y 18b).

Por otro lado, en la profundidad de 0-15 cm, existe una tendencia del fósforo a aumentar en todos los tratamientos con biosólidos a lo largo de los nueve meses, excepto en el T1 y T3 en el tercer mes, este aumento es más evidente en el noveno mes, especialmente en el T3. Tales cambios son significativos ( $p > 0.001$ ) en todos los tratamientos, entre la transición del tercer al sexto mes. Contrario a lo anterior, las parcelas control contienen cantidades de fósforo muy por debajo de las que contienen los tratamientos con biosólidos a lo largo del tiempo (Figura 18a). Con respecto a la profundidad de 15-30 cm, se evidencia en el T3 una excesiva cantidad de fósforo al comienzo del experimento, que disminuye en el tercer mes, a su vez se incrementa en el sexto y noveno mes, mientras que el T2 fluctúa aumentando y disminuyendo a lo largo del tiempo y el T1 aumenta a lo largo de los nueve meses (Figura 18b). Presentando sólo el T2 diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) entre la transición del tercer al sexto mes. Igualmente, a lo largo del tiempo existe una mayor proporción de fósforo en todos los tratamientos con biosólidos en la profundidad de 15-30cm (Figuras 18a y 18b).

Las parcelas de control según el IGAC, contienen valores bajos en ambas profundidades, contrario a lo que se presenta en todos los tratamientos donde se aplicó biosólido, en especial en el T3, donde los valores superan las 40ppm que tienen una equivalencia alta. Por otro lado, todos los tratamientos incluido el control, sobrepasan el valor del suelo del bosque, el cual contiene cantidades de fósforo muy bajas (Tabla 15).



**Figura 18a.** Variación del fósforo disponible (ppm) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 18b.** Variación del fósforo disponible (ppm) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

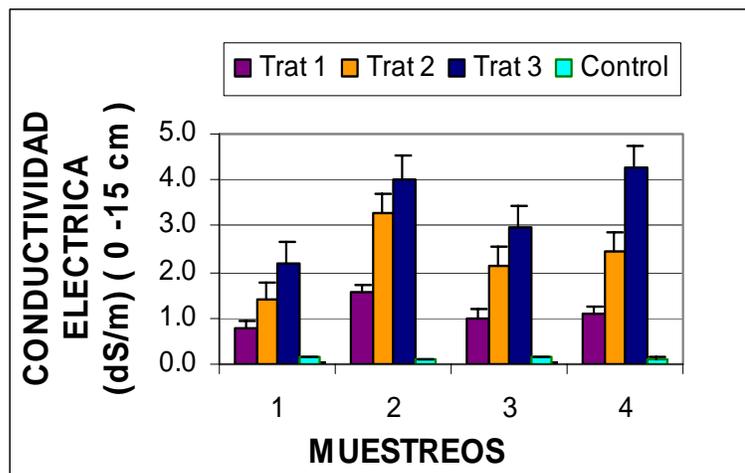
**Tabla 15.** Comparación del fósforo disponible durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

FOSFORO (ppm)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	7,1	169	323	427	2,7	< 15 = Bajo
15 - 30 cm	6,5	201	333	454		15 - 40 = Medio
						> 40 = Alto

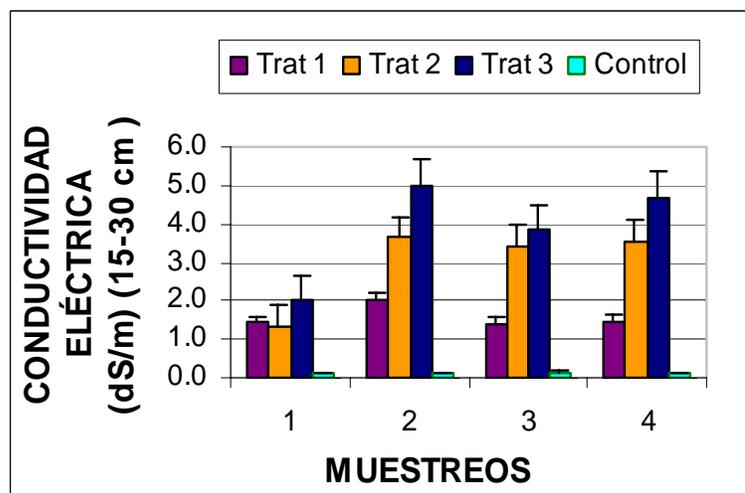
#### 8.1.6 Comportamiento de la conductividad eléctrica en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.

Se observa en todos los muestreos de la profundidad de 0-15 cm, un incremento significativo ( $p < 0.001$ ) de la conductividad eléctrica en el T3, seguido del T2, T1 y C (Figura 19a). Un similar comportamiento de aumento se genera en la profundidad de 15-30 cm; presentando diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) el T3 con el C en el muestreo 1, el T2 y T3 con el T1 y el C, en el muestreo 3 y todos los tratamientos, incluido el control en el muestreo 2 y 4 (Figura 19b). Así mismo, se presenta una mayor conductividad durante los diferentes muestreos en la profundidad de 15 a 30 cm que de 0-15 cm (Figuras 19a y 19b).

Por otro lado, en la profundidad de 0-15 cm, se registra en el tercer y noveno mes, un aumento significativo ( $p < 0.001$ ) de la conductividad eléctrica en los T3, T2 y T1. Entre la transición inicial al tercer y al sexto mes, existen diferencias significativas ( $p < 0.001$ ), en los diferentes tratamientos (Figura 19a). Una similar respuesta se presenta en la profundidad de 15-30 cm. (Figura 19b). Igualmente, se presenta una mayor conductividad en todos los tratamientos con biosólidos a través del tiempo en la profundidad de 15 a 30 cm (Figuras 19a y 19b).



**Figura 19a.** Variación de la CE (dS/m) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 19b.** Variación de la CE (dS/m) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

Según los valores establecidos por el IGAC, en la Tabla 16, las parcelas control y el T1, contiene valores nulos en la conductividad eléctrica, mientras que el T2 presenta valores escasos y el T3 posee valores moderados. Esto representa que el biosólido incrementa las sales del suelo en la profundidad de 15-30 cm, en especial en el T3. Paralelamente, dichos tratamientos exceden los valores del suelo del bosque que contienen proporciones nulas.

**Tabla 16.** Comparación de la conductividad eléctrica durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (dS/m)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	0,12	1,07	2,47	4,27	0,27	0 - 2 = Nula
						2 - 4 = Escasa
15 - 30 cm	0,12	1,47	3,53	4,67		4 - 8 = Moderada
						8 - 16 = Alta

### 8.1.7 Comportamiento de la acidez intercambiable y de la saturación de la acidez de los tratamientos, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.

No se evidencia ningún valor ni de la acidez intercambiable, ni de la saturación del aluminio; en los tratamientos con biosólidos durante los diferentes muestreos de 0-15 cm y de 15-30 cm; contrario a lo sucede en los controles, que contienen grandes cantidades de acidez intercambiable, debido a que contienen un pH por debajo de 5.5, que genera que sea disponible. En este sentido, la acidez que se presenta en el tiempo en ambas profundidades, incrementa al sexto mes, ostentando diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre la transición del sexto al noveno mes (Anexo 4).

Por otro lado, cuando se compara en el tiempo la saturación de la acidez de 0-15 cm y 15-30 cm, se observa en mayor proporción en el noveno mes, sin presentar diferencias significativas ( $p < 0.001$ ). Igualmente, en la profundidad de 15 a 30 cm, se

presenta una mayor acidez intercambiable en el tiempo cero, en el tercer mes y en el noveno mes, mientras que en la saturación de la acidez existe un mayor porcentaje en el tercer, sexto y noveno mes en la profundidad de 0 a 15cm (Anexo 4).

Teniendo en cuenta las cantidades establecidas por el IGAC, en la Tabla 17; las parcelas de control contienen en ambas profundidades valores > 60%, lo que representa un nivel tóxico para la mayoría de cultivos. Así mismo, la saturación del aluminio de los controles, sobrepasa el valor del suelo del bosque que se acerca a un rango <15, lo cual no representa ningún problema en general para la vegetación

**Tabla 17.** Comparación de la saturación de la acidez durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

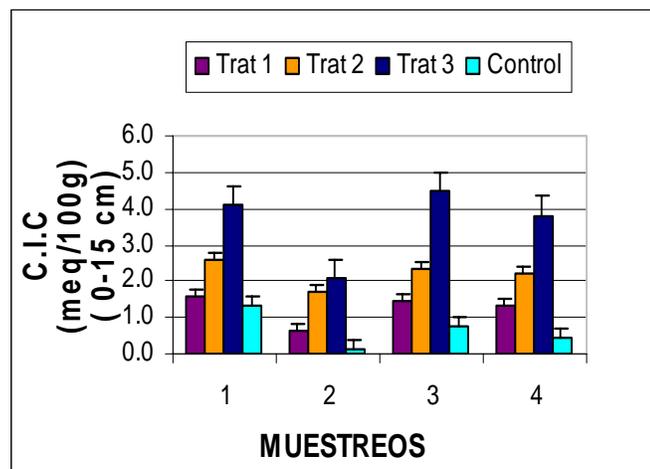
SATURACIÓN DE LA ACIDEZ INTERCAMBIABLE (%)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	65,7	0	0	0	15,4	<15
						15 - 30
15 - 30 cm	64,6	0	0	0		30 - 60
						>60

#### 8.1.8 Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico de los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.

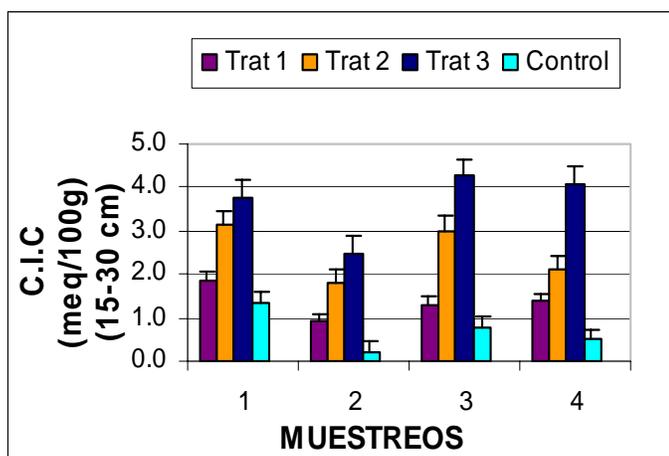
Se observa en el muestreo 1, 2, 3 y 4 en la profundidad de 0-15 cm, una mayor capacidad de intercambio catiónico en el T3, seguido del T2, T1 y C. Sin embargo, durante el muestreo 1, 3 y 4 se observan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre los tratamientos con biosólido, incluidas las parcelas de control, mientras que en el muestreo 2 se registran diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) entre el T3 con el T2, T1 y C, y el T2 y T1 con el C (Figura 20a). Una similar respuesta se presenta en todos los tratamientos en la profundidad de 15 a 30cm (Figura 20b).

Durante el muestreo 2 de 15-30 cm en todos los tratamientos, se percibe una mayor capacidad de intercambio catiónico en comparación de 0-15 cm, mientras que en los otros muestreos fluctúa dicha capacidad entre una u otra profundidad (Figuras 20a y 20b).

Por otro lado, se observa en la profundidad de 0-15 cm, en todos los tratamientos, que la C.I.C., tiende a fluctuar a lo largo del tiempo, disminuyendo en el tercero y noveno mes y aumentando en el sexto mes. Presentándose diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre la transición del tiempo cero al tercer mes y del tercero al sexto mes (Figura 20a). Una similar tendencia se registra en la profundidad de 15-30cm (Figura 20b). Paralelamente, a lo largo del tiempo, el T1 contiene una mayor capacidad catiónica en la profundidad de 15-30 cm, con excepción del sexto mes, igualmente sucede con el T2 a excepción del noveno mes y en el T3 fluctúa dicha capacidad en el tiempo entre una u otra profundidad (Figuras 20a y 20b).



**Figura 20a.** Variación de la C.I.C. (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 20b.** Variación de la C.I.C. (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

Los valores de la capacidad de intercambio catiónico en las parcelas de control y en los tratamientos con biosólidos en las dos profundidades, son bajos (<10 meq/100g). Así mismo, aunque el suelo del bosque también contiene valores bajos, se acerca más a una clasificación media. En este sentido, el T3 contiene una mayor capacidad de intercambio catiónico seguido del T2 y T1, razón por la cual el T3 es el que más se acerca al valor del suelo del bosque (Tabla 18).

**Tabla 18.** Comparación de la C.I.C durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNIC (meq/100g)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	0,43	1,33	2,2	3,8	9,6	< 10 = Bajo
15 - 30 cm	0,49	1,37	2,1	4,1		10 - 20 = Medio
						> 20 = Alto

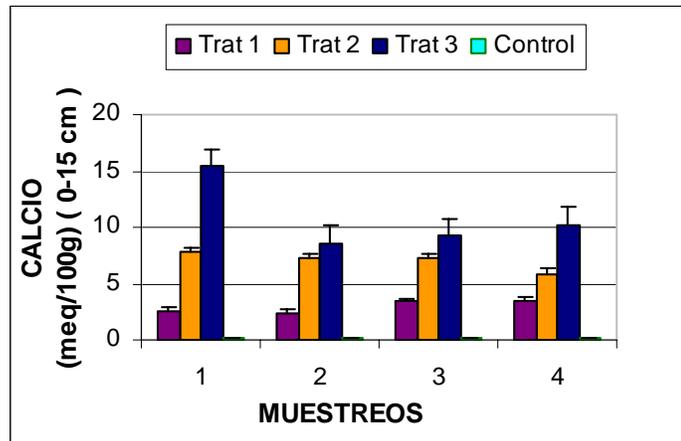
### **8.1.9 Comportamiento del calcio en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.**

Se observa en la profundidad de 0-15 cm, en los diferentes muestreos, una mayor proporción de calcio en el T3, seguido del T2, T1 y C. Así mismo, durante todos los muestreos se presentan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre los diferentes tratamientos, incluidos los controles (Figura 21a). Un comportamiento similar se presenta en la profundidad de 15-30 cm (Figura 21b). Igualmente, existe en todos los tratamientos una mayor proporción de calcio, en la profundidad de 15-30 cm que de 0-15 cm, durante los cuatro muestreos efectuados (Figuras 21a y 21b).

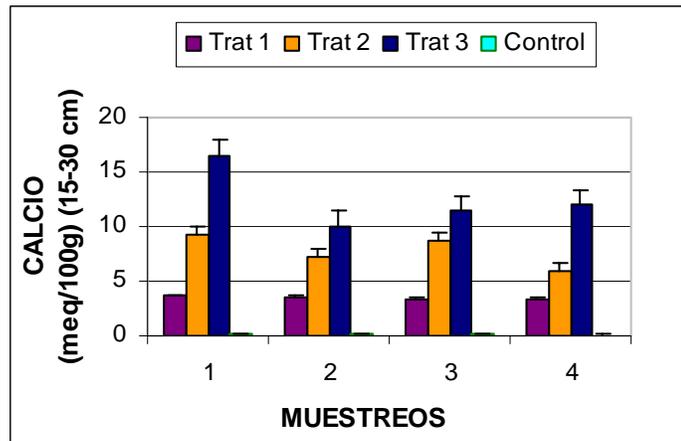
Por otro lado, en la profundidad de 0-15 cm, el calcio tiende a disminuir en el tercer mes en todos los tratamientos con biosólidos, luego en el sexto y noveno mes el T1 y T3 tienden a aumentar, contrario a lo que sucede en el T2. No se perciben a lo largo del tiempo diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) entre los tratamientos con biosólidos, incluido el control, a excepción del T3 que presenta diferencias entre la transición del tiempo cero al tercer mes (Figura 21a). Una similar tendencia se presenta a la profundidad de 15-30 cm (Figura 21b).

Paralelamente, el T1 contiene una mayor cantidad de calcio, al inicio y tercer mes, en la profundidad de 15-30 cm, posteriormente se mantiene y en el noveno mes aumenta en la profundidad de 0-15 cm, mientras que el T2 posee una mayor cantidad al inicio, sexto y noveno mes en la profundidad de 15-30 cm, y el T3 a lo largo del tiempo en la profundidad de 15-30 cm (Figuras 21a y 21b).

Según la calificación del IGAC en la Tabla 19, los valores de calcio en las parcelas control en ambas profundidades y en el suelo del bosque son bajos, en el T1 son medios y en los T2 y T3 son altos. En este sentido, todos los tratamientos con biosólidos exceden los contenidos de calcio, en comparación con el suelo del bosque, lo cual se hace más evidente en el T3.



**Figura 21a.** Variación del calcio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 21b.** Variación del calcio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

**Tabla 19.** Comparación del calcio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

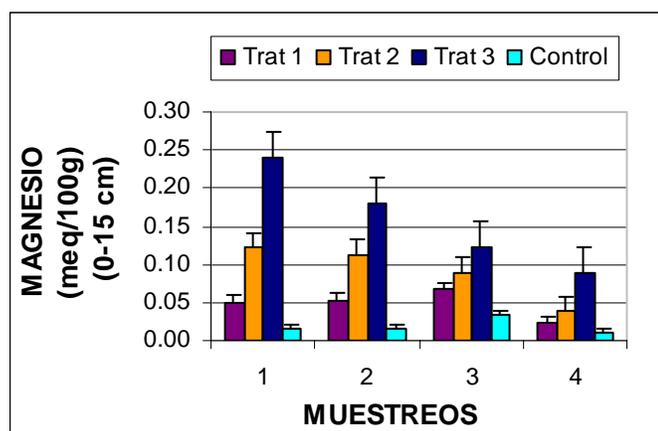
Profundidad/Tratamiento	CALCIO (meq/100g)					Bosque	IGAC
	C	T1	T2	T3			
0 - 15 cm	0,09	3,5	5,9	10,2	1,8	< 3 = Bajo	
15 - 30 cm	0,09	3,4	6,0	12,0		3 - 6 = Medio	
						> 6 = Alto	

#### **8.1.10 Comportamiento del magnesio en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.**

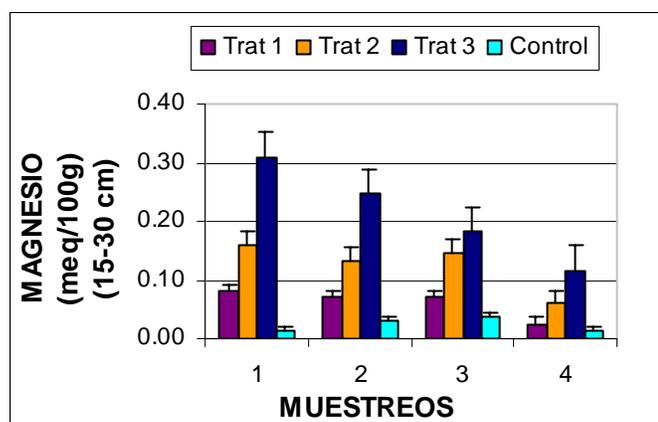
Durante los diferentes muestreos en la profundidad de 0-15 cm, prevalece una mayor cantidad de magnesio en el T3, seguido del T2, T1 y C. Dicha cantidad es más evidente en el muestreo 1. Así mismo, en todos los muestreos existen diferencias significativas ( $p < 0.001$ ), entre los diferentes tratamientos y el control, con excepción del T1 en el muestreo 4, el cual se comporta estadísticamente similar con el T2 y el C (Figuras 22a). Una similar tendencia se presenta en la profundidad de 15-30 cm (Figuras 22b). Igualmente, se genera en todos los tratamientos una mayor proporción de magnesio, en la profundidad de 15 a 30 cm que de 0-15 cm, durante los cuatro muestreos efectuados (Figuras 22a y 22b).

Por otro lado, en la profundidad de 0-15 cm, el magnesio en los T2 y T3, tienden a disminuir a lo largo del tiempo, mientras que el T1 fluctúa a lo largo del tiempo. Se presentan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) en el sexto y noveno mes, en los T1 y T2, mientras que en el T3 se generan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) a lo largo del tiempo, excepto en el noveno mes (Figuras 22a). Una similar tendencia se presenta en la profundidad de 15-30 cm (Figuras 22b). De igual manera, a lo largo del tiempo el T3 y el T2, contienen una mayor proporción de magnesio en la profundidad de 15-30 cm (Figuras 22b).

Los valores de magnesio en las parcelas control y en los diferentes tratamientos con biosólidos son bajos según el IGAC. Sin embargo, el T3 es el que posee mayores cantidades de magnesio. Por esta razón, el T3 en la profundidad de 15 a 30 cm, es el que más se acerca al valor del suelo del bosque; este último contiene al igual que los otros tratamientos una baja proporción de magnesio (1meq/100gr) (Tabla. 20).



**Figura 22a.** Variación del magnesio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 22b.** Variación del magnesio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

**Tabla 20.** Comparación del magnesio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC

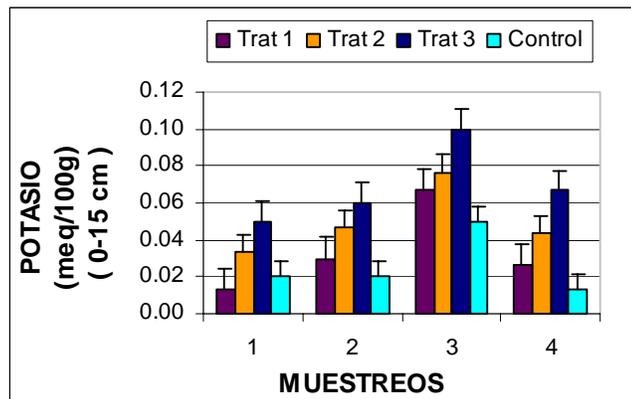
MAGNESIO (meq/100g)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	0,01	0,02	0,04	0,09	1,0	< 1.5 = Bajo
15 - 30 cm	0,01	0,02	0,06	0,12		5 - 2.5 = Medio
						> 2.5 = Alto

### **8.1.11 Comportamiento del potasio en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.**

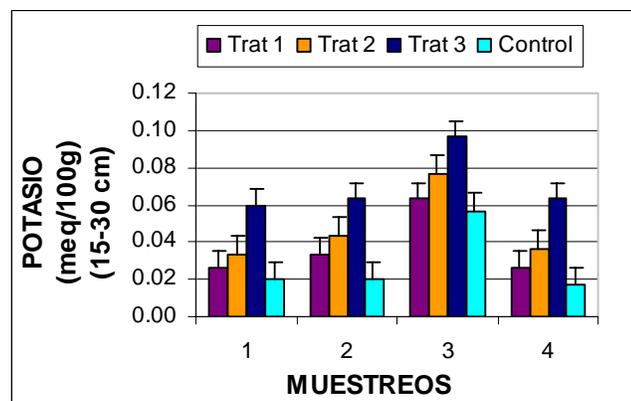
Durante los muestreos 1-2-3 y 4 en la profundidad de 0-15 cm, se observa un aumento del potasio, en el T3, seguido del T2, T1 y C. Dicho aumento se evidencia en mayor proporción en el muestreo 3. Así mismo, en los muestreos 3 y 4 se presentan diferencias significativas ( $p < 0.00$ ) entre los diferentes tratamientos, incluido el control, mientras que en los muestreos 1 y 2, el T1 es estadísticamente similar al C (Figura 23a). Un comportamiento similar se presenta en la profundidad de 15-30 cm (Figura 23b). Paralelamente, se registra en el muestreo 1 una mayor proporción de potasio en todos los tratamientos, en la profundidad de 15 a 30 cm, mientras que en los muestreos 2, 3 y 4 los valores del potasio se mantienen similares en ambas profundidades (Figuras 23a y 23b).

Por otro lado, se presenta en la profundidad de 0-15 cm, una mayor cantidad de potasio en todos los tratamientos durante la transición inicial al tercer mes, siendo significativo este aumento en los T1 y T3, mientras que en el sexto mes, se presenta un incremento significativo ( $p < 0.001$ ) en todos los tratamientos incluido el control, posteriormente, en el noveno mes disminuyen significativamente ( $p < 0.001$ ) (Figura 23a). Una similar respuesta se presenta en la profundidad de 15-30 cm (Figura 23b). Las proporciones de potasio en todos los tratamientos, fluctúan en el tiempo en ambas profundidades (Figura 23a y 23b).

Teniendo en cuenta las cantidades establecidas por el IGAC, en la Tabla 21, los valores del potasio en las parcelas de control y en los tratamientos con biosólidos en las dos profundidades, son muy bajos. No obstante, el T3 contiene una mayor cantidad, seguido del T2 y T1. Debido a lo mencionado anteriormente, el T3 es el que más se acerca al valor del suelo del bosque; este último contiene al igual que los otros tratamientos una baja proporción de potasio.



**Figura 23a.** Variación del potasio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 23b.** Variación del potasio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

**Tabla 21.** Comparación del potasio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

POTASIO (meq/100g)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	0,01	0,03	0,04	0,07	0,1	< 0.15 = Bajo
15 - 30 cm	0,02	0,03	0,04	0,06		0.15 - 0.35 = Medio
						> 0.35 = Alto

### **8.1.12 Comportamiento del sodio en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.**

En el muestreo 1 en la profundidad de 0-15 cm, se presenta un aumento del sodio en el T3, seguido del T2, T1 y C, presentando el T1 y T2 una similitud estadística con el T3 y el C. Así mismo, en el muestreo 2, se evidencia una mayor cantidad de sodio en el T2, seguido del T3, C y T1, mostrando el T3 una similitud con el T1, T2 y C. Por otro lado, en el muestreo 3, el control presenta un incremento no significativo ( $p>0.001$ ), con respecto a los otros tratamientos, mientras que en el muestreo 4, los valores de sodio son iguales en los T3 y T2 (Figura 24a). Igualmente, a la profundidad de 15-30 cm, se observa en el muestreo 1 un mayor proporción de sodio en los T1 y T3 que difieren significativamente, con respecto a los otros tratamientos, mientras que en el muestreo 2 se presenta un mayor valor en el T3 y C, en el muestreo 3 el mayor valor lo posee el T3, y en el muestreo 4 las más altas proporciones se generan en el T1 y C. Dichos aumentos no son significativos ( $p>0.001$ ) con respecto a los otros tratamientos (Figura 24b).

Paralelamente, se registra en el C en la profundidad de 15 a 30 cm, una mayor proporción de sodio al inicio del experimento y en el muestreo 2. Así mismo, en los otros muestreos no se percibe una marcada tendencia de una mayor cantidad de sodio en alguna de las profundidades (Figura 24b).

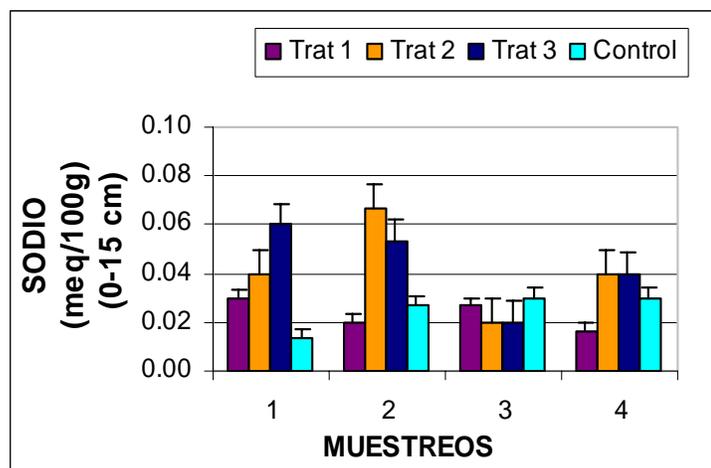
Inicialmente, el T3 presenta una mayor cantidad de sodio, pero al tercer y sexto mes disminuye, mientras que en el noveno mes aumenta sin presentar en el tiempo diferencias significativas ( $p>0.001$ ), así mismo, el T2 aumenta en el tercer mes, posteriormente disminuye, para luego volver a incrementar, mientras que el T1, disminuye en el tercer y noveno mes sin presentar diferencias significativas ( $p>0.001$ ), y en las parcelas control, se evidencia que a medida que pasa el tiempo va aumentando los contenidos de sodio (Figura 24a). Por otro lado, en la profundidad de 15-30 cm se observa que el T3 y T1 disminuyen en el tiempo sin presentar diferencias significativas ( $p>0.001$ ), mientras que el T1 y C, fluctúan a lo

largo del tiempo, presentando en la transición inicial al tercer mes diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) (Figura 24b).

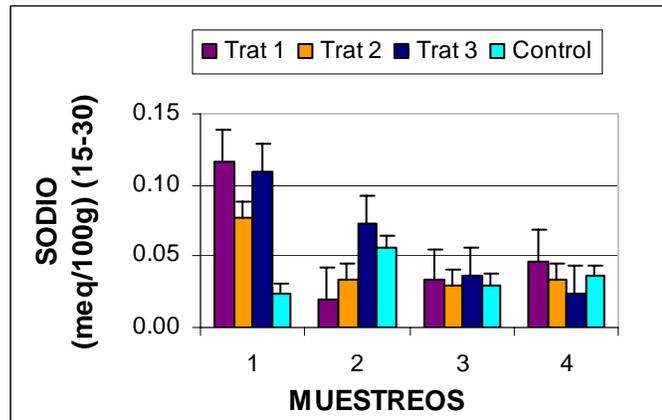
Los valores de sodio deben estar por debajo de 1, factor que se evidencia en las parcelas control, en los tratamientos con biosólidos y en el suelo del bosque. No obstante, el T1 en la profundidad de 15 a 30 cm, es el que más se acerca al valor del suelo del bosque (Tabla. 22).

**Tabla 22.** Comparación del sodio durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

SODIO (meq/100g)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	0,03	0,02	0,04	0,04	0,07	< 1 Óptimo
15 - 30 cm	0,04	0,05	0,03	0,02		



**Figura 24a.** Variación del sodio (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 24b.** Variación del sodio (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

### 8.1.13 Comportamiento de las bases totales en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.

En los diferentes muestreos de la profundidad de 0-15 cm, se observa una mayor cantidad de bases totales en el T3, seguido del T2, T1 y C. No obstante, durante el muestreo 1, 3 y 4 se observan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ), entre todos los tratamientos, incluidos los controles, mientras que en el muestreo 2 se registran diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) en el T3 y T2 con el T1 y C (Figura 25a). Una similar tendencia se presenta en todos los tratamientos en la profundidad de 15 a 30 cm (Figura 25b). Así mismo, todos los tratamientos en el muestreo 1, presentan una mayor proporción de bases en la profundidad de 15 a 30 cm, al igual que en los T3 y T1 en el muestreo 2 y en los T2 y T3 en el muestreo 3 y 4 (Figura 25a y 25b)

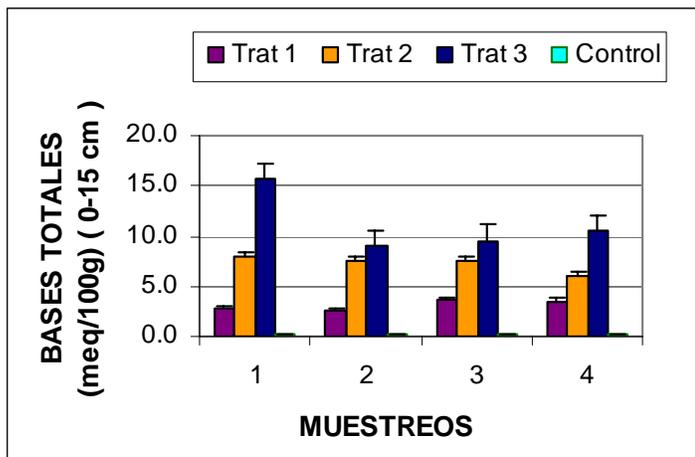
Por otro lado, el T3 disminuye significativamente al tercer mes y posteriormente aumenta en el sexto y noveno mes, el T2 aumenta a lo largo del tiempo, mientras que el T1 y C aumentan y disminuyen a lo largo de los nueve meses. Ningún tratamiento presenta en el tiempo diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) (Figura 25a). Una similar tendencia se produce en la profundidad de 15-30 cm (Figura 25b). Paralelamente, se registra en el T3 a lo largo del tiempo, en el T2 al inicio, sexto y

noveno mes y en el T1 al inicio y al tercer mes, una mayor proporción de bases en la profundidad de 15 a 30 cm que de 0 a 15 cm.

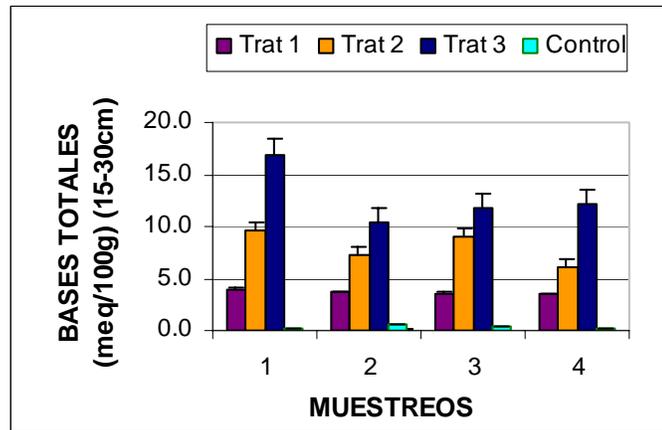
El T3 en ambas profundidades es el que mayor cantidad de bases totales contiene, en comparación con los otros tratamientos. Sin embargo, todos los tratamientos con biosólidos exceden el valor del suelo del bosque, siendo el valor del T1, lo más parecido al valor del suelo del bosque (Tabla 23). Dicha variable no contiene una clasificación dada por el IGAC.

**Tabla 23.** Comparación del carbono orgánico durante el noveno mes entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque.

BASES TOTALES (meq/100g)					
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque
0 - 15 cm	0,17	3,5	6,0	10,4	3,0
15 - 30 cm	0,17	3,4	6,1	12,2	



**Figura 25a.** Variación de las bases totales (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo.



**Figura 25b.** Variación de las bases totales (meq/100g) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

#### 8.1.14 Comportamiento de la saturación de bases en los tratamientos, durante cada muestreo, en el tiempo y con relación al suelo del bosque.

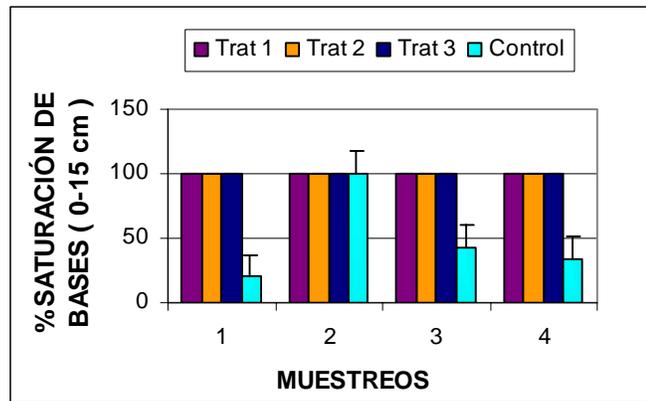
Como el valor de la saturación de bases durante los muestreos 1-2-3-4, es igual en la profundidad de 0-15 cm y 15-30 cm en los tratamientos con biosólidos; no se presenta diferencias significativas ( $p < 0.001$ ). Sin embargo, las parcelas de control en el muestreo 2, contienen un valor similar de saturación con respecto a los otros tratamientos (Figuras 26a y 26b).

Los tratamientos con biosólidos a la profundidad de 0-15 cm y 15-30 cm, no presentan diferencias significativas en el tiempo. A diferencia de las parcelas de control, que aumentan significativamente en el tercer mes, mientras que en el sexto y noveno mes disminuyen sin registrar diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) (Figuras 26a y 26b).

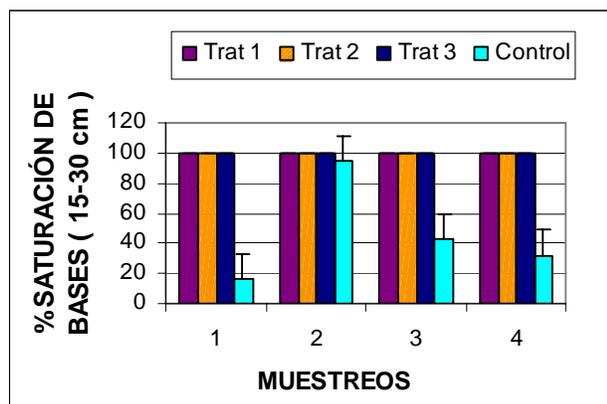
Aunque las parcelas de control contienen en ambas profundidades, bajas cantidades de bases saturadas, se acercan al valor medio establecido por el IGAC; contrario a esto, los tratamientos con biosólidos, están saturados de bases en un 100%, siendo un estado ideal. Así mismo, todos los tratamientos con biosólidos, incluido el control, sobrepasan el valor del suelo del bosque que contiene al igual que los controles, una baja saturación de bases (Tabla 24).

**Tabla 24.** Comparación de la saturación de bases durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación IGAC.

SATURACIÓN DE BASES (%)						
Profundidad/Tratamiento	C	T1	T2	T3	Bosque	IGAC
0 - 15 cm	34,2	100	100	100	31,5	< 35 = Bajo
15 - 30 cm	32,0	100	100	100		35 - 50 = Medio
						> 50 = Alto



**Figura 26a.** Variación de la saturación de bases (%) en la profundidad de 0 a 15 cm a través del tiempo



**Figura 26b.** Variación de la saturación de bases (%) en la profundidad de 15 a 30 cm a través del tiempo.

## 8.2 VARIABLES FÍSICAS

\* Los valores de las variables físicas fueron considerados según las Tablas de Clasificación de Montenegro (2003) de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Anexo 6).

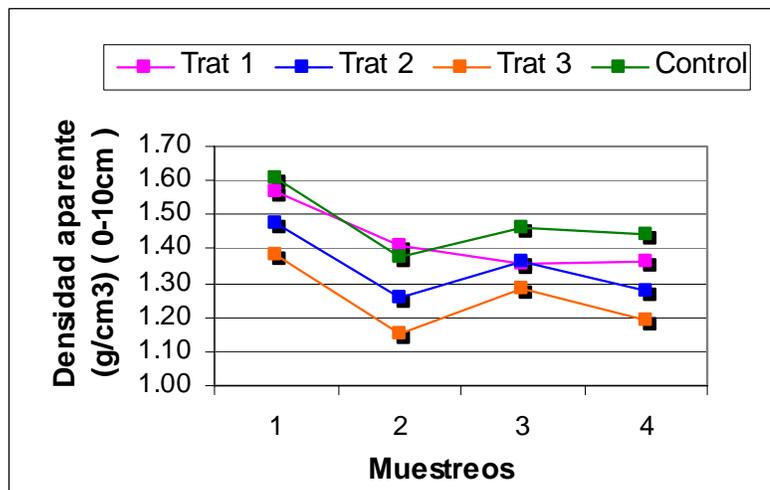
### 8.2.1 Comportamiento de la densidad aparente de los tratamientos, durante cada muestreo y en el tiempo.

#### ➤ Densidad aparente en los diferentes muestreos

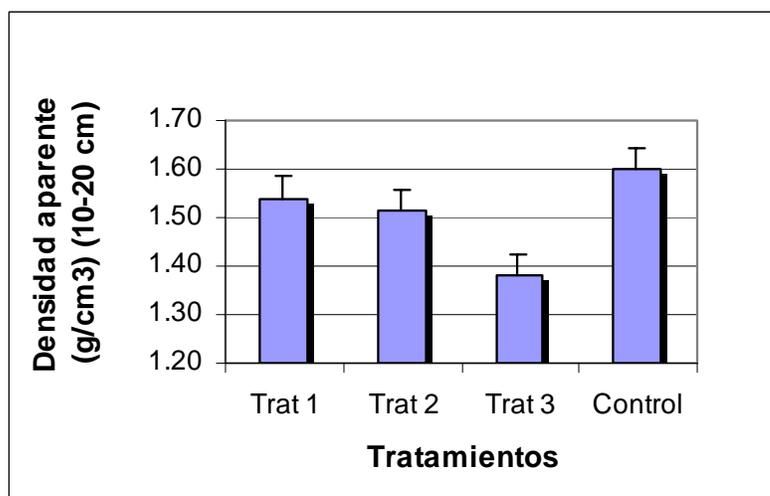
Los análisis muestran que entre mayor sean las proporciones de materia orgánica, menor serán los valores de la densidad aparente. Esto se evidencia a lo largo de los muestreos (1-2-3 y 4) en todos los tratamientos y en las diferentes profundidades muestreadas (Figura 27a, 27b, 27c y 27d). Por otro lado, de 0 a 10 cm, se presentan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre todos los tratamientos en el muestreo 1 y 4 (Figura 27a), mientras que en la profundidad de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, realizada en el muestreo 1, sólo se generan diferencias significativas entre el T3 y el C, (Figuras 27b y 27c) y en la profundidad de 10 cm en adelante, efectuada a partir del muestreo 2, se evidencian diferencias ( $p < 0.001$ ) entre los diferentes tratamientos en el muestreo 4 (Figura 27d).

#### ➤ Densidad aparente en el tiempo

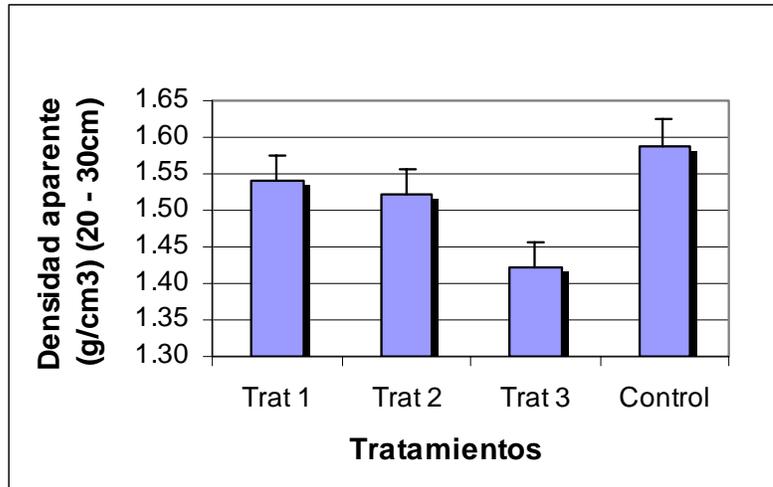
Tal y como muestra la Figura 17.1, los valores de densidad aparente en la profundidad de 0 a 10 cm, en todos los tratamientos con biosólidos tienden a disminuir en el tercer y noveno mes, mientras que los valores en las parcelas control disminuyen en cada mes de muestreo (Figura 27a). Igualmente, los tratamientos con biosólidos en la profundidad de 10 cm en adelante, tienden a aumentar en el sexto mes y a disminuir en el noveno mes (Figura 27d). Por otro lado, se evidencia en ambas profundidades, diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) en los T2 y T3 en el tiempo. A lo largo de los nueve meses, se percibe en la profundidad de 10 cm en adelante, un menor valor de la densidad en el T2, mientras que en el T1 y T3, los mayores y menores valores fluctúan entre ambas profundidades (Figura 27a y 27d).



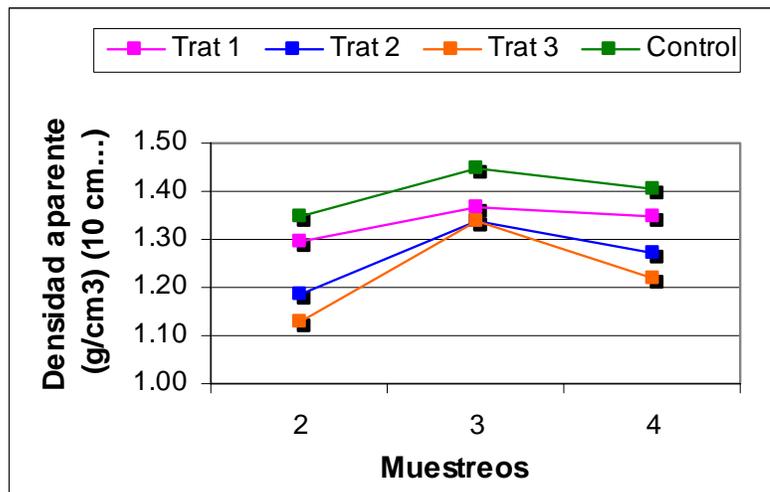
**Figura 27a.** Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo.



**Figura 27b.** Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 a 20 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos.



**Figura 27c.** Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 20 a 30 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos



**Figura 27d.** Variación de la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo.

## 8.2.2 Comportamiento de la densidad real de los tratamientos, durante cada muestreo y en el tiempo.

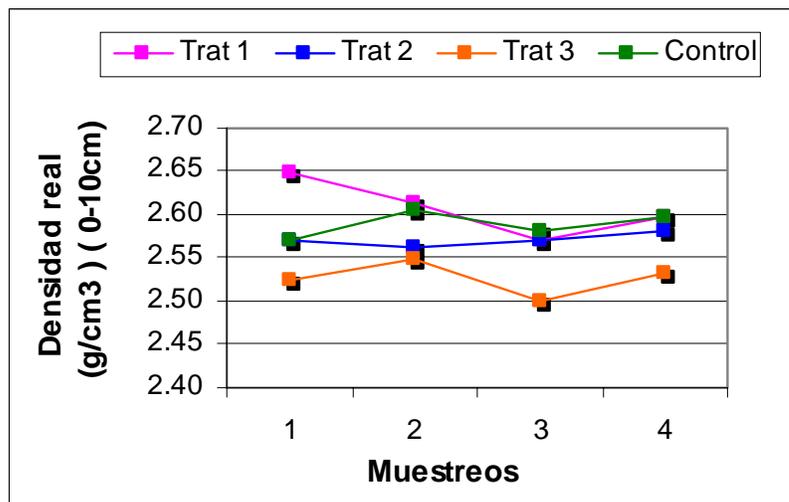
### ➤ Densidad real en los diferentes muestreos

La densidad real, al igual que la densidad aparente, se ve afectada por los contenidos orgánicos. En este sentido, se presenta en la profundidad de 0 a 10 cm, en el muestreo 1 y 2 una mayor densidad real en el T1, seguido del control y el T2, y por último del T3, mientras que en el muestreo 3 y 4, los valores son casi iguales entre los T1, T2 y control, así mismo, el T3 sigue manteniendo la densidad real más baja en todos los muestreos en comparación con los otros tratamientos. De igual manera, no se presentan diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) entre los T1, T2 y C en los muestreos 1, 3 y 4 (Figura 28a). Paralelamente, en la profundidad de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, realizada en el muestreo 1, se generan diferencias significativas ( $P < 0.001$ ) entre todos los tratamientos (Figuras 28b y 28c). Una similar tendencia se presenta en la profundidad de 10 cm en adelante (Figura 28d).

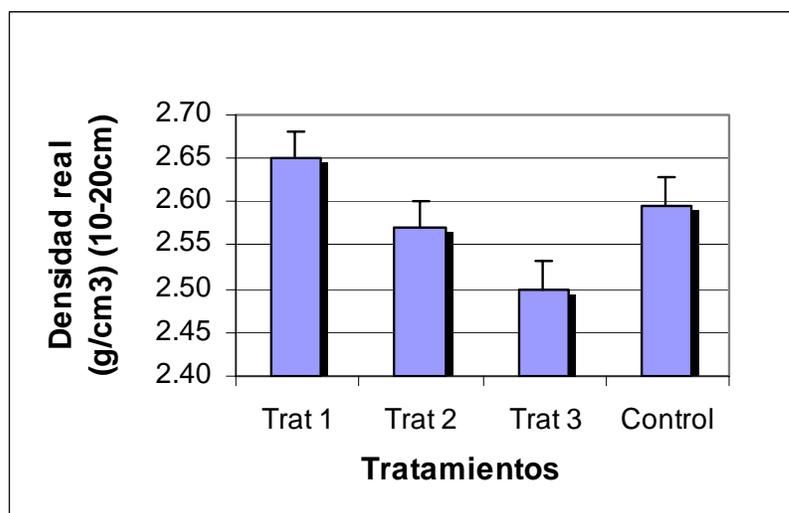
### ➤ Densidad real en el tiempo

En la profundidad de 0 a 10 cm, la densidad real del T1 tiende a disminuir en el tercer y sexto mes, posteriormente aumenta, mientras que el T2 disminuye en el tercer y aumenta en el sexto y noveno mes y los T3 y C aumentan en el tercer y noveno mes. De los anteriores tratamientos sólo se presentan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) en el T1 a lo largo del tiempo y en el T3 entre la transición del tercer al sexto mes (Figura 28a). Por otro lado, en la profundidad de 10 cm en adelante, se evidencia un aumento en todos los tratamientos en el sexto mes y una disminución en el noveno mes. Así mismo, sólo se perciben diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.001$ ) en el T3 durante la transición de tercer al sexto mes (Figura 28d).

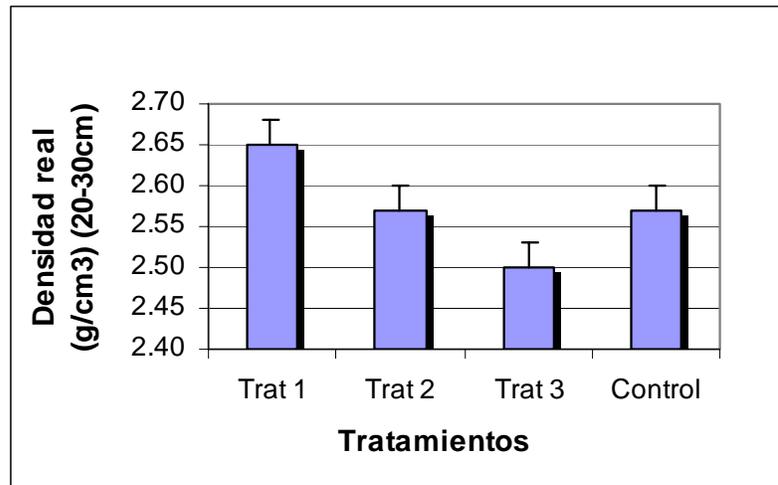
Según Montenegro (2003), la densidad real fluctúa entre 2.5 a 2.65 g/cm<sup>3</sup>. Dichos valores se presentan en todos los tratamientos a lo largo del tiempo.



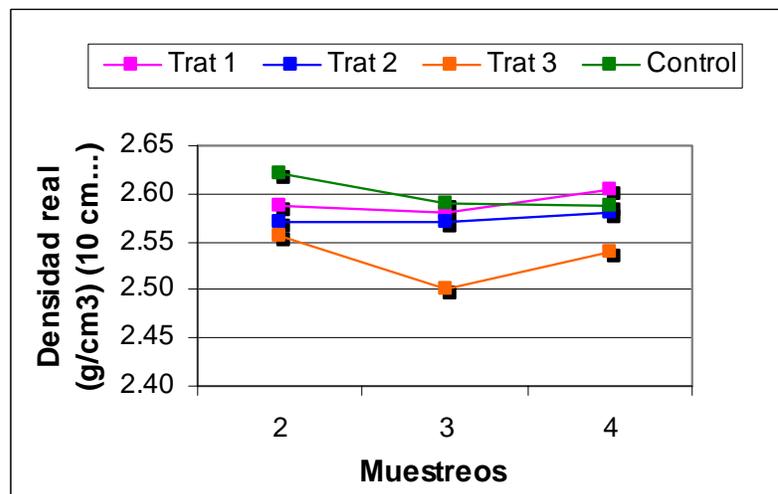
**Figura 28a.** Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo.



**Figura 28b.** Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 a 20 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos.



**Figura 28c.** Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 20 a 30 cm, durante el primer muestreo en todos los tratamientos.



**Figura 28d.** Variación de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo.

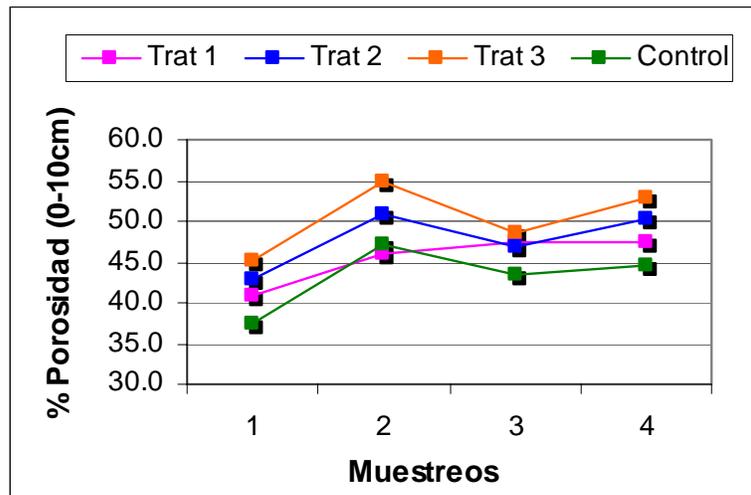
### **8.2.3 Comportamiento de la porosidad en los tratamientos, durante cada muestreo y en el tiempo.**

#### ➤ Porosidad en los diferentes muestreos

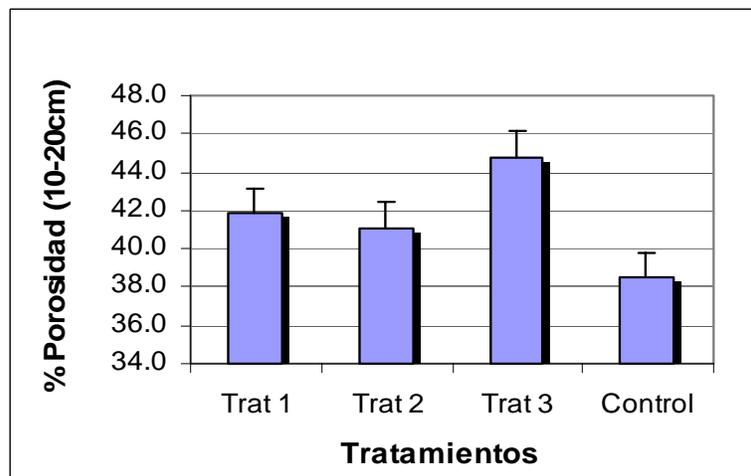
Los análisis muestran que entre mayor sea la cantidad de biosólido aplicado al suelo, mayor será el porcentaje de poros. Esto se evidencia a lo largo de los muestreos (1-2-3- 4) en todos los tratamientos y en las diferentes profundidades muestreadas (Figura 29a, 29b, 29c y 29d). En este sentido, se presenta en la profundidad de 0 a 10 cm, a lo largo de todos los muestreos una mayor porosidad en el T3, seguido del T2, T1 y C. De igual manera, en los muestreos 1-2 y 4 se presentan diferencias significativas ( $p > 0.001$ ), en los tratamientos con biosólidos incluido el control (Figura 29a). En la profundidad de 10 a 20 cm realizada en el muestreo 1, se observan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre el T3 y el C, mientras que de 20 a 30 cm, se manifiesta diferencias ( $p < 0.001$ ) entre todos los tratamientos (Figura 29b y 29c). Una similar tendencia en la cantidad de poros se presenta en la profundidad de 10 cm en adelante, realizada a partir del muestreo 2 (Figura 29d).

#### ➤ Porosidad en el tiempo

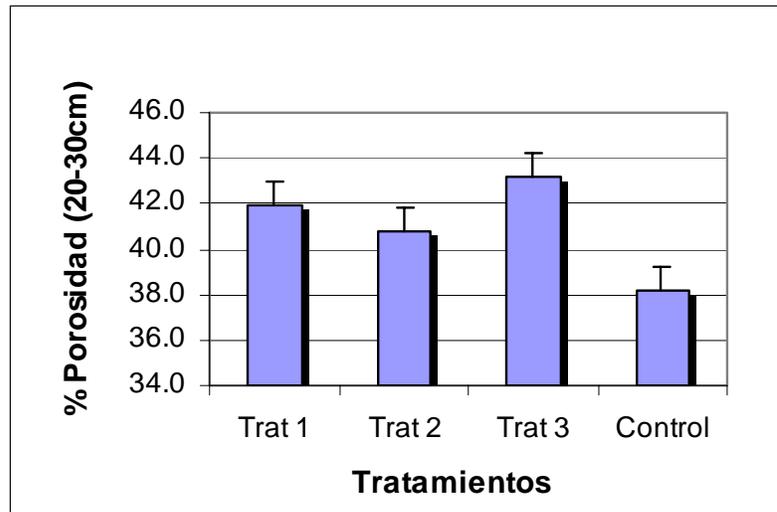
En la profundidad de 0 a 10 cm, el porcentaje de poros en el T1 tiende a aumentar en el tiempo, mientras que en los T2, T3 y C aumentan en el tercer y noveno mes. Así mismo se presentan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) en el T1, entre la transición inicial al tercer mes y en el T2 y T3 a lo largo del tiempo (Figura 29a). De igual manera, en la profundidad de 10 cm en adelante, se evidencia en todos los tratamientos una disminución de la porosidad en el tercer mes y un aumento en el noveno mes. Sin embargo, existen diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) en los T2 y T3 a lo largo del tiempo y en el control entre la transición del tercer al sexto mes (Figura 29d). Paralelamente, se observa en el muestreo 1, un mayor porcentaje de poros en los T2 y T3 de 0-10 cm, mientras que en las profundidades de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, la cantidad de poros son mayores y semejantes en los T1 y C. Igualmente, en la profundidad de 10 cm en adelante, se presenta una mayor cantidad de poros a lo largo del tiempo, comparado con la profundidad de 0-10 cm.



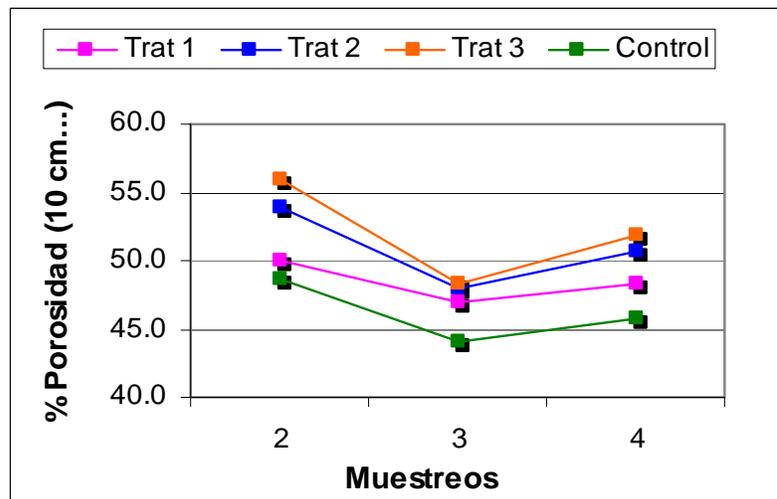
**Figura 29a.** Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo.



**Figura 29b.** Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 10 a 20 cm, durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos.



**Figura 29c.** Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 20 a 30 cm durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos.



**Figura 29d.** Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo.

#### **8.2.4 Comportamiento de la humedad en los tratamientos, durante cada muestreo y en el tiempo.**

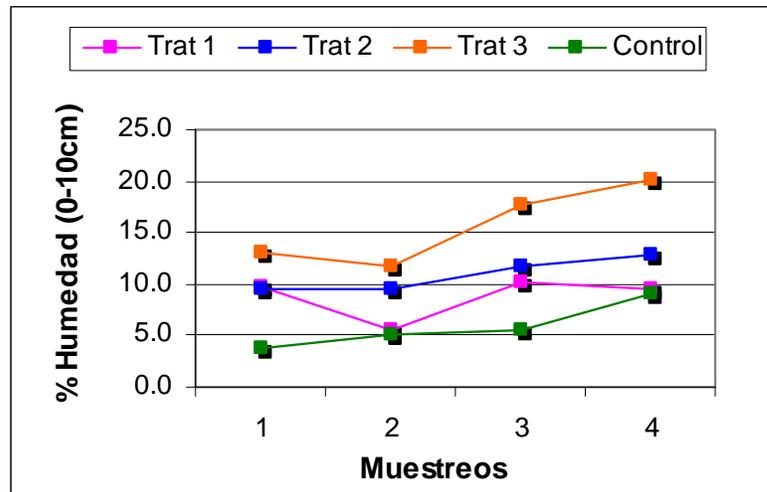
➤ Humedad en los diferentes muestreos

Los análisis muestran que entre mayor sea la cantidad de biosólido aplicado al suelo, mayor será el contenido de humedad. Esto se evidencia a lo largo de los muestreos (1-2-3 y 4) en todos los tratamientos y en las diferentes profundidades muestreadas (Figura 30a, 30b, 30c y 30d). En este sentido, se presenta en la profundidad de 0 a 10 cm, a lo largo de todos los muestreos una mayor cantidad de humedad en el T3, seguido del T2, T1 y C. Así mismo, en el muestreo 1, 3 y 4 existen diferencias significativas ( $p > 0.001$ ), entre el T3 con el T1, T2 y C, mientras que en el muestreo 2, hay diferencias entre todos los tratamientos con biosólidos, sin embargo el T1 y el C son estadísticamente similares (Figura 30a). Igualmente, se presentan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ), entre todos los tratamientos en las profundidades de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, registradas al inicio del experimento (Figuras 30b y 30c), mientras que en la profundidad de 10 cm en adelante, se evidencian diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) en los diferentes tratamientos en el muestreo 2 y 3 (Figura 30d).

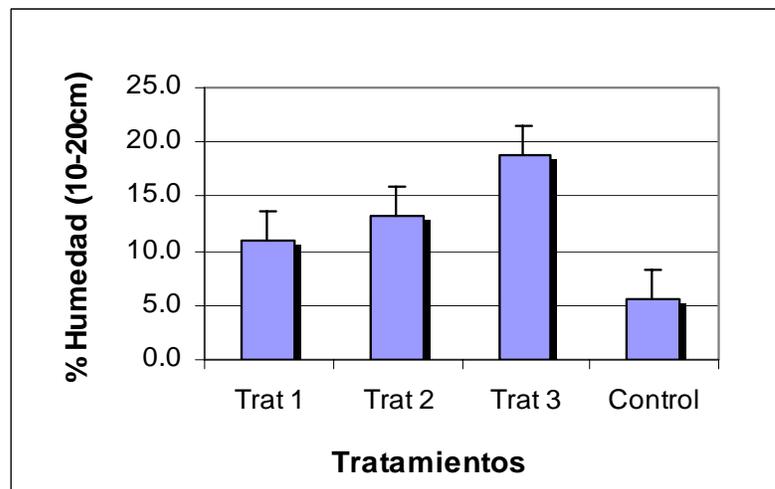
➤ Humedad en el tiempo

El porcentaje de humedad en la profundidad de 0-10 cm, tienden a aumentar en el tiempo en todos los tratamientos, excepto en el T1, que presenta variaciones a lo largo del tiempo. Sin embargo, se muestran diferencias significativas en el T1 y T3 en la transición del tercer al sexto mes (Figura 30a). Por otro lado, en la profundidad de 10 cm en adelante, se presenta en el tiempo un incremento de la humedad en todos los tratamientos y se observan diferencias significativas en la transición del tercer al sexto mes (Figura 30d). Igualmente, se presenta en el primer muestreo de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, un mayor porcentaje de humedad en todos los tratamientos en comparación con la profundidad de 0-10 cm, mientras que de 10 cm en adelante, se registra una mayor cantidad de humedad a lo largo del tiempo comparado con la profundidad de 0-10 cm (Figura 30a, 30b, 30c y 30d).

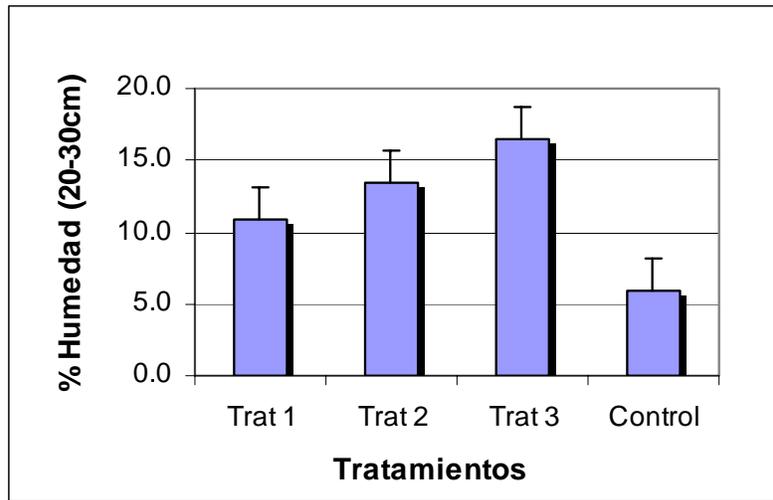
Las parcelas control contienen una clasificación muy baja (<5 %), a comparación de los T1 y T2 que presentan valores bajos (5 -15 %), mientras que los T3 poseen una clasificación baja (5 -15 %) a media (15-25 %), esta última clasificación del T3, se exhibe más en el 3 y 4 muestreo.



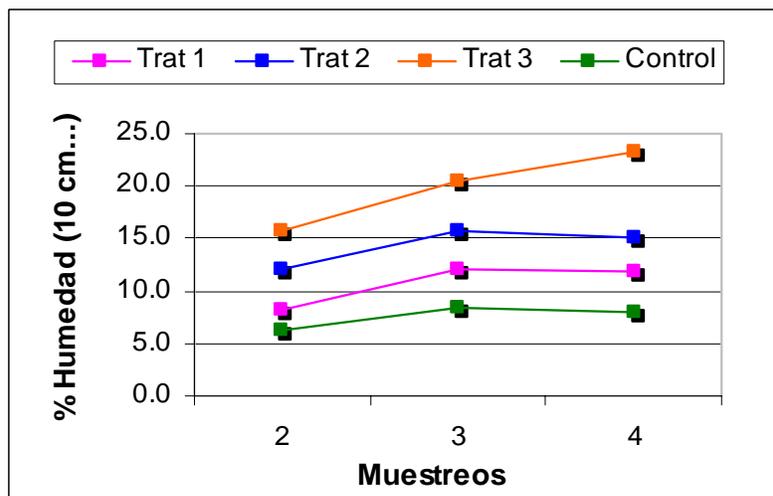
**Figura 30a.** Variación de la humedad (%) en la profundidad de 0 a 10 cm a través del tiempo.



**Figura 30b.** Variación de la humedad (%) en la profundidad de 10 a 20 cm durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos.



**Figura 30c.** Variación de la humedad (%) en la profundidad de 20 a 30 cm durante el primer muestreo en los diferentes tratamientos.



**Figura 30d.** Variación de la humedad (%) en la profundidad de 10 cm en adelante a través del tiempo.

## 9. DISCUSIÓN

### 9.1 Comportamiento de las variables químicas en los diferentes tratamientos con biosólidos.

Los resultados en cada muestreo evidencian que el porcentaje de carbono orgánico es mayor de acuerdo a las dosis aplicadas. A su vez, el carbono tiende a aumentar en el tiempo en todos los tratamientos, excepto en el tercer mes, en el T3 en los primeros 30 cm de profundidad y en los T1 y T2 de 15 a 30 cm. Dicho aumento es más relevante en el sexto y noveno mes, tanto por el biosólido, como por los restos orgánicos que aporta la vegetación de tipo espontánea que allí se establece, tal y como lo afirman algunos autores (Alcañiz, 2001; García, 2001). Así mismo, al disminuir el carbono orgánico en el tercer mes, se presentan procesos de degradación o mineralización de compuestos fácilmente degradables del biosólido.

De igual manera, se resalta el hecho de que en los T1 y T2 de 0 a 15 cm, se observa un aumento del carbono y no una disminución como si sucede en la profundidad de 15 a 30 cm, lo cual nos puede estar indicando que los microorganismos establecidos en los primeros 15 cm, quedan expuestos a factores ambientales drásticos (radicación, temperatura, humedad, aireación entre otros), que generan una disminución en la biomasa microbiana del suelo, lo cual incrementa las células muertas y por lo tanto se presenta un incremento del carbono orgánico en dichos tratamientos en el tercer mes, ya que para este período todavía no existe presencia de vegetación (Burbano, 1989; Wong *et al.* 1998; García, 2001; Pascual *et al.* 2001).

Al inicio del experimento, se observa en todos los tratamientos con biosólidos un mayor contenido de carbono orgánico a la profundidad de 15 a 30 cm, probablemente por efecto del proceso de translocación y lixiviación, que ejercen una importante acción en la formación del suelo, debido a que mezclan, agregan y separan materiales edáficos, gracias a la influencia de organismos del suelo, al agua que transporta los materiales, a la gravedad, al hinchamiento y contracción de la masa del suelo, entre otros (Porta & López, 1993). En este sentido, las partículas

del biosólido penetran o se infiltran por los espacios porosos, influenciados quizás por factores como la gravedad y las frecuentes precipitaciones que se presentan principalmente entre los meses de octubre y diciembre, lo cual genera un arrastre y concentración del biosólido hacia las partes inferiores del suelo, de tal forma que ocasiona una mayor proporción de elementos como el fósforo, el calcio, el magnesio y aumenta la conductividad eléctrica.

García (2001), plantea que en suelos degradados, sometidos a condiciones climáticas adversas, sin vegetación y con escasos contenidos de materia orgánica, las poblaciones microbianas capaces de sobrevivir son escasas. En este sentido, gran parte de los microorganismos que actúan en la mineralización de los diferentes tratamientos son los de tipo fecal que contiene el biosólido y que con el tiempo disminuyen ya que dan paso a los de la microflora propia del suelo (Asesoría de Claudia Campos).

Contrario a lo mencionado anteriormente, Wong y colaboradores (1998) revelan que una excesiva implementación de biosólidos a los suelos ( $350 \text{ g/Kg}^{-1}$ ) disminuye el porcentaje de mineralización del carbono, debido al incremento en los contenidos orgánicos que exceden la capacidad de degradación microbial, lo cual limita el crecimiento de las plantas por no tener nutrientes disponibles. Así mismo, propone que un elevado contenido de humedad (40%) puede decrecer el suplemento de oxígeno para la biodegradación y por lo tanto afectar la mineralización del carbono.

Aunque los valores de nitrógeno total en las profundidades de 0-15 cm y de 15-30 cm, muestran diferencias significativas, no existe en el tiempo una gran variación de ésta propiedad en los tratamientos con biosólidos. Así mismo, aunque los valores son bajos, se evidencia al igual que en otros parámetros, que entre mayor sea la proporción de biosólidos aplicado al suelo, mayor serán los contenidos de nitrógeno, tal y como lo plantean otros autores (Panagopoulos & Hatzistathis, 1995; Navas & Machin, 1998; Wong *et al.* 1998; Alcañiz, 2001)

Contrario a este estudio y dependiendo de las dosis aplicadas; se ha encontrado que el nitrógeno aumenta bastante al poco tiempo de la aplicación de biosólidos

debido a la mineralización del carbono orgánico y que posteriormente disminuye, posiblemente por el descenso de la mineralización o por efectos de la volatilización, nitrificación e inmovilización del nitrógeno (Gómez, 1994; Wong *et al.* 1998 y Alcañiz, 2001). A su vez, Arcaç *et al.* (2000), propone que al aplicar altas dosis de biosólido, las bacterias no podrían descomponer las grandes cantidades de amonio, nitritos y nitratos que se acumulan en el suelo.

La relación C/N influye en la tasa de descomposición y el ciclaje de nutrientes; si la relación es inferior a 25, se favorece la descomposición de la materia orgánica y si es mayor a 25 se produce una inmovilización del nitrógeno como resultado del aumento de la población y actividad microbiana tal y como lo propone (Garavito, 1979; Burbano, 1989) Por lo tanto, aunque todos los tratamientos con biosólidos, contienen valores muy bajos de nitrógeno, la relación C/N se encuentra por debajo de 25, lo cual indica que hay disponibilidad de nitrógeno para la vegetación. De igual forma, la relación tiende a aumentar en el tiempo, lo cual refuerza la idea de que se está incorporando al suelo una materia orgánica de origen vegetal, con una relación C/N mayor que la que se presenta inicialmente en los tratamientos con biosólidos.

La adición de biosólidos causa un incremento significativo en el pH, en comparación con las parcelas control, ya que éstas últimas presentan valores de pH ácidos en relación con los valores neutros que contienen las parcelas con biosólidos. Tal incremento es debido, al aporte de carbonato de calcio que contiene el biosólido, que reduce la acidez del suelo, lo cual favorece la solubilidad de ciertos nutrientes como el nitrógeno, el calcio, el fósforo, el potasio, entre otros. Igualmente, el valor de pH del suelo del bosque es extremadamente ácido, lo cual difiere con los tratamientos con biosólidos, debido a que los suelos del bosque contienen ácidos fúlvicos y húmicos que generan la acidez en el suelo (Thompson, 1974).

De igual manera, los niveles de pH tienden a disminuir en el tiempo en todos los tratamientos con biosólidos, posiblemente porque el efecto estabilizador de los carbonatos va desapareciendo, debido a su agotamiento por efecto de la lixiviación, así mismo, durante la mineralización de la materia orgánica se liberan cationes, que pueden desplazarse a capas inferiores o que al ser absorbidas por las plantas

liberan iones de hidrógeno (H<sup>+</sup>), que contribuyen a dicha acidificación. Los resultados del pH coinciden con otros estudios (Alcañiz *et al.* 1996; Alcañiz *et al.* 1998; Wong *et al.* 1998; Pacheco & Patiño, 2003).

Igualmente, se ha registrado para suelos básicos una disminución del pH, posiblemente por la naturaleza acidificante del agua del biosólido. Es decir, que aunque un suelo contenga un pH superior a 8.5 y se adicione biosólidos que contienen carbonatos de calcio, los cuales aumentan el pH, sucede todo lo contrario ya que el biosólido genera una reacción que tiende a la neutralidad ya sea que se aplique en suelos ácidos o básicos (Panagopoulos & Hatzistathis, 1995; Navas & Machin, 1998).

Así mismo, el incremento del pH limita la solubilidad del ión aluminio en los diferentes tratamientos con biosólidos, en comparación con las parcelas control y el suelo del bosque que contienen un pH por debajo de 5.5, lo cual genera que el aluminio o acidez intercambiable se encuentre disponible en la solución del suelo. En este sentido, valores muy elevados en la saturación del aluminio (> 60%) según el IGAC, pueden resultar tóxicos para la vegetación e inhibir la absorción de Ca y Mg por las plantas (Garavito, 1979 y Espinosa, 2003). Este factor se podría presentar a lo largo del tiempo en todas las parcelas control, en especial en el noveno mes, debido a que contiene una saturación del 65%.

Navarro & Navarro (2002), mencionan que en suelos con bajos valores de pH y ricos en aluminio, hierro o complejo de humus-Al, los fosfatos solubles son fijados como compuestos insolubles, los cuales no quedan disponibles para la vegetación. Situación que se podría evidenciar tanto en las parcelas control como en los suelos del bosque, a comparación de los tratamientos con biosólidos que aportan proporcionalmente a la dosis aplicadas, grandes cantidades de fósforo (> 88.3 ppm) disponibles a lo largo del tiempo; dicho resultado coincide con el estudio de Bendfeldt *et al.* (2001). Así mismo, las proporciones de fósforo son mayores en el noveno mes, probablemente porque el fósforo contenido en el biosólido se libera gradualmente y por la disponibilidad de fosfatos de células muertas aportadas por la

vegetación y los micro y macroorganismos del suelo; tal y como lo establecen (Gómez *et al.* 1994; Wong *et al.* 1998).

Thompson (1974), propone que a mayores cantidades de calcio en el suelo la mineralización del fósforo será mayor, ya que el calcio incrementa el pH en un rango de 6.5 a 7.5, donde la solubilidad del fósforo se da en mayor proporción. Características que se presenta en los tratamientos con biosólidos en especial en el Tratamiento tres (T3), ya que contienen suficientes cantidades de calcio, que favorece el incremento del fósforo muy por encima de lo que el IGAC considera como alto (> 40 ppm).

Por otro lado, el biosólido incrementa la concentración de sales, en especial en aquellos tratamientos con dosis más altas (T3). Así mismo, la conductividad eléctrica tiende a aumentar en el tiempo, excepto en el sexto mes. Este incremento puede venir de varias procedencias, como la mineralización que sufre en algún momento la materia orgánica o de algunos aditivos o productos químicos que contiene el biosólido durante al tratamiento en las Plantas de Aguas Residuales (Navas & Machin, 1998; Wong *et al.* 1998; Arcak *et al.* 2000).

Igualmente, Garavito (1979) y Pacheco & Patiño (2003), mencionan que los altos niveles de salinidad, pueden ser mitigados mediante la implementación de riego o lavado. En este sentido, la disminución de la salinidad en todos los tratamientos con biosólidos en el sexto mes, se presenta posiblemente por la lixiviación de las sales causada por el lavado que generan las aguas lluvias. Para dicho mes, se registran una mayor precipitación (92.2 mm) que en las otras épocas de muestreo.

Entre mayores sean las proporciones de biosólidos aplicados al suelo, mayores serán los valores de la conductividad eléctrica. De esta manera, según la tabla de clasificación del IGAC, las parcelas control y el T1, contiene valores nulos, mientras que el T2 presenta valores escasos y el T3 posee valores moderados. Por esta razón, es posible que en el T1 y T2, no se limite el establecimiento vegetal, ya que inicialmente (tercer mes) en estos tratamientos se desarrolló una mejor cobertura vegetal como lo demuestran los resultados obtenidos en el trabajo de Ochoa (2005),

quien registró un porcentaje de cobertura de 0.15% en el T1 y 0.44% en el T2, mientras que en el T3, sólo obtuvo un porcentaje de 0.003, lo cual indica que este tratamiento puede limitar en algún momento el desarrollo de la vegetación.

La capacidad de intercambio catiónico aumenta proporcionalmente en cada muestreo con respecto a la dosis de aplicación del biosólido, tal y como lo evidencian otros estudios (Amezquita, 2002 y Pacheco & Patiño, 2003). De igual manera, disminuye la capacidad de intercambio en el tercer y noveno mes, posiblemente por efecto del agua de lluvia que lixivia las bases de intercambio, mientras que en el sexto mes aumenta debido a la mineralización tanto del biosólido como de la hojarasca que aporta la vegetación que se estableció en las parcelas. Paralelamente, se evidencia después de seis meses una mayor cantidad de cationes en las mezclas, lo cual favorece el almacenamiento de los nutrientes (Ca, Mg, K, Na) que las plantas necesitan a través del ciclo de desarrollo.

Los contenidos de arcillas son aportados por el estéril (8.0%), mientras que la materia orgánica es aportada principalmente por el biosólido (11.7). En este sentido, aunque las dosis de biosólidos fueron bajas en todos los tratamientos, se aprecia notablemente una mayor capacidad de intercambio catiónico, en comparación con las parcelas de control. La C.I.C, se ve influenciada en mayor proporción a la materia orgánica que a la fracción arcillosa, posiblemente por el tipo de arcillas que dominan el sustrato, quizás arcillas caolinitas que fijan pocas bases (Thompson, 1974; Garavito, 1979; Navarro & Navarro, 2002).

Por otro lado, la C.I.C y el pH se relacionan con el porcentaje de saturación de bases; propiedad que se ve favorecida a lo largo de los nueve meses en todos los tratamientos con biosólidos debido a su incremento en un 100%, todo lo contrario se evidencia en las parcelas control y en el suelo del bosque, debido a que el hidrógeno fijado del humus, arcillas, óxidos de aluminio y el hierro se disocian fácil y ampliamente, lo que genera un suelo ácido que no fija bases y que es propenso a lixiviar las bases intercambiables, lo cual puede acrecentarse más si el suelo es arenoso (Garavito, 1979; Porta & López, 1993; Navarro & Navarro, 2002).

Se evidencia una mayor cantidad de calcio, magnesio, potasio y sodio, en todos los tratamientos con biosólidos, que en las parcelas control. El calcio y el magnesio debido a su número de cargas, son más retenidos por las arcillas y la materia orgánica, sin embargo, las proporciones de calcio son tan altas en todos los tratamientos, que sobrepasan los valores del suelo del bosque. Dichos elementos disminuyen en todos los tratamientos en el tercer y noveno mes posiblemente por efecto de la lixiviación o por absorción de la vegetación. Así mismo, el potasio tiende a aumentar en sexto y noveno mes, por la mineralización de la materia orgánica y el sodio fluctúa aumentando y disminuyendo a lo largo del tiempo.

## **9.2 Comportamiento de las variables físicas en los diferentes tratamientos con biosólidos**

Entre mayor sean las proporciones de materia orgánica, la densidad aparente y densidad real tienden a disminuir como consecuencia del menor peso de los materiales; factor que se evidencia en todos los tratamientos con biosólidos a lo largo del tiempo. Dicha disminución se evidencia en mayor cantidad en la profundidad de 10 cm en adelante, debido a la concentración del biosólido en las partes inferiores (Panagolopoulos & Hatzistathis, 1995).

Por otro lado, se genera en el tercer mes una disminución de la densidad aparente en todos los tratamientos, posiblemente a la integración de la materia orgánica con la fracción mineral, mientras que en el noveno mes tal disminución se da por efectos del aumento de la materia orgánica que aporta principalmente la vegetación. Debido a que el concepto de la densidad aparente incluye el espacio poroso total, puede establecerse una relación entre dicha densidad y la porosidad. En este sentido, se presenta un aumento de la porosidad en todos los tratamientos, en el tercer y noveno mes, lo cual está asociado con la disminución de la densidad aparente en éstos mismos meses.

Neira & Paz (1996), mencionan que a medida que disminuye la densidad aparente, aumenta la porosidad, lo que pone en evidencia la presencia de dos conjuntos de poros, uno de tipo textural que se encuentra en horizontes no orgánicos en donde el contenido hídrico es prácticamente constante a lo largo de todo el año y donde la presencia de raíces es escasa; y otro de tipo estructural, que se presenta en mayor cantidad en el horizonte orgánico. Teniendo en cuenta lo anterior, es posible que las parcelas control presenten poros de tipo textural, mientras que los tratamientos con biosólidos podrían presentar los dos tipos de poros por tener una matriz tanto mineral como orgánica.

Paralelamente, Navas & Machin (1998), proponen que la aplicación de biosólidos, tiende a incrementar la porosidad total, situación que se refleja en su estudio, ya que la porosidad pasa de un 38% en las parcelas control a un 49% en dosis más altas. Dichos resultados coinciden con esta investigación, ya que inicialmente se presenta en las parcelas control una porosidad del 37% al 38% en todo el perfil del suelo, mientras que el T3 contiene una porosidad del 45% de 0-10 cm, 44% de 10-20 cm y 43% de 20-30cm de profundidad.

Según Navas & Machin (1998), entre mayor sean las proporciones de biosólido, en las profundidades de 0 - 10 y 10 - 20 cm, mayor serán los contenidos de humedad equivalente en el suelo debido a que la materia orgánica retiene más cantidades de agua. Esto se evidencia en todos los tratamientos con biosólidos a pesar de contener una textura areno-franca. Sin embargo, el T3 contiene un mayor porcentaje de humedad, la cual se incrementa notoriamente en el sexto y noveno mes, debido a que la vegetación asociada con la materia orgánica concentra más la humedad. Así mismo, se evidencia inicialmente una mayor cantidad de humedad de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, posiblemente porque a estas profundidades no existe tanta evaporación como si sucede de 0 a 10 cm. Similar tendencia se presenta en todos los tratamientos con biosólidos a la profundidad de 10 cm en adelante.

Según la clasificación de Montenegro en la Sociedad Colombiana del Suelo (2003), las parcelas control contienen una clasificación muy baja (<5 %), a comparación de los T1 y T2 que presentan valores bajos (5 -15 %), mientras que los T3 poseen una clasificación baja (5 -15 %) a media (15-25 %). En este sentido, a mayores proporciones de biosólidos se favorece la retención de la humedad equivalente, lo cual se asocia con lo propuesto por Epstein (1975) citado por Panagolopoulos & Hatzistathis (1995), el cual menciona que después de la adición de biosólidos, el agua disponible para las plantas incrementa de un 12.5% a un 18.5%.

## 10. CONCLUSIONES

Con respecto al mejoramiento de las propiedades físico-químicas debido a la aplicación de biosólidos se puede concluir que:

- El biosólido favoreció el incremento del pH, en valores ligeramente alcalinos (6.6 - 7.3) y neutros a lo largo del tiempo (6.1 - 6.5), en comparación con las parcelas control que contienen una clasificación de extremadamente ácido, (4.6 - 5.0) a muy fuertemente ácido (5.1 - 5.5).
- Aunque los valores de nitrógeno, magnesio, sodio y potasio son bajos no existe en el tiempo una gran variación de éstos nutrientes en los tratamientos con biosólidos.
- Según las proporciones aplicadas, el biosólido aporta grandes cantidades de fósforo y de calcio, que se evidencian más en el tratamiento tres (T3). Por lo tanto, el aumento de éstos nutrientes y del pH puede ser las contribuciones más significativas del biosólido como enmienda orgánica en la recuperación de suelos disturbados por actividad minera.
- No se presenta aluminio disponible en los tratamientos con biosólidos, debido a estos contienen carbonato de calcio, que contribuye a aumentar el

pH, lo cual inhibe la solubilidad del aluminio que podría generar efectos tóxicos a la vegetación.

- Entre mas biosólido sea aplicado al suelo, mayor será el porcentaje de porosidad, de humedad, y así mismo, disminuirá la densidad aparente; lo cual contribuirá a mejorar el movimiento del agua, el aire y de los nutrientes del suelo, los cuales influyen en el desarrollo radical y la producción de las plantas.
- El biosólido podría desfavorecer en algún momento la vegetación, ya que incrementa la conductividad eléctrica, debido a la alta cantidad de sales solubles que contiene.
- El tratamiento tres (T3) posee una mayor cantidad de nutrientes y las mejores condiciones físicas, en comparación con los otros tratamientos y el control.

## **11. RECOMENDACIONES**

- Aunque la disposición de biosólidos de la Planta El Salitre favoreció la recuperación de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado, se recomienda efectuar muestreos más prolongados, con el propósito de evaluar hasta que punto las propiedades edáficas se asemejan a las condiciones de los suelos menos disturbados.
- Se recomienda aplicar dosis más altas de biosólidos, con el fin de evaluar la concentración máxima, que favorece las propiedades físico-químicas del sustrato edáfico en recuperación, sin que llegue a generar daño a la vegetación ni a la fauna.

- Realizar un muestreo de las propiedades físicas de los suelos de los bosques menos disturbados, para tener un punto de referencia a comparar en los futuros trabajos de restauración.
- Trabajar en las parcelas experimentales con un espesor mayor a 30 cm de profundidad, debido a que el sustrato tiende a asentarse con el tiempo.
- Recomiendo al DAMA, para recuperar suelos Areno-francos, el tratamiento tres, debido a que contiene una mayor cantidad de nutrientes, mejora las condiciones físicas, y se acerca en mayor proporción a los suelos del bosque no disturbado.

## **12. BIBLIOGRAFÍA**

1. Alcañiz, J.M. Comellas, L. Pujolá, M. 1996. Manual de restauración d' activitats extractives amb fangs de depuradora. Recuperación de terrenys marginals. Junta de Sanjament, Generalitat de Catalunya. 68 p.
2. Alcañiz, J.M. Ortiz, O. Comellas, L. Pujolá, M. & Serra, E. 1998. Utilización de lodos de depuración en la rehabilitación de suelos de canteras, Ingeopres, Barcelona-España 59: 28-34.
3. Alcañiz, J.M. 2001. Utilización de lodos de depuradoras urbanas en la restauración de canteras. Universidad Autónoma de Barcelona. 10 p.
4. Alvarez, J.A. 1979. Interpretación de análisis de suelos. Fundamentos para la recomendación de fertilizantes. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bogotá. pp. 1-15.
5. Amezcuita, C. 2002. Evaluación del uso del biosólido de la Planta El Salitre como sustrato en procesos de recuperación de suelos y revegetalización en

la Cantera La Fiscala. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle. Bogotá.

6. Amortegui, J.V. 2003. Uso sostenible de terrenos inestables urbanos heredados de explotaciones de materiales. En : Curso Internacional de Restauración de canteras y el uso de biosólidos. Bogotá. 10 p.
7. Arcak, S. Karaca, A. Haktanir, K. 2000. Investigations on sewage sludge: chemical composition and effects on some chemical properties of soil. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ankara University. 6p.
8. Ayala, J. Vadillo, L. Aramburu, M.P. Escribano, M. Escribano R. De frutos M.P. Manglano, S. Mataix, C. & Toledo, J. 1989. Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. Instituto Geominero de España (I.G.M.E). 3<sup>rd</sup> edición. Madrid – España. 332p.
9. Barrera, J.I & Ríos, H. F. 2002. Acercamiento a la ecología de la restauración. En: Pérez Arbalaezia, Jardín Botánico de Bogotá “ José Celestino Mutis”, Bogotá, Colombia D.C. 13:33-46.
10. Bazzas, F.A. 1983. Characteristics of Populations in Relation to Disturbance in natural and Man-Modified Ecosystems. Cap 5:259-273. In : Mooney, H.A. & M. Godron. Disturbance and Ecosystems: Components of response. Berlin. 291pp.
11. Bendfeldt, E.S. Burger, J.A. & Daniels, W.L. 2001. Quality of Amended Mine Soils After Sixteen Years. Soil Science Society of America Journal 65:1736-1744.
12. Bogotana de Aguas, (BAS) 2002. Situación actual y futura del aprovechamiento de los biosólidos de la Planta el Salitre en el relleno sanitario de Doña Juana. Reporte Técnico. Características de los Biosólidos. Documento interno. Bogotá. pp 1-5.

13. Bogotana de Aguas, (BAS) 2003. Gestión de biosólidos de la Planta el Salitre. Fase I. Bogotá.
14. Bradshaw, A.D. 1997. Restoration of mined lands using natural processes. *Ecological Engineering* 8: 255-269.
15. Brown, S. & Lugo, A. 1994. Rehabilitation of Tropical Lands: A Key to Sustaining Development. *Restoration Ecology*. 2 (2): 97-111
16. Burbano, H. 1989. El suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos. Colombia. 447p.
17. Canham, C.D. & Marks, P.L. 1985. The Response of Woody Lands to Disturbance; Patterns of Stablishment. Cap 11:197-216. In: Pickett, S.T.A., & White, P.S The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Academic Press Inc. 472 p.
18. Cárdenas, J & Duitama, L.M. 2001. Estado Actual de la Explotación de Canteras en Colombia. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). En: Canteras – Escuelas en Iberoamérica. Roberto Villas, Río de Janeiro – Brasil. pp 48-63.
19. Cavazos, T. 1992. Manual de prácticas de física de suelos, México. 99 p.
20. Cortés, L.A. 1976. Aptitud de uso de los suelos de la Sabana de Bogotá y sus alrededores. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. 26 p.
21. Correa, A. 2000a. La explotación racional de canteras y su incidencia en el medio ambiente. II CER. Restauración de ecosistemas alterados por la extracción minera. Bogotá. 13 p.

22. Correa, A. 2000b. Situación actual de la explotación de canteras en el Distrito Capital. *Revista Ingeniería e Investigación*. 46: 45-55.
23. Correa, A. & Correa, J. 2003. Estudio de alternativas para la recuperación morfológica y ambiental de la antigua Cantera Soratama. En: *Curso Internacional de Restauración de Canteras y el Uso de Biosólidos*, 28 de julio – 2 agosto. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 34 pp.
24. Chapin, F.S III. 1983. Patterns of Nutrient Absorption and Use by Plants from Natural and Man- Modified Environments. Cap 4:175-185. In: Mooney H.A. & M. Godron. *Disturbance and Ecosystems*. 291 p.
25. Dáguer, G.P. 2003. Gestión de los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre. En: *Curso Internacional de Restauración de Canteras y el Uso de Biosólidos*, 28 de julio – 2 agosto. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 6 p.
26. Delgado, A & Mejía, M.V. 2002a. Diagnóstico de la actividad extractiva en la localidad de Usaquén Bogotá. Documento Interno del Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 27 p.
27. Delgado, A & Mejía, M.V. 2002b. Apoyo a las actividades de evaluación y seguimiento de la industria extractiva en el Distrito Capital, Bogotá. Documento Interno del Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 51 p.
28. Dewis, J. & Freitas, F. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. *Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. 10:31-35.
29. Environmental Protection Agency. 1995. Part. 503. Rule Biosolids and use disposition of sewage sludge. Cincinnati, Ohio. EUA.

30. Environmental Protection Agency. 1999. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA/625/R-92/013. Cincinnati, Ohio. EUA.
31. Espinosa, J. 2003. Encalado en Suelos Tropicales, En: Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá. 155-165 p.
32. Fundación Restauración Ecológica Tropical (FRET). 2001. Utilización de biosólidos de depuración en la rehabilitación de suelos de canteras del Distrito Capital de Bogotá. Documento Interno. 44 p.
33. Garavito, F. 1979. Propiedades químicas de los suelos. 2ª edición. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Bogotá. 321p.
34. García, C. 2001. Nuevos usos para el reciclado en el suelo de residuos urbanos: Biocontrol en agricultura sostenible: Recuperación de suelos degradados. I Encuentro Internacional de Gestión de Residuos orgánicos en el Ambito Rural Mediterráneo. Departamento de Conservación de Suelos y Agua y Manejo de Residuos Orgánicos. Murcia-España. 7 p.
35. García, A. 2003. Tipos de Suelos Salinos, En: Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. 85-95 p.
36. Gómez, R. Moral, J. Navarro, J. García, T. & Mataix, J. 1994. Efecto fertilizante NPK de un lodo de depuradora. I Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica. División de Agronomía, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante. On line: [www.Agroecología.net/congresos/toledo/35.pdf](http://www.Agroecología.net/congresos/toledo/35.pdf). 6 p.
37. Graetz, H. A. 1992. Suelos y fertilización. Manual para la educación agropecuaria. México, D.F. Pp: 24-39.

38. Grime, J.P. 1979. Estrategias de adaptación de las plantas y procesos que controlan la vegetación. México. 29 p.
39. Hernández, E. 1996. IX Congreso nacional de minería “Desafíos de la minería colombiana para el siglo XXI”; Programas de restauración y usos futuros de terrenos afectados por actividades mineras. Bogotá. 20 p.
40. Kim, H. 1996. Soil Sampling, Preparation, and Analysis, University of Georgia. USA. 30 p.
41. Kaúrichev, I. Panov, N. Stratonóvich, M. Grechin, I. Sávich, V. Ganzhara, N. & Mershin, A. 1980. Prácticas de Edafología. Rusia. 280 p.
42. León, A. & Trejos, J.D. 2005. Comportamiento de los fagos somáticos como indicadores virales de contaminación fecal, en diferentes mezclas de biosólidos y áridos utilizados para la restauración ecológica de la Cantera Soratama. Tesis de Grado. Facultad de Microbiología. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
43. Little, T.M. & Jackson, F. 1989. Métodos Estadísticos para la Investigación en la Agricultura. 2ª ed. México. 270 p.
44. MacMahon, J. 1997. Ecological Restoration, In: Meffe, G.k. & C.R. Carroll (Eds). Principles of Conservation Biology, Sunderland, Massachusetts. 2ª ed. pp. 480-509
45. Ministerio de Minas y Energía (MINMINAS) & Unidad de Planeación Minero Energética, (UPME). 2002. Plan Nacional de Desarrollo Minero. Bogotá. 58 p.
46. Montenegro, H. 2003. Propiedades físicas de los suelos en relación con la fertilidad. En: Manejo Integral de la Fertilidad del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Pp. 1- 20.

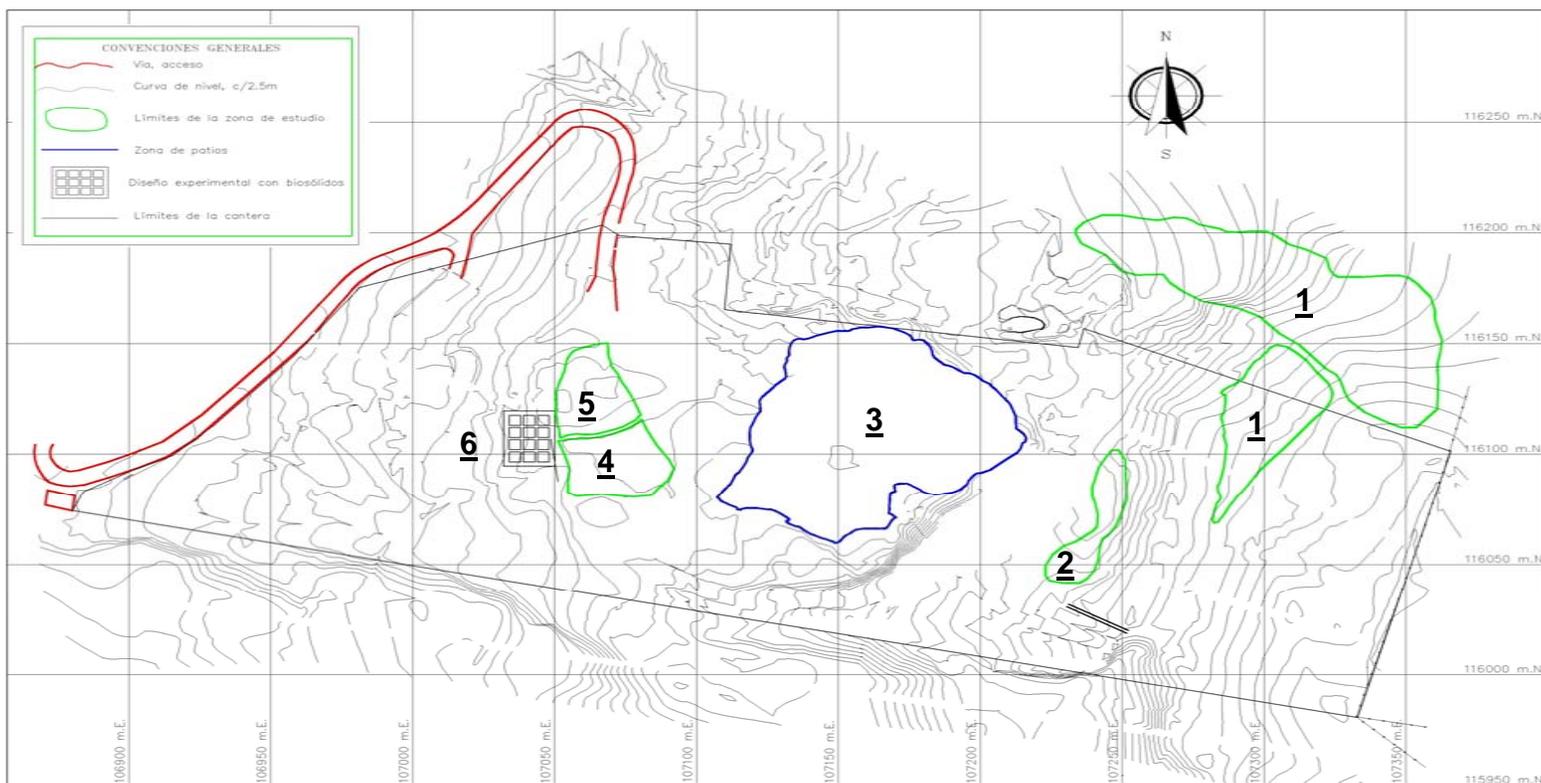
47. Mooney, H.A. & Godron, M. 1983. Disturbance and Ecosystems: Component of response. Berlin. 291 p.
48. Muñoz, F. Polo, M.J. & Giráldez, J.V. 1999. Modificación de algunas propiedades físicas en un suelo del Valle del Guadalquivir enmendado con lodos de depuradora. En: Muñoz, R. A. Ritter & Tascón. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Eds. C. pp 115-121.
49. Navas, A. Bermudez, F & Machin, J. 1998. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. Departamento de Edafología. Estación Experimental de Aula Dei. Zaragoza. España, Geoderma. 87: 123-135.
50. Navarro, G. & Navarro, S. 2002. Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. España. 488p.
51. Neira, X. & Paz, A. 1996. La porosidad y su acción sobre la reserva hídrica del suelo. II Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica. Pamplona-Iruña. España. 6 p.
52. Ochoa, A. 2005. Efecto de la aplicación de biosólidos sobre el desarrollo de la vegetación en las primeras etapas sucesionales, en la cantera Soratama, Localidad de Usaquén, Bogotá D.C. Tesis de Grado. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
53. Olarte, L. Muñoz, B. Benavides, G. Garavito, F. Luna, C. Mejía, L. & De Roza, E. G. 1980, Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). 4<sup>ta</sup> edición. Bogotá. 664 p.
54. Ortiz, J. 1992. Derecho de minas. Editorial Temis. Bogotá. pp. 443

55. Pacheco, L.F. & Patiño, M. 2003. Evaluación de la Aplicación de Biosólidos Producidos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales el Salitre en la Revegetación del Relleno Sanitario Doña Juana. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
56. Panagopoulos, T. & Hatzistathis, A. 1995. The role of forest topsoil and sewage sludge in reclamation of strip-mined land in Ptolemaida, Greece.
57. Pascual, M.C. Sánchez, M. & Polo, A. 2001. Efecto de los lodos de depuradora sobre la fertilidad del suelo y su relación con la producción agrícola en zonas de clima mediterráneo semiárido. Madrid. España.9 p.
58. Peñalosa, H. 1974. Educación y población en Colombia. pp. 1-4.
59. Pérez, A. 1980. Folleto de ¿cómo manejar mi cantera?. Corporación autónoma regional, CAR, Bogotá. 20 p.
60. Pérez, M. 2002. Evaluación del Proyecto Potencial de Biosólidos Procedentes del Tratamiento de Aguas Residuales, en el Desarrollo, Crecimiento y Producción del Cultivo de Rábano Rojo (*Raphanus sativus*). Tesis de Grado. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Universidad Javeriana. Bogotá.
61. Porta, J. & López, M. 1993. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid-España. 849 p.
62. Pickett, S.T.A. & White, P.S. 1985. Natural Disturbance and Patch Dynamics and Introduction. Cap 1:3-13. In: The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Academic Press Inc. 472 p.
63. Ramírez, M. 2003. Biofertilizantes y Nutrición de Plantas, En: Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá. pp 153-164.

64. Ruiz, A.M. 2001. Regulación de los destinos de los lodos de Edar. I Encuentro Internacional de Gestión de Residuos Orgánicos en el Ámbito Rural Mediterráneo. Pamplona – España. 6 p.
65. Runkle. J.M. 1985. Disturbance Regimen in Temperate Forest, Cap.2:17-33. In: Pickett, S.T.A., & White, P.S. The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Academic Press Inc. 472 p.
66. Salamanca, B. & Camargo, G. 2002. Protocolo Distrital de Restauración Ecológica: Guía para la restauración de los ecosistemas nativos en las áreas rurales de Santafé de Bogotá. Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 288 p.
67. Sánchez, J. Moreno, O & Gamba. J. 2003. Caracterización de la vegetación y de los suelos en la Cantera Soratama – Usaquén. Documento Interno. (DAMA). Bogotá. 202 p.
68. Salinas, J. & García R. 1985. Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 83 p.
69. Simpson, K. 1999. Abonos y Estiércoles. España. 273 p.
70. Soil Survey Staff, 1962. Soil Survey Manual. U.S. Department of Agriculture Handbook No. 18. USDA. Washington. USA. 503p. On line: [www.statlab.iastate.edu/soils/ssm](http://www.statlab.iastate.edu/soils/ssm).
71. Sort, X. & Alcañiz, J.M. 1996. Contribution of Sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries, Land degradation & Development. 7: 69-76.

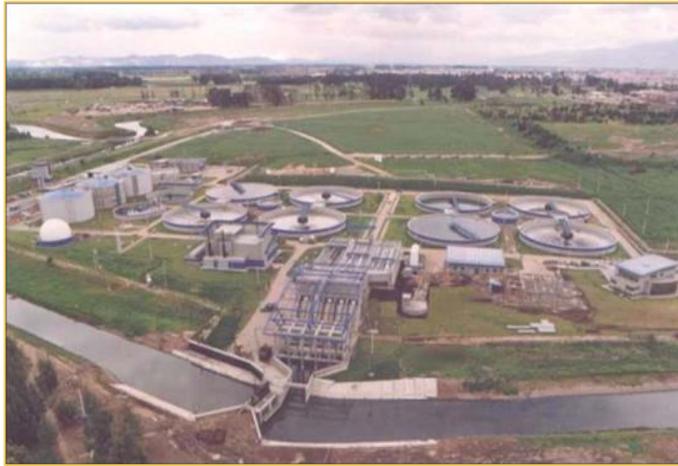
72. Sort, X. & Alcañiz, J.M. 1999a. Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation, *Land degradation & Development*, 10:3-12.
73. Sort, X. & Alcañiz, J.M. 1999b. Modificación of soil porosity after application of sewage sludge. *Soil & Tillage research* 49: 337-345.
74. Sousa, W.P. 1984. The role of disturbance in natural communities. *Ann. Rev. Ecol. System.* 15: 353-391.
75. Thompson, L. 1974. *El suelo y su fertilidad*, 3ra ed. Nueva York, 407 p.
76. Uribe, M.P. 1996. Canteras y minería de aluvión "Al otro lado del espejo". *Revista Economía Colombiana y Coyuntura Política*. Bogotá. 77 p.
77. Vadillo, L. 1991. Problemas específicos de industrias sometidas a E.I.A.; minería a cielo abierto. *Evaluación y corrección de impactos ambientales*. Madrid-España pp.197- 212.
78. Vargas, E. 1998. *Revista Gestión y Ambiente, Minería y Medio ambiente*. 1: 17-26
79. Villa, M. 1996. *Estrategias de Ordenamiento para Zonas Rurales de Localidades, Usaquén, Chapinero, Santafé y San Cristóbal. Secciones y Proyectos*. Departamento Administrativo de Planeación Distrital. Bogotá D.C. pp. 25-160.
80. Whittaker, R.H. 1975. *Communities and Ecosystems*, MacMillan Publicing, Estados Unidos. 385 p.
81. Wong, J. Lai, K. Fang, M. & Ma, K. 1998. Effect of sewage sludge amendment on soil microbial activity and nutrient mineralization. *Environment International*, Hong Kong Baptist University. 24: 935-943.

## **ANEXOS**



**Anexo 1.** Mapa de ubicación de la cantera Soratama: 1: Bosques adyacentes a la cantera, 2: Relicto de bosque altoandino, 3: Zona de patios, 4: Zona Depósito de descapote, 5: Depósito de estériles, 6: Parcelas experimentales.

**Anexo 2**  
**Secuencia fotográfica**



Anexo 2a. Panorámica Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre.



Anexo 2b. Subproducto del tratamiento de aguas residuales (Biosólidos)



(c)



(d)



(e)

Anexo 2. Control: c) muestreo 2, d) muestreo 3 y e) muestreo 4.



(f)



(g)



(h)

Anexo 2. Tratamiento 1: f) muestreo 2, g) muestreo 3 y h) muestreo 4.



(i)



(j)



(K)

Anexo 2. Tratamiento 2: i) muestreo 2, j) muestreo 3 y k) muestreo 4.



(l)



(m)



(n)

Anexo 2. Tratamiento 3: l) muestreo 2, m) muestreo 3 y n) muestreo 4.

### Anexo 3

#### Técnicas de laboratorio (variables físicas)

➤ Densidad aparente y humedad (Dewis & Freitas, 1970; Olarte *et al*, 1980; Cavazos, 1992).

1. Pesar la muestra total de suelo húmedo (balanza analítica)
2. Secar la muestra de suelo a 105°C, durante 24 horas
3. Pesar la muestra del suelo seco
4. Obtener el volumen de la muestra de suelo (probeta graduada)

La densidad aparente y humedad se efectuó por la aplicación de las siguientes fórmulas:

$D_a = \text{masa del suelo seco} / \text{volumen de la muestra}$

$\% \text{ Humedad} = (P - P_1) / P_1 * 100$ , en donde:

P = Peso del suelo fresco en gramos

P<sub>1</sub> = Peso de suelo seco a 105°C en gramos

➤ Densidad real (Dewis & Freitas, 1970; Olarte *et al*, 1980; Cavazos, 1992).

1. Se introduce en un matraz de 250 ml agua destilada, que se hierve alrededor de media hora con el fin de expulsar de ella el aire disuelto y se enfría a temperatura ambiente.

2. En un matraz aforado de 100 ml se deposita (hasta la marca fijada) agua destilada hervida y enfriada, y se pesa en una balanza.

3. En un vaso de cristal, se pesan 9 g de suelo secado al aire y tamizada a través de una malla de 2mm.

4. Se vierte del matraz la mitad del agua, y en el mismo se introduce el suelo pesado.

5. Se hierve durante 5 minutos el suelo con el agua para expulsar el aire.

6. A continuación, el matraz con su contenido se enfría a temperatura ambiente, se completa (hasta la marca fijada) con agua destilada y se pesa.

La densidad de la fase sólida, medida en  $\text{g/cm}^3$  se calcula por medio de la fórmula:

Volumen del peso = (Peso del suelo - Peso del matraz + agua + suelo) - (Peso del matraz + agua).

$D_a = \text{Peso suelo} / \text{volumen de agua desplazada}$

➤ Porosidad

Después de medir las variables de la densidad aparente y real, se obtiene los valores de la porosidad en los diferentes tratamientos a través de la siguiente fórmula:

$\% \text{ Volumen de poros} = D_a - D_r / D_r * 100$

$D_a = \text{Densidad aparente}$

$D_r = \text{Densidad real}$

## Anexo 4

### Promedios de las variables fisico-químicas, en los diferentes tratamientos, durante los cuatro muestreos y su respectivo análisis de Duncan.

Promedio del carbono orgánico % (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (B)	0,13	b (B)	0,15	c (BA)	0,25	c (A)	0,27
Trat 2	b (A)	0,39	a (A)	0,42	b (A)	0,48	b (A)	0,50
Trat 3	a (B)	0,71	a (C)	0,55	a (BA)	0,82	a (A)	0,93
Control	d (A)	0,03	b (A)	0,02	d (A)	0,03	d (A)	0,03

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del carbono orgánico % (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	0,23	cb (A)	0,21	c (A)	0,22	c (A)	0,26
Trat 2	b (A)	0,47	b (A)	0,39	b (A)	0,49	b (A)	0,51
Trat 3	a (A)	1,01	a (B)	0,63	a (A)	0,87	a (A)	0,96
Control	d (A)	0,03	c (A)	0,03	d (A)	0,02	d (A)	0,03

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del nitrógeno total % (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (B)	0,02	c (BA)	0,03	c (BA)	0,03	c (A)	0,04
Trat 2	b (A)	0,06	b (A)	0,07	b (A)	0,07	b (A)	0,08
Trat 3	a (BC)	0,11	a (C)	0,10	a (AB)	0,127	a (A)	0,13
Control	d (A)	0,003	d (A)	0,008	d (A)	0,008	d (A)	0,008

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del nitrógeno total % (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo	$p < 0.001$	1	$p < 0.001$	2	$p < 0.001$	3	$p < 0.001$	4
Trat 1	c (B)	0,02	c (BA)	0,037	c (BA)	0,037	c (A)	0,04
Trat 2	b (A)	0,07	b (A)	0,07	b (A)	0,08	b (A)	0,08
Trat 3	a (A)	0,14	a (B)	0,12	a (A)	0,147	a (A)	0,147
Control	d (A)	0,003	d (A)	0,005	d (A)	0,008	d (A)	0,005

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la relación C/N (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	5,72	a (A)	5,83	a (A)	7,39	a (A)	7,42
Trat 2	b (A)	6,58	a (A)	5,87	a (A)	6,83	a (A)	6,25
Trat 3	b (BA)	6,27	a (B)	5,47	a (BA)	6,46	a (A)	7,15
Control	a (A)	12,78	a (B)	3,89	a (B)	4,17	a (B)	5,33

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la relación C/N (Profundidad 15-30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	a (A)	9,78	a (B)	5,78	a (B)	6,06	a (B)	6,48
Trat 2	b (A)	7,15	a (B)	5,50	a (B)	5,88	a (BA)	6,33
Trat 3	b (A)	7,05	a (B)	5,04	a (AB)	5,90	a (A)	6,52
Control	ba (A)	8,89	a (A)	6,83	a (A)	3,89	a (A)	8,78

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del pH (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	a (A)	7,6	a (C)	7,0	a (B)	7,3	a (B)	7,3
Trat 2	b (A)	7,4	a (C)	7,1	a (B)	7,2	b (C)	7,0
Trat 3	b (A)	7,4	a (B)	7,1	a (B)	7,1	c (C)	6,9
Control	c (B)	5,0	b (B)	5,1	b (A)	5,3	d (B)	5,0

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del pH (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	a (A)	7,5	a (C)	7,1	a (B)	7,3	a (B)	7,3
Trat 2	a (A)	7,5	a (B)	7,1	b (B)	7,1	b (C)	6,97
Trat 3	a (A)	7,5	a (B)	7,2	b (B)	7,1	b (C)	6,9
Control	b (B)	5,0	b (B)	4,9	c (A)	5,2	c (B)	5,0

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del fósforo ppm (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (B)	92,2	b (B)	88,3	b (A)	158,7	c (A)	169,0
Trat 2	b (B)	221,0	a (BA)	276,7	a (A)	307,3	b (A)	323,0
Trat 3	a (BA)	346,7	a (B)	281,3	a (BA)	388,3	a (A)	427,7
Control	d (A)	5,3	c (A)	7,5	c (A)	5,7	d (A)	7,1

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del fósforo ppm (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	118,33	c (A)	155,67	b (A)	189,00	c (A)	201,00
Trat 2	b (BA)	305,00	b (B)	259,00	a (A)	400,00	b (BA)	333,67
Trat 3	a (A)	485,67	a (A)	386,33	a (A)	421,67	a (A)	454,33
Control	d (A)	5,93	d (A)	7,20	c (A)	7,03	d (A)	6,50

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la C.I.C meq/100 gr (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	1,57	a (B)	0,64	c (A)	1,43	c (A)	1,33
Trat 2	b (A)	2,60	a (B)	1,70	b (A)	2,33	b (BA)	2,20
Trat 3	a (A)	4,10	b (B)	2,07	a (A)	4,47	a (A)	3,80
Control	c (A)	1,34	c (B)	0,13	c (AB)	0,73	d (B)	0,43

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la C.I.C meq/100 gr (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	1,87	c (C)	0,90	c (CB)	1,30	c (B)	1,37
Trat 2	a (A)	3,13	b (B)	1,80	b (A)	3,00	b (B)	2,10
Trat 3	a (A)	3,77	a (B)	2,50	a (A)	4,27	a (A)	4,07
Control	b (A)	1,36	d (C)	0,21	c (B)	0,78	d (CB)	0,49

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del calcio meq/100 gr (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	2,60	b (A)	2,40	c (A)	3,37	c (A)	3,47
Trat 2	b (A)	7,83	a (A)	7,30	b (A)	7,23	d (A)	5,90
Trat 3	a (A)	15,37	a (B)	8,63	a (B)	9,27	a (B)	10,23
Control	d (A)	0,17	c (A)	0,13	d (A)	0,16	d (A)	0,09

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del calcio meq/100 gr (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	3,70	c (A)	3,60	c (A)	3,37	c (A)	3,37
Trat 2	b (A)	9,33	b (A)	7,17	b (A)	8,70	d (A)	6,00
Trat 3	a (A)	16,50	a (B)	10,03	a (B)	11,43	a (B)	11,97
Control	d (A)	0,16	d (A)	0,13	d (A)	0,16	d (A)	0,09

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del magnesio meq/100 gr (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (B)	0,05	c (B)	0,05	c (A)	0,07	cb (C)	0,02
Trat 2	b (A)	0,12	b (A)	0,11	b (B)	0,09	b (C)	0,04
Trat 3	a (A)	0,24	a (B)	0,18	a (C)	0,12	a (C)	0,09
Control	d (B)	0,017	d (B)	0,017	d (A)	0,03	c (B)	0,01

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del magnesio meq/100 gr (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	0,08	a (A)	0,07	b (A)	0,07	c (B)	0,02
Trat 2	b (A)	0,16	a (A)	0,13	a (A)	0,15	b (B)	0,06
Trat 3	a (A)	0,31	a (B)	0,25	a (C)	0,18	a (D)	0,12
Control	d (A)	0,01	a (A)	0,03	b (A)	0,04	c (A)	0,01

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del potasio meq/100 gr (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (C)	0,01	c (B)	0,03	c (A)	0,067	c (B)	0,03
Trat 2	b (B)	0,03	b (B)	0,047	b (A)	0,077	b (B)	0,04
Trat 3	a (D)	0,05	a (C)	0,06	a (A)	0,10	a (B)	0,07
Control	c (B)	0,02	c (B)	0,02	d (A)	0,05	d (C)	0,01

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del potasio meq/100 gr (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	cb (B)	0,027	c (B)	0,03	cb (A)	0,06	bc (B)	0,027
Trat 2	b (B)	0,03	b (B)	0,04	b (A)	0,077	b (B)	0,037
Trat 3	a (B)	0,06	a (B)	0,06	a (A)	0,10	a (B)	0,06
Control	c (B)	0,02	d (B)	0,02	c (A)	0,057	c (B)	0,017

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del sodio meq/100 gr (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	ba (A)	0,03	b (A)	0,02	a (A)	0,03	a (A)	0,02
Trat 2	ba (AB)	0,04	a (A)	0,07	a (B)	0,02	a (AB)	0,04
Trat 3	a (A)	0,06	ba (A)	0,05	a (A)	0,02	a (A)	0,04
Control	b (B)	0,01	b (A)	0,03	a (A)	0,03	a (A)	0,03

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio del sodio meq/100 gr (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	a (A)	0,12	a (B)	0,02	a (B)	0,03	a (B)	0,05
Trat 2	ba (A)	0,08	a (A)	0,03	a (A)	0,03	a (A)	0,03
Trat 3	ba (A)	0,11	a (BA)	0,07	a (B)	0,04	a (B)	0,02
Control	b (A)	0,02	a (A)	0,06	a (A)	0,03	a (A)	0,04

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de las bases totales meq/100 gr (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	2,70	b (A)	2,50	c (A)	3,57	c (A)	3,50
Trat 2	b (A)	8,03	a (A)	7,53	b (A)	7,43	b (A)	6,00
Trat 3	a (A)	15,73	a (B)	8,93	a (B)	9,53	a (B)	10,43
Control	d (A)	0,21	c (A)	0,20	d (A)	0,28	d (A)	0,17

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de las bases totales meq/100 gr (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (A)	3,93	c (A)	3,70	c (A)	3,53	c (A)	3,43
Trat 2	b (A)	9,60	b (A)	7,33	b (A)	8,93	b (A)	6,13
Trat 3	a (A)	16,93	a (B)	10,40	a (B)	11,73	a (B)	12,17
Control	d (A)	0,22	d (A)	0,51	d (A)	0,30	d (A)	0,17

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la saturación de bases % (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	a (A)	100,00						
Trat 2	a (A)	100,00						
Trat 3	a (A)	100,00						
Control	b (B)	19,87	a (A)	100,00	b (B)	43,23	b (B)	34,23

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la saturación de bases % (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	a (A)	100,00						
Trat 2	a (A)	100,00						
Trat 3	a (A)	100,00						
Control	b (B)	16,17	a (A)	94,43	b (B)	42,83	b (B)	31,97

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la conductividad eléctrica dS/m (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	c (B)	0,78	c (A)	1,57	c (B)	1,01	c (B)	1,07
Trat 2	b (C)	1,40	b (A)	3,30	b (CB)	2,13	b (B)	2,47
Trat 3	a (C)	2,20	a (A)	4,03	a (B)	2,97	a (A)	4,27
Control	d (A)	0,15	d (B)	0,09	d (A)	0,15	d (BA)	0,12

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la conductividad eléctrica dS/m (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	1,43	c (A)	2,03	b (A)	1,40	c (A)	1,47
Trat 2	b (A)	1,33	b (A)	3,63	a (A)	3,40	b (A)	3,53
Trat 3	a (C)	2,00	a (A)	5,00	a (B)	3,83	a (AB)	4,67
Control	c (A)	0,12	d (A)	0,11	c (A)	0,16	d (A)	0,12

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la acidez intercambiable meq/100 gr (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00
Trat 2	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00
Trat 3	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00
Control	a (B)	0,297	a (B)	0,27	a (B)	0,39	a (B)	0,28

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la acidez intercambiable meq/100 gr (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00
Trat 2	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00
Trat 3	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00	b (A)	0,00
Control	a (BA)	0,30	a (BA)	0,337	a (A)	0,35	a (B)	0,29

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la saturación de la acidez intercambiable % (Profundidad 0 -15)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	0,00						
Trat 2	b (A)	0,00						
Trat 3	b (A)	0,00						
Control	a (A)	58,33	a (A)	57,97	a (A)	59,93	a (A)	65,77

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la saturación de la acidez intercambiable % (Profundidad 15 -30)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	0,00						
Trat 2	b (A)	0,00						
Trat 3	b (A)	0,00						
Control	a (A)	59,37	a (A)	46,73	a (A)	56,27	a (A)	64,60

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio: Profundidad 15-30 (%Saturación de bases)								
Tratamiento/ Muestreo		1		2		3		4
Trat 1	a (A)	100,00						
Trat 2	a (A)	100,00						
Trat 3	a (A)	100,00						
Control	b (B)	16,17	a (A)	94,43	b (B)	42,83	b (B)	31,97

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la densidad aparente g/cm <sup>3</sup> (Profundidad 0 -10)								
Tratamiento/Muestreos		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	1,570	a (B)	1,411	b (B)	1,355	b (B)	1,364
Trat 2	c (A)	1,472	b (C)	1,257	b (B)	1,365	c (C)	1,280
Trat 3	d (A)	1,383	c (C)	1,150	c (B)	1,286	d (C)	1,191
Control	a (A)	1,610	a (C)	1,374	a (B)	1,462	a (B)	1,440

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la densidad aparente g/cm <sup>3</sup> (Profundidad de 10 -20)		
Tratamiento/Muestreos		1
Trat 1	b	1,540
Trat 2	b	1,513
Trat 3	c	1,380
Control	a	1,598

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la densidad aparente g/cm <sup>3</sup> (Profundidad de 20 -30)		
Tratamiento/Muestreos		1
Trat 1	b	1,540
Trat 2	b	1,522
Trat 3	c	1,421
Control	a	1,589

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la densidad aparente g/cm <sup>3</sup> (Profundidad 10 en adelante)						
Tratamiento/Muestreos		2		3		4
Trat 1	b (A)	1,296	b (A)	1,367	b (A)	1,348
Trat 2	c (C)	1,185	b (A)	1,336	c (B)	1,272
Trat 3	c (C)	1,128	b (A)	1,336	d (B)	1,220
Control	a (B)	1,348	a (A)	1,447	a (A)	1,403

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la densidad real g/cm <sup>3</sup> (Profundidad 0 -10)								
Tratamiento/Muestras		1		2		3		4
Trat 1	a(A)	2,650	a (B)	2,613	a (C)	2,571	a (CB)	2,597
Trat 2	b (A)	2,570	b (A)	2,563	a (A)	2,571	a (A)	2,580
Trat 3	b (BA)	2,523	b (A)	2,548	b (B)	2,500	b (BA)	2,532
Control	c (A)	2,570	a (A)	2,605	a (A)	2,581	a (A)	2,597

a-b-c-d = Diferencias significativas según Duncan ( $p < 0.001$ ) por muestreos

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la densidad real g/cm <sup>3</sup> (Profundidad de 10 -20)		
Tratamiento/Muestras		1
Trat 1	a	2,650
Trat 2	c	2,570
Trat 3	d	2,500
Control	b	2,597

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la densidad real g/cm <sup>3</sup> (Profundidad de 20 -30)		
Tratamiento/Muestras		1
Trat 1	a	2,650
Trat 2	b	2,570
Trat 3	c	2,500
Control	b	2,570

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la densidad real g/cm <sup>3</sup> (Profundidad 10 en adelante)						
Tratamiento/Muestras		2		3		4
Trat 1	b (A)	2,588	a (A)	2,580	a (A)	2,605
Trat 2	cb (A)	2,571	a (A)	2,571	a (A)	2,580
Trat 3	c (A)	2,556	b (B)	2,501	b (BA)	2,540
Control	a (A)	2,622	a (A)	2,589	a (A)	2,588

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la porosidad % (Profundidad 0 -10)								
Tratamiento/Muestras		1		2		3		4
Trat 1	c (B)	40,755	c (A)	46,024	a (A)	47,309	c (A)	47,442
Trat 2	b (C)	42,715	b (A)	50,972	a (B)	46,926	b (A)	50,420
Trat 3	a (D)	45,171	a (A)	54,871	a (C)	48,544	a (B)	53,000
Control	d (C)	37,354	c (A)	47,258	b (B)	43,344	d (B)	44,628

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la porosidad % (Profundidad de 10 -20)		
Tratamiento/Muestras		1
Trat 1	b	41,887
Trat 2	b	41,115
Trat 3	a	44,800
Control	c	38,460

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la porosidad % (Profundidad de 20 -30)		
Tratamiento/Muestras		1
Trat 1	b	41,887
Trat 2	c	40,770
Trat 3	a	43,156
Control	d	38,176

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la porosidad % (Profundidad 10 en adelante)						
Tratamiento/Muestras		2		3		4
Trat 1	c (A)	49,923	a (A)	47,033	b (A)	48,249
Trat 2	b (A)	53,923	a (C)	48,025	a (B)	50,747
Trat 3	a (A)	55,857	a (C)	48,271	a (B)	51,947
Control	c (A)	48,571	b (B)	44,067	c (B)	45,774

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

A-B-CD = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la humedad % (Profundidad 0 -10)								
Tratamiento/Muestreos		1		2		3		4
Trat 1	b (A)	9,765	c (B)	5,444	b (A)	10,087	b (A)	9,442
Trat 2	b (B)	9,566	b (B)	9,545	b (BA)	11,827	b (A)	12,919
Trat 3	a (B)	12,978	a (B)	11,796	a (A)	17,707	a (A)	20,225
Control	c (B)	3,724	c (B)	5,162	c (B)	5,508	b (A)	9,166

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ )

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ )

Promedio de la humedad % (Profundidad de 10 -20)		
Tratamiento/Muestreos		1
Trat 1	c	10,977
Trat 2	b	13,176
Trat 3	a	18,788
Control	d	5,588

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la humedad % (Profundidad de 20 -30)		
Tratamiento/Muestreos		1
Trat 1	c	10,855
Trat 2	b	13,491
Trat 3	a	16,466
Control	d	5,923

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

Promedio de la humedad % (Profundidad 10 en adelante)						
Tratamiento/Muestreos		2		3		4
Trat 1	c (B)	8,095	c (A)	11,974	b (A)	11,886
Trat 2	b (B)	12,087	b (A)	15,706	b (BA)	15,120
Trat 3	a (B)	15,703	a (A)	20,427	a (A)	23,172
Control	d (B)	6,153	d (A)	8,440	c (BA)	7,935

a-b-c-d = Diferencias significativas por muestreo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

A-B-C-D = Diferencias significativas de cada tratamiento en el tiempo según Duncan ( $p < 0.001$ ).

## Anexo 5

### Calificación Propiedades Químicas (IGAC)



INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI  
SUBDIRECCIÓN DE AGROLOGÍA  
CONSIDERACIONES GENERALES PARA INTERPRETAR ANÁLISIS DE SUELOS

pH (H <sub>2</sub> O) 1:1	APRECIACIÓN	P ppm (BRAY II)	K meq/100g	%M.O			%N.Total			CIC meq/100g	SATURACIÓN DE BASES (SB) %
				CLIMA			CLIMA				
				FRIO	MEDIO	CÁLIDO	FRIO	MEDIO	CÁLIDO		
<4.5	BAJO	<15	<0.2	<5	<3	<2	<0.25	<0.15	<0.1	<10	<35
EXTREMADAMENTE ÁCIDO 4.6 - 5.0	MEDIO	15 - 40	0.2 - 0.4	5 - 10	3 - 5	2 - 4	0.26 - 0.5	0.16 - 0.3	0.1 - 0.2	10 - 20	35 - 50
	ALTO	>40	>0.4	>10	>5	>4	>0.5	>0.3	>0.2	>20	>50
MUY FUERTEMENTE ÁCIDO 5.1 - 5.5	APRECIACIÓN	RELACIONES				CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON SALES Y SODIO			S.A.I % (SATURACIÓN DE ALUMINIO)	APRECIACIÓN	
FUERTEMENTE ÁCIDO 5.6 - 6.0	RELACIÓN IDEAL	Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	(Ca+Mg)/K	ce mmohs/cm (dS/m)	PSI	CLASE	<15	SIN PROBLEMAS EN GENERAL LIMITANTE PARA CULTIVOS SUSCEPTIBLES	
MEDIANAMENTE ÁCIDO 6.1 - 6.5	K DEFICIENTE		>18	>30	>40	0 - 2	INFERIOR	NORMAL	15 A 30	LIMITANTE PARA CULTIVOS MODERADAMENTE TOLERANTES	
LIGERAMENTE ÁCIDO 6.6 - 7.3	Mg DEFICIENTE	>10	<1			2 - 4		LIMITE			
NEUTRO 7.4 - 7.8	CONTENIDO OPTIMO	ELEMENTOS MENORES* (ppm)				>16					S3
LIGERAMENTE ALCALINO 7.9 - 8.4	SUELO	Zn	Cu	Mn	Fe	0 - 4	SUPERIOR	Na	30 A 60	LIMITANTE PARA CULTIVOS TOLERANTES	
MEDIANAMENTE ALCALINO 8.5 - 9.0	PLANTA	3 - 6	1.5 - 3	15 - 30	20 - 30	4 - 8		NaS1			
FUERTEMENTE ALCALINO >9.0		30 - 100	5 - 25	30 - 200	60 - 500	8 - 16	A	NaS2	>60	NIVELES TÓXICOS PARA LA MAYORÍA DE CULTIVOS	
EXTREMADAMENTE ALCALINO		*Extractables con DTPA en suelos; digestión húmeda en tejido vegetal. Boro en suelos ( extractable en agua caliente ): 0.6 - 1.0 ppm. Boro en tejido vegetal : 30-80 ppm.					INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI LABORATORIO DE SUELOS AREA DE QUÍMICA				

NC(Nivel Crítico): 25 ppm NO<sub>3</sub>; 20 ppm NH<sub>4</sub> NC: 0.2 ppm B(Fosfato de Calcio); NC: 12 ppm P (Olsen modificado); NC: 20 ppm S disponible (Fosfato de calcio)

CONCENTRACION NORMAL EN TEJIDO VEGETAL (Handbook of Reference Methods for Plant Analysis, 1998):

N (%): 2,5-4,5; P (%): 0,2-0,75; K (%): 1,5-5,5; Ca (%): 1,0-4,0; Mg (%): 0,25-1,0; S (%): 0,25-1,0

B (ppm): 10-200; Cu (ppm): 5-30; Fe (ppm): 100-500; Mn (ppm): 20-300; Zn (ppm): 27-100; Mo(ppm): 0.1-0.2; Cl (ppm): 100-500

## Anexo 6

### Calificación Propiedades Físicas (Montenegro, 2003)

Relación entre la densidad aparente(g/cm <sup>3</sup> ) y la porosidad total	
DENSIDAD APARENTE(g/cm <sup>3</sup> )	POROSIDAD TOTAL (%)
< 1.0	> 63
1.0 - 1.2	55 - 62
1.2 - 1.4	47 - 54
1.4 - 1.6	40 - 46
1.6 - 1.8	32 - 39
> 1.8	< 32

Rangos para interpretar la humedad equivalente (%)	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	INTERPRETACIÓN
< 5	Muy baja
5 - 15	Baja
15 - 25	Media
25 - 35	Alta
> 35	Muy alta

Rangos de la Densidad Real	
DR (g/cm <sup>3</sup> )	2.4 - 2.6

**Anexo 7  
Datos climatológicos**

\*\*\* EAAB E.S.P.

SIH SISTEMA DE INFORMACIÓN  
HIDROLÓGICA

\*\*\*

**520 - PRECIPITACION, TOTAL  
MENSUAL mm**

**PERIODO:1929-2004**

**FECHA REPORTE:** 2005/4/7

**ELEMENTO:20111 (P-009 )**

**USAQUEN SANTA ANA**

**TIPO**

**LATITUD:**4°42' **DEPTO:**BOGOTA

**ESTACIO CUENCA:**RIO BOGOTA

**N:**

**LONGITUD:**74°02' **MUNICIPIO:**BOGOTA

**ENTIDAD SUBCUENCA:**QUEBRAD  
:EAAB A SIMAYA

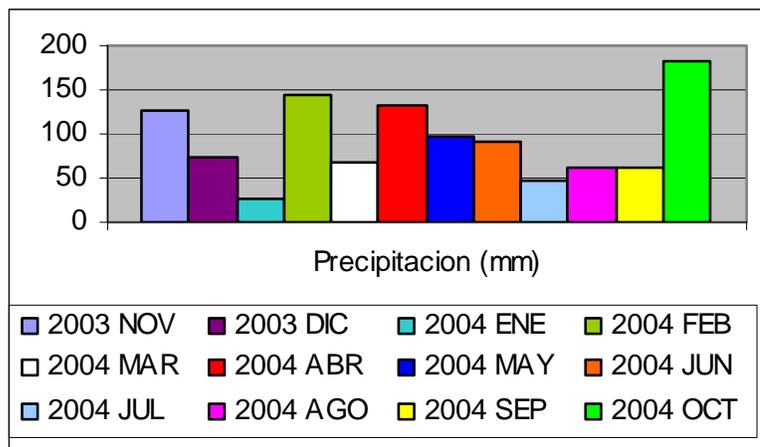
**ELEVACION:**2647.

0

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1929			73.7	139.5	72.0	20.0	6.3	11.1	46.0	71.2	78.2	32.0	550.0
1930	100.1	71.0	39.5	49.5	23.4	76.5	66.0	46.0	4.0	185.0	81.0	73.0	815.0
1931	32.0		21.7	136.5	68.7	135.1	93.1	13.6	58.0	45.5	175.6	32.0	811.8
1932	77.9	104.3	14.7	43.0	98.0	31.0	59.0	14.0	72.0	85.5	203.0	33.0	835.4
1933	18.0	53.5	98.9	120.9	65.1	89.3	180.0	104.2	89.8	142.4	342.0	176.5	1 480.6
1934	35.5	63.2	143.2	28.7	105.0	53.4	53.2	19.1	37.0	174.2	138.6	59.3	910.4
1935	105.5	45.8	97.7	62.1	24.9	23.9	15.8	25.3	189.3	39.0	67.6	12.0	708.9
1936		26.5	19.6	116.5	65.2	20.1	8.0	20.9	123.0	131.6			531.4
1937		35.3	187.0	211.6	224.6	100.5	101.1	90.9	416.6	370.1	661.0		2 398.7
1938	266.5	174.3	343.7	290.3		12.5	428.0	62.4	47.4	167.9	134.3	151.0	2 078.3
1939	53.7	1.6	128.1		91.9	38.5	35.0	47.0	18.0	148.3	101.3	31.3	694.7
1940					92.7	73.3	198.0	62.6	211.7	160.7	279.2	197.1	1 275.3
1941		19.2	135.4	49.5	18.0	12.4	37.0	2.6	46.6	27.6	124.2		472.5
1942		53.1	83.1	157.0	83.7	32.1	15.5	55.8	57.4	273.1	135.4		946.2
1943	73.2	67.6	163.5	161.0	419.3	602.0	542.0	99.0	236.0	175.2	90.8		2 629.6
1944	139.7	115.4	63.5	121.4	242.8	80.0	22.6	26.3	38.4	143.4	123.0		1 116.5
1945		60.4	27.8	210.1	193.6	21.7	29.8	23.0	16.1	262.7	165.6		1 010.8
1946		54.5	74.1	90.1	42.8	24.0	28.0	55.9	2.9	56.0	153.2		581.5
1947		27.0	22.6	17.2	38.0	54.5	59.3	33.7	101.7	128.5	35.2		517.7
1948			110.3		254.8	4.5	30.2	24.2	62.2	87.0	49.9	27.0	650.1
1949		56.1	99.2	124.3	106.0	55.6	43.6	337.2	150.8	84.2	37.3		1 094.3
1950		105.2	88.1	122.5	189.5	75.0	45.6	40.4	71.7	213.6	70.7		1 022.3
1951		42.5	57.4	27.9	42.0	14.5	19.7	11.0i	62.0	61.0	83.0	0.5	421.5
1952		18.0	71.0	69.0	68.8	25.8	51.5	17.0	19.5	30.0	150.0		520.6
1953		33.5	69.0	39.4	44.0	22.0	13.8	16.1	40.0	60.0	77.0		414.8
1954							64.9	52.7					117.6
1955			94.2	74.0	43.0	50.0	94.0i	11.0	72.9	227.5	183.0		849.6
1956	73.6	104.1	79.1	60.2	46.1	86.9	37.3	42.5	58.6	147.0	83.5	180.3	999.2
1957	48.7	51.1	134.1	92.1	169.6	53.8	57.0	40.9	39.2	231.1	69.2	38.2	1 025.0
1958	75.8	65.5	41.9	54.5	53.8	32.6	29.4	68.3	41.2	146.8	233.8	117.9	961.5
1959	26.4	45.0	32.8	57.8	131.7	61.4	103.7	59.0	52.5	162.4	155.4	33.0	921.1
1960	10.6	77.1	57.8	114.4	38.0	28.4	53.5	50.7	47.5	105.7	75.5	92.4	751.6

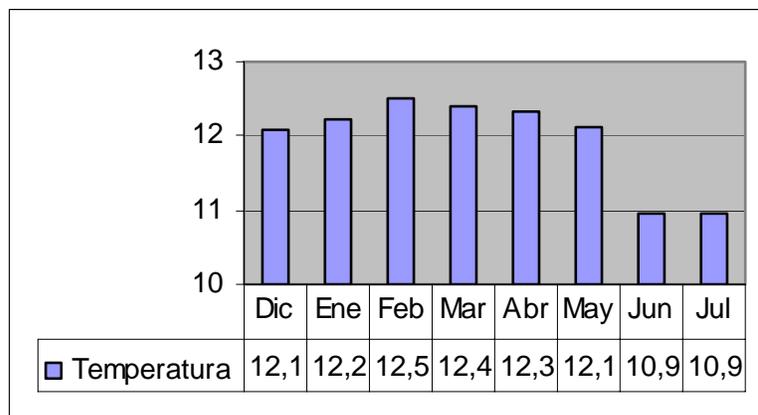
1961	65.6	6.8	110.7	91.8	10.8	32.2	16.0	26.9	39.4	167.3	141.2	3.9	712.6
1962	102.9	70.4	93.2	90.2	116.6	108.7	41.5	58.9	37.0	118.5	78.3	85.0	1 001.2
1963	43.7	108.8	86.4	154.1	126.3	48.2	30.0	31.3	35.2	91.2	177.4	10.5	943.1
1964	10.4	40.3	0.7	154.9	112.6	100.8	65.9	20.9	34.8	98.1	93.5	61.4	794.3
1965	8.1	22.3	28.3	241.1	121.0	26.7	57.0	36.9	16.1	206.3	157.9	32.1	953.8
1966	2.7	43.0	104.8	38.1	52.7	132.5	39.9	76.5	26.6	105.4	339.3		961.5
1967	33.0	36.7	99.5	116.4	86.2	110.5	85.0	34.0	55.5	54.0	234.2	59.7	1 004.7
1968	9.6	71.7	35.1	142.9	74.5	96.8	62.0	32.6	55.0	157.0	171.4	54.0	962.6
1969	128.2	57.5	15.0	166.8	119.9	50.0	22.5	71.9	45.1	293.2	124.7	56.5	1 151.3
1975					108.2	25.3	49.6	65.8	62.0	95.7	122.8	130.9	660.3
1976	18.9	74.8	170.0	135.6	75.0	54.5	35.9	14.4	125.5	314.3	95.9	64.4	1 179.2
1977	0.9i	58.7	139.7	123.4	84.6	17.2	49.6	35.3	81.0	89.0	152.7	97.6	929.7
1978	10.5	43.5i	87.8	174.9	81.2	81.4	38.5	17.3	71.0	69.3	89.2	26.6	791.2
1979	34.3	60.8	108.0	164.5	199.4	92.0	53.3	94.4	19.4	164.6	200.1	76.2	1 267.0
1980	55.2	95.6	23.8	119.7	29.3	85.4i	5.1	34.0	57.3	91.0	61.6	81.6	739.6
1981	13.9	41.6	89.5	127.0	133.7	33.6	16.4	52.4i	42.1	153.3	170.7	84.8	959.0
1982	88.3	73.4	136.1	292.3	101.0	9.7	28.0	22.7	38.6	118.7	79.1	115.5	1 103.4
1983	20.5	111.4	160.0	231.3	87.1	22.0	38.6	17.2	33.4	57.7	51.4	101.7	932.3
1984	209.4	95.6	90.7	82.5	96.3	93.4	33.7	77.8	60.7	62.0	91.9	38.0	1 032.0
1985	69.1	1.5	22.5	66.1	187.1	41.3	37.5	36.9i	99.5	166.8	139.1	56.0	923.3
1986	72.8	58.8i	86.3i	170.6	110.3	84.5	66.2	44.0	30.1i				723.6
1987	28.4	34.3i	35.2	101.2	172.7	23.2i	61.8i	31.5i	56.3	162.6i	82.0i	40.1	829.3
1988	69.6	73.2	55.4	58.2	66.1	47.1	39.9	61.0	68.6i	162.1i	163.4	149.0	1 013.6
1989	33.6	124.0	167.6	75.6	68.3i	55.0	45.3i	14.7	33.8i	85.1i	85.7	82.9	871.6
1990	129.7	66.5i	92.1i	99.0	111.5	29.7	25.3	28.8	23.4	132.0	112.7	70.7i	921.4
1991	85.2	53.7	155.3i	106.0	61.2i		69.8i	72.3	34.0i	52.0	140.0	150.9	980.4
1992	67.3	37.5	125.1	166.8	29.9	18.2	47.7	36.4	52.3	11.0	271.4	53.5i	917.1
1993	61.0i	46.0i	35.4	101.4	118.2	37.1	45.3i	21.4	43.6	84.2	162.1	19.9i	775.6
1994	113.6	79.8	110.5i	86.9	94.9	45.4	41.0	52.3	26.3i	65.2i	126.7	50.2	892.8
1995	13.7	54.0	91.9	185.8	31.9i	78.0	38.7	57.5	20.4	81.0	96.7	172.6	922.2
1996	72.8	103.4	140.4 a	85.5	88.5	35.6	79.3	55.8	29.7	100.6	89.0	70.2	950.8
1997	279.0 r	21.2r	50.8r	54.0r	39.3r	37.6r	51.9r	24.6r	18.0r	60.9r	94.5r	15.1r	746.9
1998	29.0r	34.4r	153.5 a	45.7r	150.4 r	68.8r	72.8r	76.1r	47.8r	126.5 r	77.3r	178.6 r	1 060.9
1999	140.1 r	104.9 r	75.0r	67.8r	24.5r	38.0r	22.6r	37.0r	89.1r	148.0i	156.9i	103.7	1 007.6
2000	135.2 r	226.7 r	157.0 r	82.1r	60.3a	44.0r	46.5i	13.7r	103.7 r	102.0 r	64.0r	23.2r	1 058.4
2001	22.7	84.2	134.4	19.1	76.0	33.1	46.5	40.8	70.3	69.3	108.1	102.6	807.1
2002	88.5r	21.1r	151.9 r	159.7 r	151.2 r	93.1r	43.7r	44.7r	75.3r	86.4r	40.7 r	106.0 r	1 062.3
2003	29.7	55.6r	116.2 r	130.4 r	49.5r	65.0r	48.1r	32.7	55.8r	160.4 r	125.9 r	73.7r	943.0
2004	26.8r	144.2 r	68.1r	133.1 r	97.3	92.2r	46.0r	61.1r	60.5r	183.7 r	130.7 r	107.8i	1 151.5
MED	67.2	64.2	92.3	113.4	98.0	60.9	61.5	45.8	64.3	128.8	136.1	75.8	1 008.3
MAX	279.0	226.7	343.7	292.3	419.3	602.0	542.0	337.2	416.6	370.1	661.0	197.1	661.0
MIN	0.9	1.5	0.7	17.2	10.8	4.5	5.1	2.6	2.9	11.0	35.2	0.5	0.5

**Datos de Precipitación**  
**Estación Climatológica de Usaquén-Santa Ana**



Precipitación anual comprendida entre noviembre de 2003 hasta octubre de 2004.  
 Períodos en los cuales se llevo a cabo el trabajo de campo.

**Datos de Temperatura**  
**Estación Climatológica de Soratama**



Datos de temperatura (C°) comprendidos entre diciembre de 2003 hasta julio de 2004.

## GLOSARIO

**BIOSÓLIDO:** Sólidos obtenidos como subproducto del tratamiento de aguas residuales que han sido sometidos a procesos de estabilización de la materia orgánica, reducción de patógenos y volumen de agua, mediante un proceso biológico, físico o químico.

**BIOSOLIDOS CLASE A:** Son aquellos biosólidos que no poseen ninguna restricción en cultivos de consumo directo por lo cual se consideran de excelente calidad.

**BIOSÓLIDO CLASE B:** Son aptos para ser aplicados al suelo, sin embargo contienen ciertas condiciones que generan restricciones sanitarias para el consumo directo, por contener una mayor concentración de patógenos.

**CANTERA:** Sistema de explotación a cielo abierto que permite la extracción de rocas y minerales, que son necesarios en la industria de la construcción.

**DISTURBIO:** Evento discreto que rompen parcial o totalmente la estructura y función de los compartimentos del ecosistema.

**ESTÉRIL:** Material procedente de las actividades de extracción minera que no tiene ningún valor comercial.

**IMPACTO AMBIENTAL:** Efectos positivos o negativos sobre los recursos naturales y sociales que se derivan de un proyecto en un área geográfica determinada.

**LODOS:** Sólido, de aspecto semisólido o líquido generado durante el tratamiento de aguas.

**MATERIA ORGÁNICA:** Residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición.

**PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:** Tratamiento de las aguas residuales domésticas o industriales con el fin de reducir la carga contaminante y reintegrarlas al medio de mejor calidad.

**RESTAURACIÓN ECOLÓGICA:** Reestablecimiento total o parcial de la estructura y función de ecosistemas disturbados, con el fin de llevarlos a su estado original.

**RECUPERACIÓN ECOLÓGICA:** Recuperación de un elemento, productividad o función biótica sobre un sitio degradado severamente, sin necesidad de llegar a las condiciones y características iniciales antes del disturbio.

**SUELO:** Sistema natural desarrollado a partir de una mezcla de minerales y restos orgánicos bajo la influencia de factores formadores. Suministra oxígeno, nutrientes, agua y anclaje mecánico para las plantas.