

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN DIFERENTES
PROPORCIONES COMO ENMIENDA ORGÁNICA SOBRE EL
REPOBLAMIENTO DE LA MACROFAUNA EDÁFICA
EN LA CANTERA SORATAMA, BOGOTÁ D.C.**

ALEXANDRA MILENA GRANADOS HERNÁNDEZ

José Ignacio Barrera, Director

TRABAJO DE GRADO

Presentado como requisito parcial

Para optar el título de

Biólogo

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE BIOLOGÍA

Bogotá, D.C.

Agosto 5 de 2005

NOTA DE ADVERTENCIA

Artículo 23 de la Resolución N° 13 de Julio de 1946

“ La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará por que no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y por que las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN DIFERENTES
PROPORCIONES COMO ENMIENDA ORGÁNICA SOBRE EL
REPOBLAMIENTO DE LA MACROFAUNA EDÁFICA
EN LA CANTERA SORATAMA, BOGOTÁ D.C.**

ALEXANDRA MILENA GRANADOS HERNÁNDEZ

APROBADO

José Ignacio Barrera, Biólogo MSc.

Director

Diego Zuluaga. Biólogo.

Jurado

William Escobar. Agrónomo. MSc.

Jurado

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN DIFERENTES
PROPORCIONES COMO ENMIENDA ORGÁNICA SOBRE EL
REPOBLAMIENTO DE LA MACROFAUNA EDÁFICA
EN LA CANTERA SORATAMA, BOGOTÁ D.C.**

ALEXANDRA MILENA GRANADOS HERNÁNDEZ

APROBADO

**Angela Umaña, M.Phil
Decana Académica**

**Cecilia Espindola, Bióloga .Msc.
Directora de Carrera**

Agradecimientos

Este trabajo no podría haber sido realizado sin la colaboración de diferentes personas entre las cuales quiero reconocer:

- Al Departamento Técnico y Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) por el aporte financiero, y especialmente a la bióloga Sandra Montoya por su gestión y colaboración.
- Al profesor José Ignacio Barrera biólogo de la Pontificia Universidad Javeriana por la dirección, aportes, aclaración de dudas y apoyo para la realización del trabajo de grado.
- A Bogotana de Aguas y Saneamiento, especialmente al ingeniero ambiental Gian Paolo Daguer por su colaboración en el trámite de solicitud de los biosólidos utilizados en la investigación.
- Al profesor Alexander Feijoo de la Universidad Tecnológica de Pereira, por su aporte en la determinación taxonómica de lombrices de tierra.
- A mis compañeras y amigas por la colaboración y apoyo.

Bogotá, agosto 5 de 2005

Señores
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
Ciudad

Estimados Señores:

Yo Alexandra Milena Granados Hernández, identificada con C.C No. 52.716.131 de Bogotá, autor del trabajo de grado titulado Estudio de la comunidad de Coleópteros en áreas con diferente condición de abandono en la Cantera Soratama. Localidad de Usaquén, Bogotá D.C., presentado como requisito para optar el título de biología en el año de 2005; autorizó a la Universidad Javeriana a:

- a) Reproducir el trabajo de grado en medio digital o electrónico con el fin de ofrecerlo para la consulta en la Biblioteca general ____ Si ____
- b) Poner a disposición para la consulta con fines académicos, en la página web de la facultad, de la biblioteca General y en redes de información con las cuales tenga convenio la Universidad Javeriana ____ Si ____
- c) Enviar el trabajo en formato impreso o digital, en caso que sea seleccionado para participar en concursos de trabajos de grado ____ Si ____
- d) Distribuir ejemplares de la obra, para la consulta entre entidades educativas con las que la facultad tenga convenio de intercambio de información, para que este sea consultado en las bibliotecas y centros de documentación de las respectivas entidades ____ Si ____
- e) Todos los usos que tengan finalidad académica ____ Si ____

Los derechos morales sobre el trabajo son del autor de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 23 de 1982 y en el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. Atendiendo lo anterior, siempre que se consulte la obra, mediante cita bibliográfica se debe dar crédito al trabajo y a su autora. Este documento se firma, sin perjuicio de los acuerdos que la autora pacte con la Unidad Académica referentes al uso de la obra o a los derechos de propiedad industrial que pueden surgir de la actividad académica.

Alexandra Milena Granados Hernández
C.C.52.716.131

FORMATO DESCRIPCIÓN TRABAJO DE GRADO

AUTOR

Apellidos	Nombre
Granados Hernández	Alexandra Milena

DIRECTOR

Apellidos	Nombre
Barrera Cataño	José Ignacio

Trabajo por optar el título de: Bióloga.

Título completo del trabajo: Efecto de la aplicación de biosólidos en diferentes proporciones como enmienda orgánica sobre el repoblamiento de la macrofauna edáfica en la cantera Soratama, Bogotá. D.C

Facultad: Biología

Programa: Carrera Especialización Maestría Doctorado

Nombre del programa:

Ciudad: Bogotá. Año de presentación del trabajo: 2005

Número de páginas:

Tipo de Ilustraciones:

- Tablas y gráficos.

- Fotografías.

Tabla de contenido

Resumen.....	17
Abstract.....	18
1. Introducción.....	19
2. Marco Teórico.....	21
2.1 Antecedentes.....	21
2.2 Aspectos generales de la minería a cielo abierto.....	24
2.2.1 Minería a cielo abierto en Colombia.....	24
2.2.2 Minería a cielo abierto en Bogotá.....	25
2.2.3 Canteras de la Localidad Usaquén.....	26
2.3 Disturbios como eventos modificadores de los ecosistemas.....	27
2.3.1 Aspectos generales.....	27
2.3.2 La minería a cielo abierto como un tipo de disturbio.....	28
2.3.2.1 Impacto de la minería sobre la fauna edáfica.....	29
2.4 Macrofauna Edáfica.....	30
2.4.1 Funciones ecológicas de la macrofauna en el ecosistema.....	32
2.5 Restauración ecológica de áreas disturbadas.....	33
2.5.1 Restauración de minas a cielo abierto.....	34
2.6 Enmiendas edáficas.....	35
2.6.1 Biosólidos como fuente de materia orgánica.....	37
2.6.1.1 Normatividad del uso de los biosólidos.....	38
2.6.2 Efecto de la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica sobre la fauna edáfica.....	39
2.6.3 Características de los terrenos mineros para la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica.....	40
2.6.3.1 Incorporación o mezcla de los biosólidos y tierra o estéril.....	42
2.7 Planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre.....	43
2.7.1 Tratamiento de aguas residuales.....	44
2.7.2 Tratamiento de lodos.....	45

2.7.3 Caracterización de los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre (Bogotá).....	46
2.7.3.1 Características Cualitativas	46
2.7.3.2 Características Físicas	46
2.7.3.3 Características Químicas y Biológicas.....	47
2.7.3.4 Características Agrológicas.....	48
3. Formulación del problema y justificación.....	49
3.1 Formulación del problema	49
3.2. Pregunta de investigación	50
3.3 Justificación de la investigación	51
4. Objetivos	53
4.1 Objetivo General.....	53
4.2 Objetivos Específicos	53
5. Marco Geográfico de la cantera	53
5.1 Localidad de Usaquén.....	53
5.1.1 Geología	54
5.1.2 Geomorfología.....	54
5.1.3 Suelos	55
5.1.4 Sistema Hídrico	56
5.1.5 Clima	56
5.1.6 Flora.....	57
5.1.7 Fauna	58
5.2 Cantera Soratama.....	58
6. Materiales y Métodos.....	65
6.1 Diseño experimental	65
6.1.1 Adecuación del área experimental.....	66
6.1.2 Procedimiento para las mezclas de biosólidos y estéril.....	70
6.2 Métodos	71
6.2.1 Primer objetivo	71
6.2.1.1 Fase de Campo	71

6.2.1.2 Fase laboratorio.....	72
6.2.2 Segundo objetivo y tercer objetivo.....	72
6.2.2.1 Fase Campo.....	72
6.2.2.2 Fase Laboratorio	74
7. Análisis de Información	75
7.1 Composición de la macrofauna edáfica.....	75
7.2 Riqueza	75
7.3 Índice de diversidad de Shannon	75
7.4 Índice de equidad.....	76
7.5 Índice de Simpson.....	76
7.6 Prueba T.....	77
7.7 Índice de Usher	77
7.8 Índice de disimilaridad de Bray - Curtis.....	78
7.9 Análisis de correspondencia canónica	78
8. Resultados	79
8.1. Macrofauna presente en las áreas de la Cantera y Bosque Adyacente	79
8.1.1 Composición de la macrofauna edáfica adulta.....	79
8.1.2 Riqueza y abundancia.....	81
8.1.3 Composición de los estados larvarios.....	82
8.2 Área experimental.....	84
8.2.1 Macrofauna edáfica colectada por el método recomendado por TSBF (adultos).....	84
8.2.1.1 Composición	84
8.2.1.2 Riqueza y abundancia	86
8.2.1.3 Diversidad de los tratamientos por muestreo	90
8.2.1.4 Diversidad de cada tratamiento a través del tiempo.....	91
8.2.1.5 Equidad	91
8.2.1.6 Dominancia de los tratamientos por muestreo	92
8.2.1.7 Dominancia de cada tratamiento a través del tiempo.....	92
8.2.1.8 Distribución vertical.....	93

8.2.1.9 Similaridad	95
8.2.1.10 Asociación de especies a los tratamientos	95
8.2.2 Estados inmaduros de la macrofauna edáfica colectada por el método recomendado por TSBF.....	96
8.2.2.1 Composición	96
8.2.2.2 Riqueza y abundancia	98
8.2.2.3 Diversidad de los tratamientos por muestreo	100
8.2.2.4 Equidad	101
8.2.2.5 Dominancia	101
8.2.2.6 Distribución vertical.....	101
8.2.2.7 Similaridad	102
8.2.2.8 Asociación de especies a los tratamientos	103
8.2.3 Macrofauna edáfica colectada por trampas pitfall (adultos)	103
8.2.3.1 Composición	103
8.2.3.2 Riqueza.....	106
8.2.3.3 Diversidad	106
8.2.3.4 Equidad	107
8.2.3.5 Dominancia	107
8.2.3.6 Similaridad	108
8.2.3.7 Asociación de especies a los tratamientos	109
8.2.3 Macrofauna edáfica colectada por trampas pitfall (estados inmaduros) ...	109
8.2.4.1 Composición y riqueza.....	109
8.2.4.2 Diversidad, equidad y dominancia.....	111
9. Discusión.....	102
9.1 Distribución vertical de las familias más abundantes y estados inmaduros ...	117
9.2 Técnica Pitfall	118
10. Conclusiones	119
11. Recomendaciones.....	119
12. Referencias.....	120
ANEXOS	133

Índice de Tablas

Tabla 1. Características físicas de los biosólidos de la planta El Salitre.....	47
Tabla 2. Características químicas y biológicas de los biosólidos de la PTAR El Salitre según Norma EPA 503-13	48
Tabla. 3 Parámetros agrológicos del biosólido de la PTAR El Salitre	49
Tabla 4. Densidad por morfoespecie (indv/ m ²) de la macrofauna edáfica de las tres zonas de estudio.	82
Tabla 5. Densidad por morfoespecie (indv/ m ²) de los estados inmaduros de la macrofauna edáfica de las tres zonas estudio.	83
Tabla 6. Densidad por morfoespecie (indv/ m ²) de la macrofauna edáfica colonizadora del tratamiento 1 en los cuatro muestreos.	88
Tabla 7. Densidad por morfoespecie (indv/ m ²) de la macrofauna edáfica colonizadora del tratamiento 2 en los cuatro muestreos.	89
Tabla 8. Densidad por morfoespecie (indv/ m ²) de la macrofauna edáfica colonizadora del tratamiento 3 en los cuatro muestreos.	89
Tabla 9. Prueba T que compara los índices de Shannon y Simpson a través del tiempo para los diferentes tratamientos.	91
Tabla 10. Abundancia por m ² de las morfoespecies de los estados inmaduros en los diferentes tratamientos durante los tres muestreos.....	100
Tabla 11. Morfoespecies de estados inmaduros colectados en los tratamientos por las trampas pitfall	111

Indice de figuras

Figura 1. Panorámica de la zona de depósito de estériles.	60
Figura 2. Panorámica de la zona de relicto de bosque altoandino, donde se observa vegetación nativa.....	61
Figura 3. Panorámica de la zona de patios a) parte oriental, donde se observa la ausencia de suelo y la escasa de vegetación y b) parte occidental, donde se observa acumulación de rocas.	63
Figura 4. Zona de bosque adyacente a la cantera, donde se observa vegetación de porte alto.	64
Figura 5. Diseño experimental a) localizado en la zona depósito de estériles de la cantera Soratama y b) Disposición aleatoria de los tratamientos y control.	65
Figura 6. Área experimental: a) Retiro de la vegetación presente de manera manual y b) Desniveles que se presentaban en el terreno después de retirar la vegetación.	67
Figura 7. Área experimental: a y b) Empalizada construida en la parte norte y occidental del terreno.	68
Figura 8. Área experimental: a) Nivelación del terreno, se observa la delimitación de parcelas con estacas y b) Encercamiento del área experimental con alambre de púa.....	69
Figura 9. Homogenización de las mezclas de biosólidos y estériles utilizando la pala mecánica del bobcat.....	70

Figura 10. Mezclas transportadas de la zona de patios al área experimental por medio de volquetas.....	71
Figura 11. Monolitos de 20 cm x 20 cmx 30 cm realizados en los tratamientos para colectar la macrofauna edáfica colonizadora.	73
Figura 12. Banca de madera utilizada en los muestreos para realizar los monolitos.....	74
Figura 13. Abundancia relativa de familias en: a) Zona de depósito de estériles, b) Zona de relicto de bosque altoandino y c) Bosque adyacente a la cantera.	80
Figura 14. Abundancia relativa de las familias colectadas por el método recomendado por TSBF durante los cuatro muestreos en: a) Tratamiento 1 y b) Tratamiento 2.	85
Figura 15. Abundancia relativa de las familias colectadas por el método recomendado por TSBF en el tratamiento 3 durante los cuatro muestreos.	86
Figura 16. Variación de la riqueza de adultos colectados por el método recomendado por TSBF en los diferentes tratamientos durante los cuatro muestreos.	87
Figura 17. Variación del índice de Shannon (adultos) en los diferentes tratamientos durante los muestreos 2, 3 y 4.....	90
Figura 18. Variación del índice de equidad (adultos) en los diferentes tratamientos durante los muestreos 2, 3 y 4.....	92
Figura 19. Variación del índice de Simpson (adultos) en los diferentes tratamientos durante los muestreos 2, 3 y 4.....	93

Figura 20. Índice de Usher para la morfoespecie E1 en los tratamientos durante los s muestreos 2, 3 y 4. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas.	94
Figura 21. Índice de Usher para la morfoespecie C2 en los tratamientos durante el cuarto muestreo.	94
Figura 22. Dendograma de similaridad de Bray Curtis entre las diferentes zonas de la cantera y los tres tratamientos en términos de abundancia de morfoespecies (adultos) colectados por el método recomendado por TSBF.	95
Figura 23. Análisis de Correspondencia Canónica donde se muestran las morfoespecies asociadas a los tratamientos (Método TSBF).	96
Figura 24. Abundancia relativa de las familias y órdenes de los estados inmaduros colectados por el método recomendado por TSBF en los: a) Tratamiento 1, b) Tratamiento 2 y c) Tratamiento 3.	97
Figura 25. Abundancia relativa por familia de estados inmaduros colectados en el control por el método recomendado por TSBF.	98
Figura 26. Variación de la riqueza de estados inmaduros colectados por el método recomendado por TSBF, en los diferentes tratamientos y control durante los muestreos.	99
Figura 27. Índices de Shannon, Simpson y equidad para las morfoespecies de estados inmaduros de los tratamientos durante el cuarto muestreo.	101
Figura 28. Índice de Usher para los estados inmaduros de los tratamientos durante el cuarto muestreo.	102

Figura 29. Dendograma de similaridad de Bray Curtis entre las diferentes zonas de la cantera, los tres tratamientos y control en términos de abundancia de morfoespecies (estados inmaduros) colectados por el método recomendado por TSBF.....	103
Figura 30. Análisis de Correspondencia Canónica donde se muestran las morfoespecies de estados inmaduros asociadas a los tratamientos (Método del TSBF).....	104
Figura 31. Abundancia relativa por familia de la macrofauna edáfica epigea del: a) Tratamiento 1 y b) Tratamiento 2.	105
Figura 32. Abundancia relativa por familia de la macrofauna edáfica epigea del tratamiento 3.....	106
Figura 33. Riqueza de adultos epigeos en los diferentes tratamientos y control en el cuarto muestreo.	107
Figura 34. Índice de Shannon, Simpson y equidad de adultos en los diferentes tratamientos y control - trampas pitfall.	108
Figura 35. Dendograma de similaridad de Bray Curtis de los diferentes tratamientos y control en términos de abundancia de morfoespecies, colectados por trampas pitfall.	109
Figura 36. Análisis de Correspondencia Canónica donde se muestran las morfoespecies asociadas a los tratamientos (trampas pitfall).	110
Figura 37. Abundancia relativa de los estados inmaduros epigeos de los tratamientos.	110
Figura 38. Índice de Shannon, Simpson y equidad de los estados inmaduros en los diferentes tratamientos - trampas pitfall.....	112

Resumen

Se evaluó el efecto de la aplicación de los biosólidos generados en la Planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre de Bogotá como enmienda orgánica sobre el repoblamiento de la macrofauna edáfica en la cantera Soratama. Los tratamientos se trabajaron en proporciones de biosólidos y estériles: 1:8, 1:4, 1:2 y control 0:1. Tres replicas fueron realizadas para cada tratamiento, dispuestas en parcelas experimentales en un diseño completamente aleatorizado. El método de colección de la macrofauna edáfica fue de monolitos de 20 cm x 20 cm x 30 cm divididos en profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm. Los muestreos se realizaron al inicio del experimento (0 meses), a los 3, 6 y 9 meses. En áreas adyacentes se realizó un muestreo al inicio de la investigación. El índice de similitud de Bray Curtis indicó una baja similitud entre los tratamientos y las zonas adyacentes para adultos y estados inmaduros. La macrofauna edáfica colonizadora fue caracterizada por datos de riqueza, diversidad, equidad y dominancia de especies. El repoblamiento de adultos se observó en el segundo muestreo (a los tres meses) y fue exclusiva de los tratamientos con biosólidos. Las familias más abundantes en los tratamientos fueron Enchytraeidae y Staphylinidae. En el caso de estados inmaduros el repoblamiento se observó en el tercer muestreo (a los seis meses) en los tratamientos. La diversidad, equidad y riqueza de especies para adultos y estados inmaduros aumentaron con el tiempo y los mayores valores se presentaron en el tratamiento con proporción de biosólido y estéril 1:8. La aplicación de biosólidos favorece el repoblamiento de la macrofauna edáfica y se ve más favorecida a los nueve meses en los tratamientos con menor proporción de biosólidos.

Abstract

This investigation evaluated the effect of sewage sludge application of the waste water treatment plant El Salitre on Bogota, like organic amendment on soil macrofauna recolonization in Soratama quarry. The application was performed in proportions of sewage sludge and arids: 1:8, 1:4, 1:2 and control 0:1. Three replicates were conducted for each dose application in experimental plots. The collection method for soil macrofauna was based on the excavation of three monoliths of 20cm x 20cm x 30 cm, separated into two layer de 0-15 cm and 15-30 cm. Samples were performed at early of investigation (0 month) at 3, 6 and 9 months. Adjacent sites sampled at early of investigation. Bray Curtis Indices indicated a low similarity between doses application and adjacent sites for both adults and larvaes. Soil macrofauna was characterized by dates on species richness, diversity and dominance. The recolonization of adults was seen in second sampling (three months) and exclusive of doses applications with sewage sludge. Families most abundant, in these doses, were Enchytraeidae and Staphylinidae. In the case of larvaes, the recolonization was observed (six month) in the majority of doses. The diversity and species richness for adults and larvaes improved with the time, the highest values were in the treatment with proportion sewage sudge and arids 1:8. In conclusion, sewage sludge application helps the recolonization of soil macrofauna, especially in application with low doses.

1. Introducción

La transformación de los ecosistemas de los cerros orientales de Bogotá ha estado muy ligada a la ocupación de la ciudad, principalmente desde su fundación por los españoles en las primeras décadas del siglo XVI. Durante los siguientes cuatro siglos la causa principal de transformación fue la tala debido a la necesidad de leña para la construcción de viviendas. Hacia principios del siglo XX se presentan otras causas que se hicieron más evidentes en la medida que la ciudad fue creciendo, tales como: a) los incendios forestales en las épocas secas, b) la presencia de plantaciones forestales, c) el uso agropecuario, d) la expansión urbana y e) la extracción de materiales a cielo abierto (Salamanca & Camargo, 2002).

La extracción de materiales a cielo abierto ha sido de gran importancia para el desarrollo urbanístico del Distrito Capital, debido a que en ella se extraen materiales como arenas, arcillas y gravas, que son utilizados para la industria de la construcción. Sin embargo, esta actividad a pesar de ser transitoria genera una transformación total en los ecosistemas al eliminar la vegetación, la fauna, el suelo, cambiar las geoformas del paisaje y las condiciones microclimáticas.

Dicha transformación puede ser más dañina, cuando la explotación no se hace de manera planificada, ya que no se realiza la reconfiguración de taludes, manejo de aguas superficiales y del descapote. De esta manera, los terrenos quedan más expuestos a procesos erosivos y problemas de inestabilidad (derrumbes, remoción en masa) que ponen en riesgo a las comunidades humanas asentadas en las proximidades de las canteras (Vadillo, 1991; Correa, 2000).

Al eliminar el compartimento suelo en dichos terrenos, se crean condiciones extremadamente hostiles para el re-establecimiento de la fauna edáfica y vegetación, tales como: alta pedregosidad, fluctuaciones drásticas de temperatura y humedad, pH extremadamente ácido y bajos contenidos de materia orgánica y nutrientes.

Situación que unida a los derrumbes y lavado de sustrato, hace que la recuperación natural de dichos compartimentos y del ecosistema en general, sea más lenta (Curry, 1998; Brown *et al.*, 2001).

Cuando los ecosistemas prestan servicios trascendentales y su estado puede poner en peligro la vida en todas sus dimensiones, se hace necesario implementar procesos de restauración ecológica que aceleren el re-establecimiento de los compartimentos y así mejorar las condiciones adversas de los terrenos.

Para la recuperación del compartimento del suelo y específicamente de la fauna edáfica después de la extracción de materiales a cielo abierto, es necesario agilizar la estabilización de las variables físicas y químicas del sustrato y hacer un aporte adecuado de alimento. La estabilización puede lograrse mediante la implementación de una enmienda orgánica que contrarreste los efectos de la acidez, mejore la retención de agua, aporte materia orgánica y nutrientes (alimento) y además minimice la erosión (Curry, 1998)

Entre las enmiendas orgánicas que se han utilizado en la recuperación de suelos afectados por erosión y pobres en nutrientes se encuentran los purines, el compost, el estiércol de vaca, la gallinaza, cada una con resultados importantes. Últimamente se han utilizado los biosólidos que son un producto sólido de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Croau *et al.*, 2002; Petersen *et al.*, 2003; Minor & Norton, 2004).

Actualmente, Bogotá cuenta con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Salitre que produce entre 130 y 150 toneladas diarias de biosólidos que son dispuestos en el Relleno Sanitario de Doña Juana para generar cobertura vegetal en las celdas que son clausuradas (BAS, 2002). Debido a la actual producción de biosólidos y a su posible crecimiento por la generación de nuevas plantas de tratamiento, es necesario buscar otras alternativas de aprovechamiento como: la

agricultura, en plantaciones forestales y viveros, en recuperación de suelos degradados por minería, en la elaboración de abonos y materiales para la construcción, y en la biorremediación de suelos contaminados; como se ha realizado en otros países del mundo (Daguer, 2003).

En la recuperación de suelos degradados, los biosólidos pueden ser utilizados como enmienda orgánica, por su alto contenido de materia orgánica (M.O.), fósforo (P), potasio (K) y alta humedad. Sin embargo, según su origen pueden presentar patógenos y metales pesados en cantidades que pueden resultar peligrosos para la vida humana y otras especies (BAS, 2002).

Por tal motivo, antes de aprovechar este material de manera generalizada se deben realizar investigaciones que permitan valorar el uso potencial de los biosólidos como enmienda orgánica en la restauración ecológica de canteras y en otro tipo de suelos pobres. En este sentido, la investigación pretende aportar elementos sobre el comportamiento de los biosólidos como enmienda orgánica y para ello se analizó el repoblamiento de la macrofauna edáfica cuando se aplica este material en diferentes proporciones, con el propósito de recomendar a la autoridad ambiental elementos fundamentales sobre su uso.

Este trabajo hace parte del Convenio No. 017 celebrado entre el Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) y la Pontificia Universidad Javeriana, que tiene por objetivo elaborar diseños de restauración ecológica de la Cantera Soratama, de acuerdo a consideraciones sociales, políticas, jurídicas y ecosistémicas.

2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

- Culliney *et al.*, (1986), evaluaron el efecto de los biosólidos contaminados con metales pesados PCB's y otros químicos tóxicos sobre la estructura de la

comunidad de artrópodos en suelos agrícolas, concluyeron que los biosólidos de pequeñas ciudades con poca o ausencia de industrias pueden promover el crecimiento de la vegetación. Sin embargo, los resultados sugieren que los lodos químicamente contaminados de grandes ciudades pueden afectar adversamente los cultivos y la artropofauna asociada.

- Larsen *et al.*, (1996), determinaron el efecto del enriquecimiento de nutrientes y metales pesados sobre las poblaciones y estructura de la comunidad de Carabidae. Concluyeron, que los tratamientos de biosólidos y fertilizantes aumentan significativamente la abundancia, riqueza y diversidad de especies. Esta respuesta es probablemente un resultado indirecto del crecimiento de vegetación causado por el enriquecimiento de nutrientes.

- Sort y Alcañiz (1996, 1999), evaluaron el efecto de los biosólidos sobre la agregación del suelo y la reducción de la erosión en canteras de piedra calcárea. Concluyeron que la aplicación de biosólidos mejora la estabilidad de los agregados y la estructura del suelo, lo que causa un incremento en la resistencia a la erosión.

- Barrera *et al.*, (2001), describieron el efecto de la fertilización del suelo con altas dosis de biosólidos sobre las poblaciones de lombrices y las concentraciones de metales pesados en el suelo y en los tejidos de lombrices en una cantera de rocas calizas. Encontraron que la densidad de lombrices es significativamente más abundante en los tratamientos enmendados con biosólidos, este resultado justificado por el incremento del contenido de materia orgánica del suelo. Además, las concentraciones de metales pesados en los tejidos de las lombrices no presentaron una relación lineal con las concentraciones del suelo.

- Al- assiuty *et al.*, (2000) determinaron la influencia de la aplicación de biosólidos sobre las poblaciones de los grupos más abundantes de microartrópodos del suelo (Collembola y Acaros). Concluyeron que la aplicación de biosólidos tiene una

marcada influencia sobre algunos microartrópodos, en otros no fue detectado algún efecto. La intensidad del efecto estuvo correlacionada con la dosis mas alta (6.5 ton/ha) después de un periodo de recuperación de un año, también se presento un efecto significativo sobre la comunidad de oribátidos en la distribución de edades.

- Petersen *et al.*, 2003, evaluaron el efecto de dos tipos de biosólidos, compost y abono de estiércol de cerdo, sobre las propiedades y la biota del suelo. Ellos encontraron que relativo a los tratamientos no fertilizados, el compost y abono presentaron el mayor incremento en las densidades poblacionales de microartrópodos con relación a los biosólidos.

- Minor & Norton (2004), evaluaron el efecto de diferentes enmiendas, los biosólidos entre ellas, aplicadas a cultivos de sauce en Nueva York, sobre las poblaciones de ácaros del suelo. Concluyeron que la aplicación de biosólidos afecta significativamente las poblaciones de Oribatida (28 spp) y Mesostigmata (40 spp), lo cual se atribuye a la alteración de la estructura del hábitat y disponibilidad de comida. Los Mesostigmata fueron beneficiados por los biosólidos y en cambio los Oribatida fueron adversamente afectados y por tanto la utilización de este fertilizante requiere monitoreo.

- Adesodun *et al.*, (2005) estimaron el efecto de los biosólidos y un biocida sobre la fauna del suelo expresada en propiedades micromorfológicas. Concluyeron que existe asociación entre la actividad de la fauna y los tipos de tratamiento. Los biosólidos incrementaron la actividad de la meso y macrofauna que es expresada en la cantidad de excremento, mientras el tratamiento del biocida causó reducción. En el área experimental la actividad de la familia Enchytraeidae fue la más dominante.

2.2 Aspectos generales de la minería a cielo abierto

La industria minera es conocida como el conjunto de operaciones que ocurren en la

exploración, explotación y beneficio o aprovechamiento de materiales. Esta industria se diferencia de las demás en que la materia prima está constituida por recursos no renovables que se encuentran en el suelo o subsuelo (Ortiz, 1992).

Las actividades mineras son clasificadas en dos grupos de acuerdo al sistema de explotación: en subterráneas y a cielo abierto. Dentro de este último grupo se encuentran las canteras que son extracciones de rocas y minerales no disgregados como: gravas, gravillas, arcillas, arenas y piedra (Ayala *et al.*, 1989; Correa, 2000b; Correa, 2003).

Los materiales de cantera han sido utilizados para la construcción de obras, tales como: vías, centros comerciales y viviendas. También se han requerido en la producción de cerámicas, vidrio, plástico, pintura y papel (Correa, 2003).

A pesar de la influencia que han tenido estos materiales en el desarrollo urbanístico y económico de las ciudades, es importante señalar que los métodos utilizados por este sector minero en el proceso de extracción generan alteraciones negativas en los ecosistemas (Correa, 2000; FRET, 2001).

2.2.1 Minería a cielo abierto en Colombia

En Colombia, se han utilizado los materiales de canteras como fuente de suministro de materias primas para la construcción. Por tanto, la explotación de canteras es base fundamental en el sector económico de la construcción y desarrollo de las ciudades.

Para el año 2000 Ingeominas, reportó 6737 predios mineros, de los cuales 3409 correspondían a canteras, de las que se extrae principalmente: arenas y gravas (50%), seguido de arcillas (35 %), piedras de caliza (11%) y por último las piedras ornamentales (4%).

2.2.2 Minería a cielo abierto en Bogotá

El Distrito Capital está ubicado en un área geológica que proporciona grandes volúmenes de materiales para la construcción, tales como: arena, arcilla, grava, gravilla, recebo y piedra (FRET, 2001; Correa, 2003).

La extracción de estos materiales se realiza bajo el sistema a cielo abierto y se concentran fundamentalmente en las estribaciones de los cerros orientales norte y sur de la ciudad y en los cerros sur- occidentales y valle del río Tunjuelito (Delgado & Mejía, 2002; Correa, 2003).

En el año 2002 dentro del nuevo perímetro urbano se identificaron ciento cuarenta y cuatro (144) registros de actividades extractivas, distribuidos por localidad de la siguiente manera: Ciudad Bolívar con 33, San Cristóbal 19, Usme 39, Usaquén 16, Rafael Uribe 30 y Tunjuelito 7 (Delgado & Mejía, 2002).

En general se ha podido observar que un alto porcentaje de actividades extractivas se han desarrollado de manera no planeada y antitécnica, debido a que no se tuvo el más mínimo cuidado en la preservación del medio ambiente, lo que ha generado diferentes impactos ambientales al sistema orográfico de la ciudad (Correa, 2000).

Debido a que gran parte de las extracciones mineras se han localizado en los Cerros Orientales de Bogotá (Reserva Forestal Protectora); el DAMA como entidad ambiental y en cumplimiento de las resoluciones específicas (1277/93 – 0803/99) y del Plan de Ordenamiento Territorial/2000; ha exigido la presentación de planes de recuperación morfológica y ambiental (PRMAs) para cada una de las actividades extractivas localizadas en su jurisdicción y que están ubicadas fuera de las zonas compatibles con la minería. Estos planes buscan implementar y ejecutar procesos de recuperación física de las áreas degradadas por las actividades mineras y así permitir su incorporación al entorno urbano (Delgado & Mejía, 2000, 2002).

2.2.3 Canteras de la Localidad Usaquén

En la localidad Usaquén se ha efectuado una intensa actividad extractiva a cielo abierto desde hace mas de 30 años, con métodos mecanizados pocos tecnificados que generan un grave deterioro de la Zona de Preservación de los Cerros Nor-orientales del Distrito Capital (Delgado & Mejía, 2000).

Actualmente se identifican 16 actividades extractivas, de las cuales siete se encuentran activas, cinco inactivas y cuatro abandonadas. Del total solo dos poseen el titulo minero, las demás corresponden a áreas de suspensión de actividad minera, es decir, de recuperación morfológica, paisajística, ambiental y urbanística (Delgado & Mejía, 2000, 2002).

2.2.4 Aspecto legal

La regulación del estado para el sector minero fue mínima hasta principios de los años 70; esta industria se basó principalmente en la eficiencia económica, sin que el beneficio social y el deterioro ambiental fueran factores de importancia.

Actualmente la normatividad legal de la minería en Colombia, lucha contra el deterioro ambiental producido por dicha actividad, por esto la Ley 99 de 1993, las resoluciones 1277 de 1996 y 0803 de 1999 expedidas por el Ministerio del Medio ambiente y ley 685 de 2001, exigen la restauración ecológica de los territorios dedicados a la minería a cielo abierto (Delgado & Mejía, 2002).

2.3 Disturbios como eventos modificadores de los ecosistemas.

2.3.1 Aspectos generales

El estado actual de los ecosistemas es una consecuencia de los disturbios, las condiciones propias del sitio y el proceso de reemplazamiento de las especies (Bazzaz, 1983; Sousa, 1984).

Los disturbios son eventos discretos que generan un cambio espacial y temporal en la estructura y función del ecosistema, comunidad o población, además producen cambios en la oferta de los recursos, en la disponibilidad del sustrato y en el ambiente (White & Pickett, 1985). De otra parte, los disturbios crean espacios (por muerte o desplazamiento de individuos) y proveen oportunidades a los nuevos colonizadores para establecerse (Sousa, 1984; Beeby, 1994). Por ello, juegan un papel crítico en determinar la abundancia y la diversidad de especies, disponibilidad de energía, cambios en la biomasa y en la organización vertical y horizontal de las especies (Forman & Godron, 1986). Además, pueden presentarse en las comunidades que se encuentran en equilibrio o clímax (Bazzaz, 1983).

Los disturbios de acuerdo a su origen han sido clasificados en naturales y antrópicos; y las modificaciones que pueden causar en los ecosistemas dependen del régimen, es decir de la extensión (área), frecuencia (número de disturbios por período), severidad (efecto causado sobre el organismo, comunidad o ecosistema) y la intensidad (fuerza física del disturbio por área o tiempo) (Bazzaz, 1983; White & Pickett, 1985; Sousa, 1985; Glenn-Lewin *et al.*, 1992)

2.3.2 La minería a cielo abierto como un tipo de disturbio

La minería a cielo abierto ha sido históricamente una de las actividades productivas que ha causado más degradación a los ecosistemas. Es un tipo de disturbio severo o

grave debido al efecto que causa en los tres compartimentos del ecosistema (vegetación, suelo y fauna) y los problemas que se desencadenan por la pérdida de los mismos (Hernández, 1996).

La vegetación es el primer compartimento que se elimina para dar inicio al retiro del descapote y así iniciar la extracción. En este sentido, se pierden sus funciones: producción de oxígeno, estabilidad del substrato por sus raíces, hábitat, refugio y alimento para la fauna. Además, la pérdida de la cobertura vegetal genera un cambio en el microclima del área, al dejar de actuar de barrera contra vientos y otras variables climáticas (Vadillo, 1991; Correa, 2000; Delgado & Mejía, 2000).

El segundo compartimento que se elimina es el suelo, de esta manera los terrenos quedan descubiertos y expuestos a variables climáticas que inician procesos erosivos. La erosión hídrica, se produce por el arrastre de sedimentos de las aguas lluvias, este proceso se genera principalmente en las áreas desprovistas de descapote (Ayala *et al.* 1989; Vadillo, 1991; Correa, 2000; Delgado & Mejía, 2000).

El compartimento de la fauna también es eliminado, ya que depende de la vegetación y el suelo (hábitat, alimento). Adicionalmente, los ruidos que se presentan en la extracción por el uso de dinamita y maquinaria, hacen migrar a los organismos a otros lugares y así todas las funciones que cumplen son pérdidas (Ayala *et al.* 1989; Vadillo, 1991; Correa, 2000).

También en el desarrollo de la extracción se crean nuevas formas de relieve, que alteran las corrientes de aire, el clima, microclima, las redes de drenaje y la estabilidad de las laderas (Vadillo, 1991; Correa, 2000).

Adicional a las alteraciones presentes en los ecosistemas disturbados por la minería a cielo abierto, se genera un problema social, ya que en las canteras y sus alrededores se construyen barrios subnormales donde las garantías de seguridad son

mínimas (Vadillo, 1991; Correa, 2000; Delgado & Mejía, 2000).

2.3.2.1 Impacto de la minería sobre la fauna edáfica

Para iniciar la extracción de un material a cielo abierto se requiere que la vegetación y el suelo del área sean removidos; la eliminación de estos dos compartimentos del ecosistema afecta directamente la fauna edáfica ya sea al reducir o eliminar localmente sus poblaciones (composición, diversidad y riqueza), debido a la pérdida de su fuente primaria de alimento (Bradshaw, 1984; Lavelle *et al.*, 1994; Marashi & Scullion, 2003; Barros *et al.*, 2002).

Para aminorar los impactos generados por la remoción del suelo y de la vegetación, se deben almacenar las capas fértiles del suelo con el fin de extenderlas una vez se proceda a la recuperación del área y así permitir que se acelere la colonización de la vegetación y de la fauna (Ayala *et al.*, 1989; Hernández, 1996; Vadillo *et al.*, 2000; FRET, 2001)

En las canteras donde no se efectúa un eficiente manejo del suelo (se bota en un vertedero), como es el caso de la mayoría de canteras del Distrito Capital, no se dispone de un material o sustrato para cubrir las superficies explotadas al final de la extracción, lo que hace más lento el proceso de colonización de la vegetación y fauna (Ayala *et al.*, 1989; Ma y Eijsackers, 1989; Hossner y Hons, 1992; Logan, 1992 En: Curry, 1998; FRET, 2001).

En estos casos la sucesión natural o sucesión primaria del área disturbada partirá de la ausencia de propágulos por falta del banco de semillas; y tanto la inmigración desde otros lugares como el establecimiento de la fauna edáfica se verán limitadas, debido a las condiciones existentes en el terreno como son: 1) lavado de partículas 2) ausencia de materia orgánica y nutrientes; 3) fluctuaciones fuertes de humedad y temperatura en la superficie, 4) y pH extremos (Bradshaw, 1984; Scullion, 1992;

Lavelle *et al.*, 1994b; Lavelle *et al.*, 1995; Curry; 1998; Brown *et al.*, 2001).

Las especies capaces de tolerar las condiciones extremas son muy pocas y como resultado los procesos de desarrollo del ecosistema puede tomar un largo tiempo. Por esta razón los requisitos para el re- establecimiento de la macrofauna en suelos severamente degradados por actividad minera, incluye la mejora del ambiente físicoquímico, temperatura y la provisión adecuada de alimento (Curry, 1998).

2.4 Macrofauna Edáfica

La fauna del suelo juega un papel importante en la productividad de los ecosistemas, por su capacidad de alterar el ambiente superficial y edáfico en el cual se desarrollan las plantas (Lavelle *et al.* 1994).

De acuerdo a su tamaño, la fauna del suelo se ha clasificado en: microfauna, mesofauna y macrofauna. El término macrofauna ha sido usado por más de 35 años, y se refiere a los grandes invertebrados del suelo (Lavelle *et al.*, 1995; Fragoso *et al.*, 2001).

Jackson y Raw (1966), y Kevan (1968) definieron la macrofauna como el grupo de organismos del suelo que pueden ser percibidos a simple vista. Posteriormente, Wallwork (1970) la define como los organismos que miden más de 10 mm en longitud. Sin embargo, otros autores como, Swift y colaboradores (1979), sugirieron la división de acuerdo al diámetro del cuerpo con el propósito que la clasificación sea más funcional, respecto a la fragmentación de la hojarasca y descomposición del suelo; desde entonces, la macrofauna incluye invertebrados que habitan en o sobre el suelo y que miden en diámetro más 2 mm. Por último, Eggleton y colaboradores (2000), concluyen que la macrofauna, tiene el 90% o más de sus especímenes visibles (Lavelle *et al.*, 1995; Brussaard, 1997; Fragoso *et al.*, 1999; Brown *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2001b; Fragoso *et al.*, 2001).

La macrofauna incluye mas de 20 grupos taxonómicos entre estos se encuentran: termitas (Isopoda), escarabajos (Coleoptera), hormigas (Formicidae), arañas (Arachnida), grillos (Orthoptera), caracoles (Mollusca), milpiés (Diplopoda), ciempiés (Chilopoda), tijeretas (Dermaptera), isópodos (Isopoda), Diplura, hemípteros, homópteros, oligoquetos como lombrices de tierra y enchytreidos; y larvas de Diptera, Lepidoptera y Coleoptera. De estos los más diversos pertenecen al orden Coleoptera (Brown *et al.*, 2001; Fragoso *et al.*, 2001b).

Además de la clasificación de acuerdo al tamaño, la fauna del suelo se puede subdividir según los recursos que explotan (gremios tróficos) en:

- Fitófagos: Comen sobre material vegetal viviente, incluye importantes pestes de cultivos algunos como caracoles, larvas y adultos de insectos (Jackson & Raw, 1975; Brown *et al.*, 2001).
- Saprófagos o detrítivoros: Son descomponedores o desintegradores que se alimentan de material vegetal o animal en distinto grado de descomposición. Incluyen varios micro y macroartrópodos como las lombrices epigeas y anécicas, caracoles, larvas de Diptera, milpiés, hormigas y termitas (Jackson & Raw, 1975; Coleman & Crossley, 1996; Brussaard, 1997; Brown *et al.*, 2001).
- Depredadores: Son principalmente carnívoros y se alimentan de otros organismos, incluye hormigas, arácnidos, escorpiones, ciempiés, y varias familias de escarabajos como la familia Carabidae y Staphylinidae (Jackson & Raw, 1975; Coleman & Crossley, 1996; Brown *et al.*, 2001)
- Omnívoros: comen todo tipo de alimento, tanto de origen vegetal como animal (Brown *et al.*, 2001).

2.4.1 Funciones ecológicas de la macrofauna en el ecosistema.

La macrofauna desempeña funciones importantes en la transformación del suelo (Amat & Soto, 1988; Berry, 1994; Lavelle *et al.*, 1994; Brussaard *et al.*, 1997; Brown *et al.*, 2001b), tales como:

a) Descomposición de materia orgánica: es facilitada por la macrofauna a través de la fragmentación mecánica y desintegración de los residuos y restos orgánicos, lo que optimiza la degradación microbiana y, por consiguiente, hace más rápida la incorporación de la materia orgánica al suelo.

b) Ciclo de nutrientes: La macrofauna a través de los procesos de digestión - excreción de la materia orgánica, da como resultado la síntesis de materiales húmicos y formas disponibles para las plantas, así como también la mezcla de la fracción orgánica con la mineral del suelo.

c) Fertilidad del suelo: La producción de microflora intestinal por los organismos, permite el enriquecimiento microbiológico y, por tanto, el aumento de la fertilidad edáfica.

d) Bioturbación: La movilidad vertical y horizontal de la macrofauna en el suelo, crea canales, poros y agregados que modifican ciertas propiedades físicas como el transporte de gases y agua en el suelo. Además se crean y modifican el hábitat para otros organismos más pequeños del suelo.

2.5 Restauración ecológica de áreas disturbadas

El sobreuso de terrenos por actividades humanas como la industria extractiva, la agricultura y pastoreo, entre otras; pueden generar terrenos fuertemente deteriorados o degradados (Jansen, 1997). En algunos casos, estas actividades pueden ser

sostenibles cuando los procesos sucesionales son suficientes para reparar el daño causado. Sin embargo, cuando estos procesos son insuficientes o demasiado lentos, es decir que ocurren en el transcurso de varias décadas, puede ser necesaria la intervención humana, dicha intervención puede tener objetivos diferentes como: la recuperación, rehabilitación o restauración ecológica (Brown & Lugo, 1994).

La restauración ecológica tiene como objetivo detener la degradación y dirigir el ecosistema disturbado a lo que se presume fue su estado original; restablece los atributos perdidos del área disturbada en términos de función y estructura a través de la aplicación de técnicas y estrategias (Brown & Lugo, 1994; Hobbs & Norton, 1996; Higgs, 1997; Bradshaw, 2002).

La restauración ecológica es soportada por la ecología de restauración, ciencia que se encarga de estudiar, analizar e interpretar los fenómenos que ocurren durante el restablecimiento de áreas disturbadas y provee bases científicas para la práctica, es decir para la restauración ecológica (Clewell, 1993; Barrera & Ríos, 2002).

Aunque la restauración implica llegar al ecosistema original no alterado, no siempre se conduce exactamente así, en ciertos casos el objetivo puede ser la rehabilitación o la recuperación. El término rehabilitación se refiere al retorno de cualquier ecosistema transformando, deteriorado o degradado a un ecosistema totalmente funcional sin considerar su estado original o el estado final deseado, es decir se restaura la estructura y función de algunos elementos del sistema hasta el punto que el ecosistema pueda regenerarse por sí solo. La recuperación, en cambio, es el proceso por el cual en tierras abandonadas o muy degradadas la productividad y alguna medida de la función biótica son restauradas (Brown & Lugo, 1994; Bradshaw, 2002; Salamanca & Camargo; 2002).

2.5.1 Restauración de minas a cielo abierto

La restauración de las minas a cielo abierto y el desarrollo del suelo en muchas situaciones pueden llegar a ser extremadamente lentos, especialmente en lugares donde la explotación fue inadecuada (Bradshaw, 1997; Salamanca & Camargo, 2002).

La recuperación natural del compartimento suelo depende directamente de los aportes de la vegetación. Este proceso puede durar muchos años, debido al poco éxito de colonización de las plantas en ambientes adversos. Además, su productividad y crecimiento son muy lentos en las severas condiciones de las canteras. En las primeras fases de la sucesión en una cantera la vegetación no puede mejorar el microclima, ya que para ello requiere crecer y extenderse, proceso que se ve limitado por la pobreza o ausencia del suelo. Adicionalmente, los problemas de inestabilidad (pendientes negativas) y remociones en masa retroceden los procesos sucesionales (Salamanca & Camargo, 2002).

En el proceso de restauración es necesario hacer inicialmente la reconstrucción de pendientes, con el propósito de reducir la erosión y pérdida de agua. Además de hacer una reconstrucción geomorfológica, es importante crear un nuevo sistema de drenaje que este en equilibrio con el entorno y clima de la región (Ayala *et al.*, 1989; Munshower, 1994; Vadillo *et al.*, 2000).

Dado que el proceso de sucesión en una cantera es muy lento, se deben considerar estrategias de mejoramiento del substrato, con el objetivo de posibilitar el establecimiento de la vegetación y fauna del suelo y así abreviar la dura etapa inicial de colonización y transformación (Ayala *et al.*, 1989; Munshower, 1994; Vadillo *et al.*, 2000; Salamanca & Camargo, 2002).

Una de las estrategias de recuperación del perfil del suelo es mediante la aplicación

de capas fértiles de suelo, la cual resulta demasiado costosa y solamente es posible aplicarla si el área a tratar es pequeña. Por tal motivo surgen estrategias de mejoramiento artificial del suelo, que comprenden un manejo físico, adición de distintos materiales y sustancias, además de material vivo en forma de cultivos diversos de hongos, bacterias y lombrices, con lo cual se añade sustrato con actividad biológica ya incorporada (Bradshaw, 1984; Salamanca & Camargo, 2002).

Finalmente, en los proyectos de restauración se plantea la revegetalización, con el propósito de restablecer la cobertura vegetal; en ella se emplean diversos biotipos de plantas, desde herbáceos y arbustivos, hasta trepadores y árboles.

2.6 Enmiendas edáficas

La aplicación de materiales a la superficie del suelo antes de o después de la revegetalización, con el propósito de mejorar las cualidades edáficas es considerada una enmienda. En general, las enmiendas proveen un mejor medio para el crecimiento de la vegetación y establecimiento de la fauna al cambiar las condiciones hostiles del área (Munshower, 1994; Hernández, 1996, Bradshaw, 1997; Alcañiz *et al.*, 1998; Curry, 1998; Vadillo *et al.*, 2000). Entre estos cambios se encuentran:

1. Adición de macro o micro nutrientes
2. Incremento de materia orgánica
3. Incremento o disminución del pH (contrarrestan efectos de acidez)
4. Mejoramiento de propiedades hidrológicas (humedad, capacidad de retención de agua)
5. Reducción de la erosión
6. Modificación de la temperatura (contrarrestan efectos de la temperatura)

De acuerdo al tipo de aplicación las enmiendas se pueden clasificar en:

1. De fertilización directa o inorgánica:

La fertilización directa mejora la concentración de los nutrientes en el suelo. Los fertilizantes inorgánicos constituyen una manera fácil de suministrar estos nutrientes, por tanto son un componente esencial para que la restauración del ecosistema tenga éxito; aunque es aconsejable su empleo junto con el aporte de materia orgánica, ya que de esta manera se aumenta la capacidad de retención de nutrientes y se estimula el ciclo de nutrientes. Los fertilizantes más utilizados son del nitrógeno, fósforo y potasio (Munshower, 1994; Vadillo *et al.*, 2000).

2. De fertilización indirecta, orgánica o enmiendas orgánicas:

Se refiere al aporte de materia orgánica, la cual tiene efectos importantes en las características físicas y químicas de las superficies a recuperar. La materia orgánica mejora la capacidad de retención de agua, la capacidad de cambio (en suelos ligeramente o arenosos o pedregosos), la estabilidad superficial, la penetración del agua por alteración de la estructura, disminuye la escorrentía superficial, mejora la germinación y la emergencia de la siembra al aportar nutrientes (Munshower, 1994; Hernández, 1996, Bradshaw, 1997; Curry, 1998; Vadillo *et al.*, 2000; Salamanca & Camargo, 2002)

La materia orgánica puede ser proporcionada por una amplia variedad de fuentes: mulches, abonos (estiércol, purines), compost y biosólidos, además de la tierra vegetal. La elección del sistema dependerá principalmente de las cantidades disponibles en las proximidades (Munshower, 1994; Vadillo *et al.*, 2000).

2.6.1 Biosólidos como fuente de materia orgánica

Los biosólidos son un producto originado después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de aguas residuales. Este material contiene elementos, tales como: nutrientes (N, P, K y elementos traza), materia orgánica y algunos elementos tóxicos (metales pesados, contaminantes orgánicos y

agentes patógenos) (Munshower, 1994; Smith, 1996 En: Barrera *et al.*, 2001; Daguer, 2003).

Debido a su singular combinación de nutrientes y alto contenido de materia orgánica, el biosólido se convierte en un material potencial para ser utilizado como enmienda orgánica (Munshower, 1994; Sort & Alcañiz, 1996). En este sentido, la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (EPA) promueve su uso favorable en la aplicación de terrenos (Daguer, 2003).

En el mundo existen diversos campos o áreas donde se han aprovechado los biosólidos (Daguer, 2003):

- Agrícola y pecuario.
- Silvicultura (plantaciones forestales y viveros)
- Recuperación de suelos pobres en nutrientes
- Adecuación de zonas verdes
- Elaboración de abonos y enmiendas
- Cobertura intermedia o final de rellenos sanitarios
- Biorremediación de suelos contaminados
- Elaboración de materiales para la construcción.

Sin embargo la EPA, restringe la aplicación de los biosólidos de acuerdo a las concentraciones de metales pesados, y organismos patógenos. En este sentido se clasifican los biosólidos en: clase A y clase B. Los de clase A pueden ser usados sin ninguna restricción (cultivos de consumo directo) y los de clase B en recuperación de suelos, plantaciones forestales, cultivos que no se consuman directamente y cobertura de rellenos sanitarios (Daguer, 2003).

2.6.1.1 Normatividad del uso de los biosólidos

Las regulaciones de biosólidos en el mundo tienen varias consideraciones, como las siguientes (Daguer, 2003):

- En Estados Unidos (EEUU) y la Unión Europea (UE) las normativas establecen los límites de las concentraciones de metales pesados que deben poseer los biosólidos, las cuales han sido imitadas en otros países.
- Estados Unidos recomienda calcular las tasas de aplicación de acuerdo al contenido de nutrientes del biosólido y los requerimientos de los cultivos agrícolas.
- En Europa se controla la tasa de aplicación, es decir, la concentración de metales pesados por hectárea. Específicamente, en España se tiene en cuenta los valores límite de metales pesados, acorde con el pH del suelo.

Respecto a la reglamentación de utilizar los biosólidos, en Colombia no se dispone de leyes ni normas, solamente en el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) en la resolución de 1998, se define el término de lodo biológico, pero no se desarrolla el tema y en la resolución 1096 de 2000, se define el término biosólido pero no se reglamenta su gestión (Daguer, 2003).

2.6.2 Efecto de la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica sobre la fauna edáfica

Las investigaciones de biosólidos como enmienda orgánica, se centran en los cambios físicos y químicos del suelo y su uso en la agricultura; prestándole menos atención al efecto que causa en la fauna edáfica.

Se ha concluido que los biosólidos tienen efectos positivos en el suelo, debido a que

mejoran su estructura y pH, incrementan la retención de agua y capacidad de intercambio catiónico, reducen la erosión y la densidad, estabilizan la temperatura de la superficie e incrementan la materia orgánica y nutrientes. Los cambios ocasionados favorecen el establecimiento de la fauna edáfica en suelos degradados, al mejorar el ambiente físico y químico, temperatura y proveer alimento (Munshower, 1994; Sort & Alcañiz, 1996; Sort & Alcañiz, 1999; Alcañiz *et al.*, 1998, Curry, 1998).

Las investigaciones de biosólidos relacionadas con la fauna edáfica, se han dirigido a evaluar el efecto de los metales pesados sobre la fauna, en aspectos de bioacumulación y abundancia; especialmente en grupos taxonómicos como lombrices, colémbolos y ácaros.

En estos trabajos se concluye, que la aplicación de biosólidos incrementan las poblaciones, la biomasa y la diversidad de la fauna, lo cual es atribuido a la transformación de la estructura del hábitat y al incremento de alimento disponible (Al-assiuty *et al.*, 2000; Barrera *et al.*, 2001; Petersen *et al.*, 2003; Minor & Norton, 2004). Sin embargo, puede tener efecto adversos en la abundancia de las poblaciones de algunas especies al cambiar el patrón de distribución de edades (Culliney *et al.*, 1986; Al-assiuty *et al.*, 2000).

En cuanto a bioacumulación, se ha encontrado que los metales pesados presentes en los organismos están por debajo de la concentración de los suelos. Esta acumulación en los organismos depende de la disponibilidad de metales pesados en el suelo, de factores ecofisiológicos y modelos metabólicos de las especies (Larsen, 1996; Barrera *et al.*, 2001).

Sin embargo, son escasos los estudios sobre el efecto de los biosólidos en: 1) otros grupos de fauna edáfica, 2) en terrenos degradados por minería a cielo abierto y 3) la

re-colonización de la fauna (Culliney *et al.*, 1986; Larsen *et al.*, 1996; Adesodun, 2005).

Adicionalmente con la implementación del biosólido, la revegetalización también es favorecida, lo que a su vez contribuye con el establecimiento de la fauna, al generar microclima y al hacer suministro adecuado de hojarasca (Curry, 1998; Sor & Alcañiz, 1996; Alcañiz *et al.*, 1998). Algunas investigaciones de lugares restaurados, concluyen que la recolonización de la fauna edáfica esta correlacionada con el porcentaje de cobertura vegetal, riqueza y diversidad de especies y la cantidad de hojarasca (Majer, 1985; Majer, 1992; Greenslade & Majer, 1993; Majer & Nichols, 1998)

2.6.3 Características de los terrenos mineros para la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica.

En el manual de restauración de actividades extractivas y biosólidos, se recomienda que los terrenos mineros deben presentar ciertas condiciones para la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica (Alcañiz *et al.*, 1996), entre estos se encuentran:

- Se deben evitar aplicaciones en áreas de reserva de acuíferos o de fácil inundación, ya que se pueden lixiviar los contaminantes presentes en los biosólidos.
- Se debe tener en cuenta, la incidencia de los malos olores temporales en las comunidades humanas vecinas al área de aplicación, especialmente en el proceso de manipulación.
- Se debe tener en cuenta la superficie (caminos, accesos) y la geomorfología del terreno, para el transporte de los biosólidos. Además, el tipo de sustrato, ya que en el caso de sustratos ácidos, se facilita la movilidad o el drenaje de algunos contaminantes del biosólido.

- Se deben utilizar en terrenos que tengan deficiencia de sustrato.

En cuanto a las características del biosólido, se recomienda utilizar: 1) aquellos que son de origen doméstico; en caso de emplear de origen industrial, se debe tener en cuenta su composición y realizar un estudio de sus posibilidades de aplicación en el suelo; 2) los obtenidos de procesos de digestión biológica, para que la materia orgánica este bastante estabilizada, disminuyan los malos olores y su excesiva descomposición; 3) que contengan más de un 18% de materia seca – lodos deshidratados, que se comportan como sólidos pastosos y así puedan ser manipulados con la maquinaria habitual de las canteras; 4) que presenten un contenido de materia orgánica que no supere el 70%, ya que es indicio de que no esta suficientemente digeridos y 5) con contenidos de elementos tóxicos conocidos (Alcañiz *et al.*, 1998).

También, se sugiere que los biosólidos no se apliquen directamente a la superficie (sobre rocas o residuos muy pedregosos), ya que se pueden formar compactos terrosos, se pierde mucha de su capacidad fertilizante, y se puede contaminar el terreno y las aguas de drenaje; además que la vegetación que puede crecer en el biosólido es limitada (Munshower, 1994; Alcañiz *et al.*, 1996; Alcañiz *et al.*, 1998).

En este sentido, se utiliza el suelo original (capa fértil o descapote) para mezclarlo con el biosólido; sin embargo en muchas extracciones no se almacena o no se cuenta con el volumen suficiente de este, por lo que se complementa con estériles, que son los materiales residuales de la extracción (Alcañiz *et al.*, 1996; Alcañiz *et al.*, 1998).

Las características que se aconsejan, que debe tener el suelo o el estéril a utilizar son: 1) un porcentaje de tierra fina mayor al 20%; 2) contenido de sales bajo, que no supere los 3dS/m (extracto de pasta saturada), ya que la incorporación de biosólidos supone un aumento temporal de la salinidad del suelo, debido a la fuerte mineralización que sufre la materia orgánica; 3) debe evitarse utilizar tierras o

estériles con excesivas cantidades de arcillas, limos y arenas, ya que no permiten una buena incorporación con los biosólidos; y 4) se debe conocer el pH y 5) el contenido de materia orgánica (Alcañiz *et al.*, 1996; Alcañiz *et al.*, 1998).

Para conocer el volumen de substrato a reponer hay que fijar un espesor entre 20-50 cm, este depende de la topografía, accesibilidad y disponibilidad de tierra o estéril. En la situación de canteras, con terrenos pedregosos se aconseja obtener un grosor de 30-40 cm (Alcañiz *et al.*, 1998).

2.6.3.1 Incorporación o mezcla de los biosólidos y tierra o estéril

Los biosólidos deben permanecer el mínimo tiempo posible sin ser incorporados al suelo o a los estériles. Siempre que sea posible se debe regularizar la superficie del terreno para que el suelo o material enmendado con biosólidos quede bien distribuido; se debe evitar pisarlo o compactarlo con la maquinaria (Alcañiz *et al.*, 1998).

Existen diferentes procedimientos para incorporar o mezclar los biosólidos con el suelo o material (Alcañiz *et al.*, 1998):

1. *Mezcla previa:* es el sistema más utilizado, consiste en mezclar con una pala mecánica la tierra o material y el biosólido. Se dejan amontonados en una pila y se da volteos para homogeneizar la mezcla. De esta manera, la tierra, absorbe el exceso de humedad del biosólido y pasados unos días se puede acabar de mezclar con facilidad y así extenderla al terreno.

2. *Mezcla en lecho de tierra:* consiste en preparar un lecho o una capa uniforme con las tierras que se van a enmendar con los biosólidos. Los camiones descargan los biosólidos encima procurando que queden bien repartidos. La tierra absorbe parte del agua y lixiviados de los lodos, de manera que pasados unos días se puede mezclar

directamente la tierra del lecho con el biosólido. Este procedimiento necesita mas espacio que el anterior y no permite un calculo tan ajustado de la dosis.

3. Aplicación directa y mezcla sobre el terreno: este procedimiento solo se utiliza en aplicaciones parecidas a las agrícolas, sobre terrenos llanos que permitan el paso de remolques esparcidores de biosólidos. El terreno debe ararse a continuación para incorporar los lodos al suelo. No es aconsejable para dosis altas de biosólidos.

2.7 Planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre

La planta de tratamiento de Aguas Residuales El Salitre (Fase I) es la primera con que cuenta el Distrito Capital. Inició sus operaciones en septiembre de 2000 y recibe las aguas residuales domésticas provenientes del alcantarillado del área norte de la ciudad (BAS, 2002).

Esta diseñada para tratar un caudal de $4\text{m}^3/\text{seg}$ equivalente aproximadamente a 1'500.000 habitantes. Realiza un tratamiento primario avanzado por medio del cual se remueve un 40% de la materia orgánica expresada como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y un 60% de los sólidos suspendidos. Adicionalmente, presenta un sistema de tratamiento de lodos (BAS, 2002).

2.7.1 Tratamiento de aguas residuales

1) *Toma de agua y pretratamiento:* El agua residual del alcantarillado ingresa inicialmente a una cámara tranquilizadora provista de un foso de remoción de sólidos gruesos pesados, para pasar luego por un pretratamiento de cribado grueso por medio de rejas (espacio libre entre barrotes 10 cm). Luego del pre-desbaste con las rejas gruesas, se realizan los siguientes procesos: (a) desbaste fino mediante cuatro sistemas de rejillas automáticas (espacio libre entre barrotes 2.50 cm), (b) desarenado (remoción de arenas y otros materiales inertes como vidrio y semillas) y

desengrasado. De aquí el agua es conducida mediante conductos rectangulares hacia dos cámaras de reparto de agua; para distribuir uniformemente los caudales de alimentación a los decantadores primarios.

2) *Decantación primaria:* Ocho tanques (43 m diámetro x 4.0 m altura lateral, c/u) reciben el agua residual por un conducto central vertical. Una pantalla difusora instalada alrededor de este conducto obliga al agua a descender para luego ascender hacia las canaletas recolectoras perimetrales. En este descenso y posterior ascenso se produce el desprendimiento de los sólidos sedimentables que van al fondo del tanque para formar el lodo primario. Los decantadores están dotados de puente barrelosos para raspar el lodo que cae al fondo y concentrarlo en una tolva o bolsillo central, el cual es transportado por medio de las estaciones de bombeo hasta los espesadores donde inician su tratamiento. El tiempo de permanencia del agua en los decantadores es de más o menos 3 horas.

3) *Descarga al río Bogotá:* El agua decantada que se recoge en las canaletas perimetrales es transportada a lo largo de los conductos colectores hasta la estructura de medición para su posterior descarga en el canal Salitre, que desemboca en el río Bogotá.

2.7.2 Tratamiento de lodos

1) *Espesamiento de lodos:* Los espesadores (29m diámetro x 4m altura lateral, c/u) concentran los lodos antes de ser enviados a los digestores. Están equipados con sistemas barrelosos que dirigen los lodos espesados hacia la salida central que se encuentra al fondo del equipo. Los lodos permanecen dentro de los espesadores por un tiempo aproximado de 10 horas. El agua que se retira (agua de escurrimiento) es enviada al final del proceso de pretratamiento. De los casi 7.500 m³ de lodos primarios que llegan a los espesadores salen 1.300 m³ de lodos espesados.

2) *Digestión de lodos*: Tres tanques cerrados (8.500 m³ de capacidad) mantienen el lodo durante 16 - 18 días a 35°C en agitación constante, bajo condiciones anaeróbicas. Diariamente se producen 1300 m³ de lodos digeridos (humedad aprox. 94%), y 15.000 m³/día de biogás. El 30% de biogás se utiliza para la agitación de los digestores y la alimentación del conjunto de calderas. El restante se quema en la tea, con el fin de evitar la salida de gases tóxicos tales como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).

3) *Almacenamiento de los lodos digeridos*: Los lodos digeridos son almacenados en un tanque de 2.700 m³ de volumen útil, equipado con agitadores sumergibles desde donde son extraídos hacia el proceso de deshidratación.

4) *Deshidratación*: Los lodos digeridos son secados para reducir su volumen y facilitar su transporte. Para realizar este proceso, los lodos son enviados desde el tanque de almacenamiento hacia el edificio de deshidratación donde se ubican los filtros de banda. En cinco unidades de filtración se realiza la deshidratación hasta lograr una consistencia semisólida (torta de lodos) con una concentración de sólidos de aproximadamente 35%. La adición de un polímero catiónico antes del proceso de deshidratación ayuda a que se obtenga un lodo con estas características. Diariamente son producidas 135 toneladas de biosólido.

2.7.3 Caracterización de los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre (Bogotá)

La caracterización de biosólidos de la PTAR El Salitre se basa en el análisis de parámetros físicos, químicos, biológicos y agrológicos; con el propósito de establecer sus condiciones de manejabilidad (características cualitativas y físicas), el cumplimiento de concentraciones límites (normas sobre metales pesados) y sus características desde el punto de vista agrológico (nutrientes, pH, etc). Estas

características se han mantenido invariables durante el tiempo transcurrido de la operación de la planta El Salitre (BAS, 2002).

2.7.3.1 Características Cualitativas

Las principales características cualitativas de los biosólidos son las siguientes (BAS, 2002):

- Consistencia: semisólida blanda, no fluida tipo plastilina.
- Apariencia: tierra negra esponjosa
- Olor: no ofensivo, tipo humus.
- Color: fresco: negro intenso, luego de secado: café grisáceo

2.7.3.2 Características Físicas

El seguimiento que realiza Bogotana de Aguas y Saneamiento (BAS) a los biosólidos del PTAR el Salitre, se centra en el monitoreo de la humedad con el objetivo de mantenerla en el 70% (+/- 5%), de acuerdo a lo estipulado por BAS y Proactiva (operador del relleno Doña Juana). Además, el control integral de la gestión de biosólidos considera el seguimiento a su densidad, producción y el índice unitario por m³ de agua tratada (Tabla 1) (BAS, 2002).

Tabla 1. Características físicas de los biosólidos de la planta El Salitre

Parámetro	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo
Producción Media (ton/día)	135	158	120
Kg biosólido/m ³ de agua tratada	0.40	0.46	0.35
Humedad (%)	66.6	68.9	64.4
Densidad Real (ton/m ³)	1.06	1.16	1.00

2.7.3.3 Características Químicas y Biológicas

La caracterización química y biológica de los biosólidos de la planta El Salitre se basa en los parámetros definidos por las normas de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) para el aprovechamiento agrícola de los mismos (BAS, 2002).

Bajo estos parámetros los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales el Salitre, se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles, según la norma 40 CFR parte 503 de la USEPA (Tabla 2) (BAS, 2002).

En cuanto a su composición biológica, el biosólido presenta una concentración de coliformes fecales típicas de un biosólido clase B, debido a que proceden de una digestión anaeróbica mesofílica; ésta concentración limita su aplicación en cultivos que se consuman directamente sin ningún procesamiento y se sugiere su utilización en recuperación de suelos, plantaciones forestales y cultivos que no se consuman directamente y cobertura de rellenos sanitarios. Sin embargo, con respecto a los huevos de helminto, el biosólido tiene características de un biosólido clase A, esta clase de biosólido no presenta ninguna restricción (Tabla 2) (BAS, 2002).

2.7.3.4 Características Agrológicas

Teniendo en cuenta la aptitud de los biosólidos para propósitos agrológicos, en la PTAR El Salitre se realizan análisis de diferentes parámetros que permiten establecer su valor como sustrato para crecimiento de biomasa vegetal (Tabla 3) (BAS, 2002).

Respecto al contenido de nutrientes, el biosólido presenta concentraciones altas de los dos nutrientes más importantes para las plantas (nitrógeno y fósforo), los cuales favorecen el correcto desarrollo de los cultivos. Altos contenidos de nitrógeno pueden ayudar a conservar e incluso aumentar el nivel de materia orgánica, también

contribuyen a mantener una buena estructura de los suelos, de igual manera la materia orgánica aumenta la capacidad de intercambio catiónico con lo cual se reduce la pérdida por filtración de elementos esenciales para el desarrollo de las plantas (BAS, 2002).

Tabla 2. Características químicas y biológicas de los biosólidos de la PTAR El Salitre según Norma EPA 503-13

Parámetro (mg/kg)* *En base seca	Promedio (mg/kg)	Valor mínimo (mg/kg)	Valor máximo (mg/kg)	Límites máximos permisibles según norma EPA 503-13	Biosólido de excelente calidad según norma EPA 503-13
Arsénico	0.24	0.01	1.75	75	41
Cadmio	4.9	1.53	8.96	85	39
Cobre	140.71	101	203.9	4300	1500
Cromo	61.53	35.08	78.31	-	-
Mercurio	1.27	0.01	18.69	57	17
Níquel	36.82	26.52	98.55	420	420
Plomo	120.32	81.72	227.3	840	300
Selenio	0.12	0.01	0.9	100	100
Zinc	1024.63	208.8	1866	7500	2800
Coliformes totales (NMP/g)	6.5E+06	-	-	-	-
Coliformes fecales (NMP/g)	1.7E+05			Clase B < 2 x 10 ⁶ Clase A < 1000	
Huevos de helminto	<1			<1 (Clase A)	
Huevos/ 4g				>1 (Clase B)	

Tabla. 3 Parámetros agrológicos del biosólido de la PTAR El Salitre

Parámetro	Unidad	Valor
Calcio	(meq/100g)	29,9
Carbono orgánico	(%)	9,8
CIC	(meq/100g)	38,9
Fósforo	(mg/Kg)	31.945
Magnesio	(meq/100g)	1,7
Nitratos	(mg/Kg)	413
Nitritos	(mg/Kg)	5
Nitrógeno Orgánico	(mg/Kg)	15.500
Nitrógeno Total	(mg/Kg)	20.131
PH	(unidades)	7,84
Potasio	(meq/100g)	0,82
Sodio	(meq/100g)	0,74
Sólidos Totales	(mg/Kg)	342.699
Sólidos Volátiles	(mg/Kg)	167.660

3. Formulación del problema y justificación

3.1 Formulación del problema

La industria extractiva a cielo abierto desarrollada a lo largo de los Cerros Orientales de Bogotá, ha generado un severo daño en los ecosistemas existentes, al eliminar los compartimentos suelo, vegetación y fauna.

Consecuencia de la eliminación del compartimento suelo, los terrenos disturbados presentan bajos contenidos de materia orgánica y nutrientes, alta pedregosidad, fluctuaciones drásticas de temperatura y humedad, y pH extremadamente ácido; condiciones que limitan y retrasan los procesos sucesionales de la vegetación y la

fauna.. Adicionalmente al estar expuestos a condiciones climáticas (viento, lluvia) se inician procesos erosivos, que hacen más lenta la recuperación del ecosistema.

Por esta razón, es necesario en los terrenos implementar una enmienda orgánica que proporcione materia orgánica y nutrientes (alimento), contrarreste los efectos de la acidez, mejore la retención de agua y controle la erosión; con el propósito de acelerar el proceso de colonización de la vegetación y la fauna.

En este contexto, los biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales el Salitre, que se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica y nutrientes, pueden ser una buena alternativa de enmienda orgánica para la restauración de las canteras del Distrito Capital. Sin embargo, debido al escaso conocimiento en Colombia del comportamiento de los biosólidos en terrenos degradados por minería a cielo abierto, el efecto de estos en el suelo, fauna y vegetación y la posible contaminación por los metales pesados y patógenos, es necesario hacer investigaciones antes de la aplicación, para garantizar el uso adecuado de estos subproductos.

3.2. Pregunta de investigación

¿Cómo afecta la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica el restablecimiento de las condiciones edáficas, en términos del repoblamiento de la macrofauna edáfica en la Cantera Soratama?

3.3 Justificación de la investigación

Los Cerros Orientales de Bogotá fueron declarados Reserva Forestal Protectora (Resolución 76/77) por el desaparecido Inderena debido a las funciones importantes que cumplen, ya que en ellos nace una buena cantidad de riachuelos, quebradas y ríos; alberga en los relictos de bosque nativo una buena diversidad de vegetación y

fauna nativa; son el componente visual de mayor importancia y actúan como muralla protectora de la ciudad en el costado oriental.

A pesar de ser declarados Reserva Forestal Protectora, en algunos de sus sectores se presenta un alto deterioro, consecuencia, de las actividades extractivas a cielo abierto que se han desarrollado en respuesta a la alta demanda de materiales por parte del sector de la construcción.

En este sentido y acorde con el Plan de Ordenamiento Territorial de 2000 (artículo 343), en los terrenos de dichos Cerros, donde se han realizado explotaciones a cielo abierto, se deben implementar procesos de restauración ecológica, morfológica y paisajística que permitan el restablecimiento de las funciones, la estructura y los servicios ambientales perdidos.

Como consecuencia de la extracción de materiales a cielo abierto los compartimentos vegetación, fauna y suelo se perdieron, y en la actualidad los terrenos se caracterizan por ser pedregosos, pobres en materia orgánica y nutrientes; situación que motiva la utilización de enmiendas orgánicas para que actúen como sustrato y permitan un desarrollo acelerado de la sucesión.

De acuerdo con lo anterior, se visualizó la alternativa de utilizar los biosólidos producidos en la planta de Tratamiento de Aguas Residuales el Salitre, como enmienda orgánica para la restauración de las canteras del Distrito por su alto contenido de materia orgánica y nutrientes como fósforo y nitrógeno. Sin embargo, es de advertir que dichos subproductos al provenir de la depuración de aguas residuales, contienen algún tipo de contaminantes (metales pesados y patógenos) que podrían causar problemas a las especies. Aspecto que debe ser manejado antes de aplicarse.

En el caso de la macrofauna edáfica al alimentarse de materia orgánica y cumplir

funciones importantes en la mineralización de la misma (fragmentación y mezcla con material inorgánico), su proceso de repoblamiento puede ser acelerado al aplicar biosólidos, ya que estos neutralizan las condiciones físicas y químicas de los terrenos y aportan alimento; sin embargo, la macrofauna al tener un contacto directo con el biosólido y al ser más sensitiva que la meso y microfauna a los cambios ambientales (Lavelle *et al.*, 1995), puede verse afectada en su abundancia y diversidad, si se tiene en cuenta que contienen metales pesados.

La problemática descrita manifiesta la necesidad de dar inicio a experiencias piloto que permitan probar si los biosólidos sirven como enmienda orgánica para la restauración de canteras. En este sentido, el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente- DAMA financia la presente investigación y dispuso para la realización de la misma la Cantera Soratama, que se encuentra bajo su administración y manejo.

De esta manera, el objetivo de esta investigación es aportar conocimiento sobre el comportamiento de los biosólidos como enmienda orgánica, para definir si pueden ser usados o no en la restauración de suelos afectados por industria extractiva y su efecto en el repoblamiento de la fauna edáfica.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de los biosólidos generados en la Planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre de Bogotá como enmienda orgánica sobre el repoblamiento de la macrofauna edáfica en la cantera Soratama.

4.2 Objetivos Específicos

- Reconocer la macrofauna edáfica potencialmente colonizadora de los diferentes tratamientos implementados en la cantera Soratama.
- Describir el cambio de la macrofauna edáfica que coloniza los diferentes tratamientos a través del tiempo.
- Identificar el tratamiento que más favorezca el repoblamiento de la macrofauna edáfica, como opción de enmienda orgánica para la recuperación de suelos afectados por la industria extractiva a cielo abierto.

5. Marco Geográfico de la cantera

5.1 Localidad de Usaquén

La localidad de Usaquén esta ubicada en el sector nor-oriental de Bogotá, sus límites son: al sur con la calle 100, al occidente con el eje principal de la autopista norte y al norte y oriente con el límite del Distrito Capital (Delgado & Mejía, 2000).

5.1.1 Geología

Específicamente en el área afectada por actividad extractiva, se identifican principalmente las unidades geológicas del Grupo Guadalupe, consideradas desde hace muchos años, como aptas para la producción de diferentes materiales de construcción. De los bancos de areniscas de diferentes características de dureza, color y tamaño se extrae la arena de peña y arena de trituración y grava. Las interestratificaciones de limolitas, lodolitas y arcillolitas son utilizadas como material de recebo para afirmados. La piedra o bloque de arenisca también es usado en construcción (Delgado & Mejía, 2000).

Las principales unidades de rocas explotadas corresponden a las cuatro formaciones del Grupo Guadalupe: Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca de Labor y Arenisca Tierna (Delgado & Mejía, 2000).

5.1.2 Geomorfología

En el área de la localidad de Usaquén se reconocen dos unidades geomorfológicas claramente diferenciables (Delgado & Mejía, 2000):

1) Zona plana a suavemente ondulada: Constituida por una llanura cuaternaria de origen fluviolacustre, cuyos sectores planos más bajos están formados por depósitos aluviales del río Bogotá.

2) Zona montañosa de formaciones sedimentarias compuesta de rocas arenosas, duras y resistentes a la erosión y rocas arcillosas con edades desde el cretáceo superior hasta el terciario.

5.1.3 Suelos

Los suelos en el área de la localidad de Usaquén, se han clasificado en dos grandes grupos, relacionados con la geomorfología de la zona (Delgado & Mejía, 2000).

Un grupo ubicado en la zona plana, hacia los sectores norte y nor-occidental de la localidad, esta constituida por importantes depósitos de las series Tibaitatá y Bogotá (Delgado & Mejía, 2000).

Los suelos de la serie Tibaitatá presentan drenajes moderados, diferentes espesores, desde poco profundos hasta profundos y ligeramente ácidos. Los suelos de la serie

Bogotá presentan drenajes deficientes material parental arcillosos y ligeramente ácidos (Delgado & Mejía, 2000).

El otro grupo de suelos presentes en la zona montañosa, lo componen los suelos de la serie Monserrate, Cabrera- Cruz Verde y Bojacá (Delgado & Mejía, 2000).

Las series Monserrate y Cabrera – Cruz Verde, se presentan en las zonas mas escarpadas y pendientes (30-75%). Son los suelos derivados principalmente de las areniscas, son bastantes superficiales, de baja fertilidad, ácidos y con altas concentraciones de aluminio. La serie Bojacá, se presenta en áreas con precipitaciones muy regulares y clima seco. El material parental esta conformado por arcillas, por tanto presenta horizontes argílicos y sódicos. Son superficiales, bien drenados y presentan una delgada capa vegetal (Delgado & Mejía, 2000).

Por otra parte, los suelos del área intervenida por la minería en Usaquén son básicamente de dos tipos (Delgado & Mejía, 2000):

1) Suelos de Coluvios: En las partes medias y bajas, con predominio en los sectores occidentales del área. Fisiográficamente corresponden a pequeños valles o áreas de depresión a una altitud poco mayor al piso de la Sabana de Bogotá, presentando bloques de areniscas y limolita de diferente tamaño.

2) Suelos de Colinas: Entre las cotas 2700-3100 m.s.n.m en el área se localizan en la parte más oriental, su espesor es variable y presenta bloques de arenisca de diferente tamaño distribuidos sobre su superficie. Estos suelos utilizados para la ganadería y agricultura.

5.1.4 Sistema Hídrico

Las corrientes superficiales de los Cerros Nor- Orientales son típicas quebradas de alta montaña, de áreas reducidas con un promedio de 2 Km² con pendientes pronunciadas que oscilan entre el 12% y el 50%, de corto trayecto y cuyo nacimiento esta en la zona del subpáramo o páramo húmedo de la vertiente occidental de la cordillera oriental (Delgado & Mejía, 2000).

Para la zona montañosa de Usaquéen corre gran número de corrientes, dentro de las cuales las más importantes son: las quebradas Torca, la Floresta, la Cita, San Cristóbal, Delicias del Carmen, Contador, la Chorrera, el Canal Callejas de la calle 117, más numerosas escorrentías como la afluente de la quebrada San Cristóbal (Delgado & Mejía, 2000).

5.1.5 Clima

El clima de Usaquéen es frío, subhúmedo, con una clara tendencia a la sequía, la cual aumenta en dirección sur y sur occidente. Los vientos son de baja intensidad, sin embargo son frecuentes las heladas (Delgado & Mejía, 2000).

En cuanto a la precipitación según la estación la Torca (Cr.7 con 220) se registran rangos promedio de 1220 mm. Las precipitaciones son bastantes significativas en cuanto a duración e intensidad de las lluvias, con una variabilidad interanual alta y régimen bimodal, con períodos más lluviosos entre septiembre y noviembre y períodos más secos de diciembre a febrero (Delgado & Mejía, 2000).

La humedad relativa promedio es de 78%, en los meses lluviosos oscila entre 84%-87% y en los meses secos entre 68%-74%. 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 secos se registran variaciones de temperatura muy altas con

valores máximos en el día de 27°C y mínimos en la madrugada 4°C (Delgado & Mejía, 2000).

5.1.6 Flora

La vegetación de la localidad esta determinada por dos zonas de vida según los pisos altitudinales y la zonificación bioclimática de Holgridge (1979) (Delgado & Mejía, 2000):

1) Zona de Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB): Esta ubicada en el piso térmico de tierra fría con precipitación promedio de 1160 mm/año, y temperatura promedio de 13°C, hasta una altura de 2800 m.s.n.m.

2) Zona de Bosque Muy Húmedo Montano (bmh-M): Ubicada en el piso térmico de transición a páramo o subpáramo con temperaturas entre 6 y 12°C. Con fenómenos de heladas y vientos, se presenta desde los 2800 m.s.n.m y se manifiesta en el terreno por aparición de vegetación de páramo (frailejón y escobo).

En la localidad las asociaciones vegetales más importantes son: chuscal, olival, encenillal, frailejonal y pajonal (Delgado & Mejía, 2000).

En la zona de extracción minera, la vegetación existente corresponde a arbustiva de tipo secundario con muy pocas especies pertenecientes al paisaje original (Delgado & Mejía, 2000).

En general, la vegetación de Usaquén ha sufrido profundas alteraciones, de tal manera que los relictos de vegetación autóctona que se pueden encontrar, se caracterizan por el predominio de especies pioneras de crecimiento rápido como el chusque, bejuco y las gramíneas de gran tamaño.

5.1.7 Fauna

Los grupos más abundantes e importantes son los de las aves, pequeños mamíferos e insectos. La mayor parte de estas especies habitan en los bosques y rastrojales de los alrededores de la ciudad, encontrando en la montaña un hábitat más apropiado para su resguardo y protección (Delgado & Mejía, 2000).

Las especies más afectadas son los mamíferos propios de alta montaña, en especial los grupos insectívoros y las especies de gran tamaño como: el oso de anteojos, el venado de páramo, tigrillo, jaguar, puma y zorro (Delgado & Mejía, 2000).

Otro grupo bastante vulnerable lo constituyen las especies de herpetofauna, aunque la reducción paulatina de su hábitat es una creciente restricción a su desarrollo y reproducción. Dentro de este grupo las especies más amenazadas son los anfibios y los lagartos arborícolas de alta montaña (Delgado & Mejía, 2000).

5.2 Cantera Soratama

La cantera Soratama se ubica en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá dentro de la localidad de Usaquén, entre las cotas 2810 y 2930 m.s.n.m, sus coordenadas son 106900 E y 116000 N y cuenta con un área aproximada de 5.8 ha (Correa & Correa, 2003).

El acceso a la cantera se hace por la carrera séptima con calle 167 por una vía pavimentada de pendientes altas con curvas pronunciadas que atraviesa el barrio Soratama hasta la cantera, con una longitud de 1900 m (Correa & Correa, 2003).

La explotación de la cantera comenzó en el año 1965 y su cierre se dio en el año 1995; en el año 1998 el Distrito adquiere la administración de este predio; es decir, que la cantera presenta 10 años de abandono (Correa & Correa, 2003).

De acuerdo con las condiciones de heterogeneidad que presenta la cantera, debido al proceso de explotación se han diferenciado tres zonas (Anexo 1) (Sánchez *et al.*, 2003):

1) Zona de depósito de estériles

La zona de depósito de estériles es conocida, por ser el antiguo lugar de vertimiento de escombros provenientes de la labor de extracción en la cantera. Esta zona se encuentra en la parte baja de la cantera, entre las cotas 2810 y 2845 m.s.n.m encontrándose la cota más baja en límites con el barrio Soratama (Figura 1).

Esta zona presenta geoformas de relieve suave a moderado, la pendiente oscila entre los 8°-15° aproximadamente, con taludes laterales de pendientes altas en las áreas conformadas por escombros de excavación y botaderos. Los suelos son de textura Franca- Arenosa con baja capacidad de retención de agua, presenta un pH fuertemente ácido (5.4) lo que causa la solubilidad de muchos nutrientes que son lixiviados por el agua y la deficiencia de elementos como Magnesio y Boro.

El contenido de materia orgánica es bajo (1.72%) con bajos contenidos de nitrógeno (0.08%); la relación Carbono- Nitrógeno (13.75%) es considerada de baja a media lo que determina la disminución en el número de microorganismos en el suelo, necesarios para el reciclaje de nutrientes.

La vegetación presente se caracteriza por ser de ecosistemas de páramo y subpáramo como la espadilla (*Orthrosantus chimboracensis*), el chite o escobo (*Hypericum juniperinum*), la paja de páramo (*Calamagrostis sp*), el laurel hojipequeño (*Myrica parvifolia*) y la uva de anís (*Cavendishia cordifolia*) entre otras, y unos pastos no nativos muy dominantes como el quicuyo (*Pennisetum clandestinum*) y la falsa poa (*Olcus lanatus*).



Figura 1. Panorámica de la zona de depósito de estériles.

2) Zona de relictos de bosque altoandino

Esta zona se encuentra ubicada en la parte alta de la cantera entre las cotas 2900-2920 m.s.n.m. Se caracteriza por la presencia de una cobertura vegetal nativa y desde el punto de vista climático se encuentra influenciada por fuertes vientos, alta radiación solar e inestabilidad del terreno en la parte baja, como consecuencia de la proximidad a la cornisa de la cantera. Las pendientes varían entre 10° en la ladera y 20° cerca de los escarpes de roca (Figura 2).



Figura 2. Panorámica de la zona de relicto de bosque altoandino, donde se observa vegetación nativa.

Esta área presenta suelos con textura Arenosa- Franca, el pH es fuertemente ácido (4.9), volviendo más solubles la mayoría de los nutrientes del suelo, los cuales pueden ser lixiviados fácilmente. Presenta un contenido de materia orgánica medio (5.17%) y se observa gran cantidad de hojarasca al interior del bosque. El porcentaje de nitrógeno (0.23%), se acerca al valor medio establecido.

Es un relicto de vegetación arbórea y arbustivas de bajo porte, las especies arbustivas más comunes son la uva de anís (*Cavendishia cordifolia*) y el blanquillo (*Eupatorium angustifolium*) y las herbáceas el zarcillejo (*Siphocampilus columnae*).

3) Zona de patios

La zona de patios se encuentra ubicada en la parte central de la cantera entre las cotas 2850- 2860 m.s.n.m, se caracteriza por presentar una topografía drásticamente intervenida, al ser el área de extracción de material.

Presenta dos zonas claramente diferenciables; la primera ubicada en la parte oriental que se caracteriza por presentar ausencia total del suelo debido al retiro de todos los horizontes, sin embargo, esta área no fue explotada. El substrato actual es de textura arenosa, con un pH de 5.4 y un porcentaje de materia orgánica de 0.05 (Figura 3a)

La vegetación en este sitio es incipiente pero contiene varias especies comunes de páramo como: la paja de páramo (*Calamagrostis sp*), la espadilla (*Orthrosantus chimboracensis*) y la uva de anís (*Cavendishia cordifolia*).

La segunda zona se encuentra en la parte occidental donde se presenta una acumulación de rocas de gran tamaño, las cuales propician una diferenciación microclimática que permite el establecimiento de varias especies vegetales como: la falsa poa (*Holcus lanatus*), el pasto de olor (*Anthoxanthum odoratum*) y la paja de páramo (*Calamagrostis sp*). El substrato es de textura arenosa y presenta un pH de 5.0 y un porcentaje de materia orgánica de 0.17 (Figura 3b).

Adicionalmente, se describe el área adyacente a la cantera que presenta menor intervención antrópica:

4) Zona de bosque adyacente a la cantera

Este bosque esta ubicado en el costado nororiental de la cantera, a una altura entre 2794-2800 m.s.n.m. El suelo presenta un pH ácido de 4.3 y un porcentaje de materia orgánica de 23.79%.



a)



b)

Figura 3. Panorámica de la zona de patios a) parte oriental, donde se observa la ausencia de suelo y la escasa de vegetación y b) parte occidental, donde se observa acumulación de rocas.

Es un bosque semiabierto con vegetación de porte alto se desarrolla sobre pendientes muy fuertes desde 32° hasta 65°. Las especies arbóreas más comunes son: una especie de tuno (*Miconia sp*), el gaque o cucharo (*Clusia multiflora*) y el encenillo (*Weinmannia tomentosa*), y entre las especies herbáceas se encuentran varios helechos y *Peperomia sp*, entre otras (Figura 4).



Figura 4. Zona de bosque adyacente a la cantera, donde se observa vegetación de porte alto.

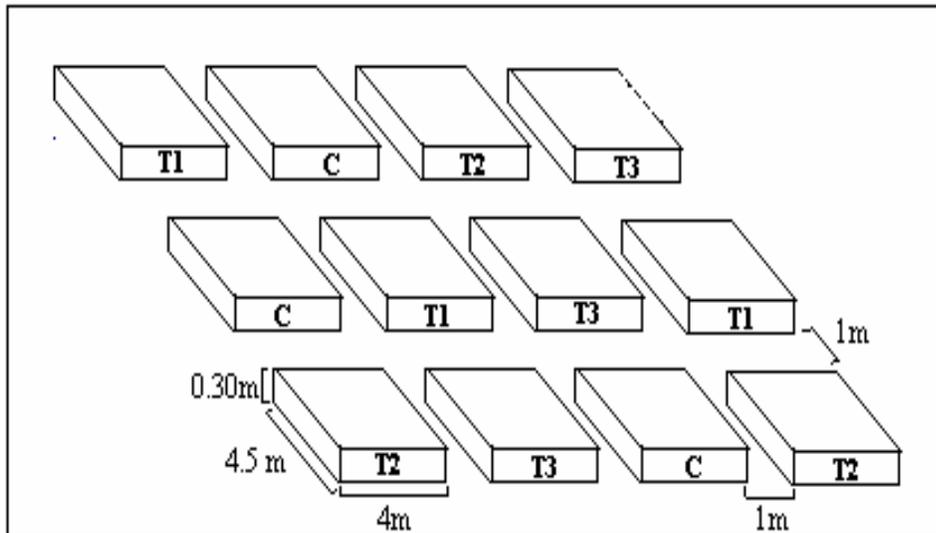
6. Materiales y Métodos

6.1 Diseño experimental

La investigación se desarrolló en la cantera Soratama en la zona denominada depósito de estériles en un área de 400 m², durante diciembre de 2003 y septiembre de 2004 (Figura 5a).



a)



b)

Figura 5. Diseño experimental a) localizado en la zona depósito de estériles de la cantera Soratama y b) Disposición aleatoria de los tratamientos y control.

Los tratamientos variaron en la proporción de biosólidos de la siguiente manera: el control (C) con ausencia de biosólidos, el tratamiento 1 (T1) con una proporción de

1 biosólidos por 8 estériles (1:8), tratamiento 2 (T2) con una proporción (1:4) y el tratamiento 3 (T3) con una proporción (1:2).

El diseño experimental fue completamente aleatorizado, constituido por cuatro tratamientos cada uno con tres repeticiones, dispuestos en parcelas de 18 m² (4.50m x 4m) por una altura de 30 cm. Entre una parcela y otra se dejó una distancia de 1 metro y en medio de esta distancia se realizó una zanja con el propósito de evitar las mezclas de materiales entre tratamientos (Fig 5b).

6.1.1 Adecuación del área experimental

Para ubicar el diseño experimental en el área, fue necesario ejecutar las siguientes actividades:

1. Adecuación de una vía de acceso: para el paso de la maquinaria (bobcat y volquetas).
2. Retiro de la vegetación en pie de manera manual (Figura 6a).
3. Construcción de empalizada para nivelación (Figura 6b y 7a y b).
4. Nivelación del terreno de manera manual y por medio de la utilización del bobcat, para dejar el área lo más homogénea posible para aplicar las mezclas al substrato (Figura 8a).
5. Delimitación del área de las parcelas experimentales con estacas (Figura 8a).
6. Encerramiento del terreno con alambre de púa para evitar el daño por animales y personas (Figura 8b)



a)



b)

Figura 6. Área experimental: a) Retiro de la vegetación presente de manera manual y b) Desniveles que se presentaban en el terreno después de retirar la vegetación.

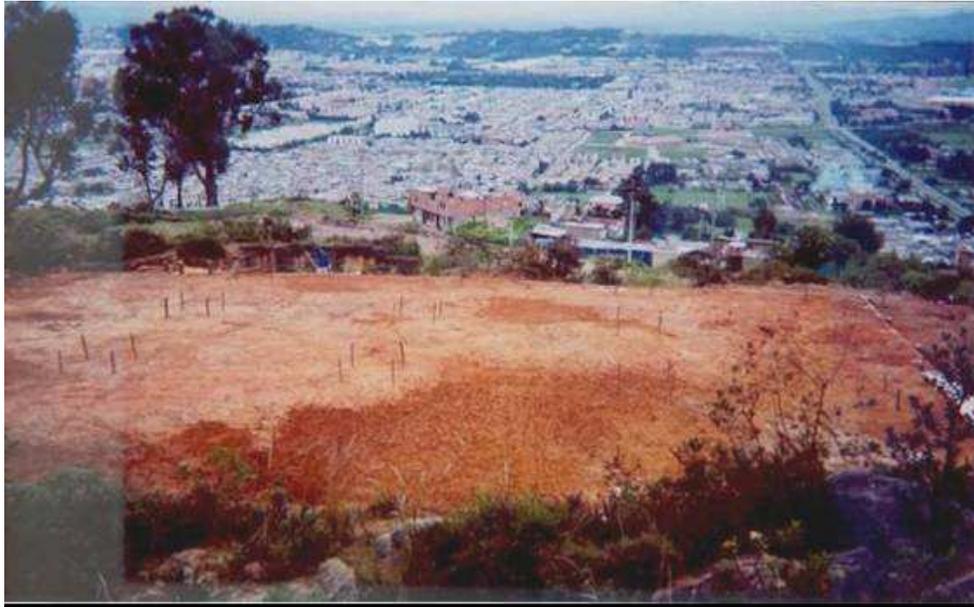


a)



b)

Figura 7. Área experimental: a y b) Empalizada construida en la parte norte y occidental del terreno.



a)



b)

Figura 8. Área experimental: a) Nivelación del terreno, se observa la delimitación de parcelas con estacas y b) Encercamiento del área experimental con alambre de púa.

6.1.2 Procedimiento para las mezclas de biosólidos y estéril

Las mezclas de los volúmenes necesarios de biosólidos y estériles para cada tratamiento se realizaron a través de un bobcat en la zona de patios de la cantera, lugar con el espacio suficiente para la realización de las mezclas. En esta zona estaban almacenados los estériles de la cantera y fue donde se depositaron los biosólidos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales el Salitre para las mezclas respectivas.

El procedimiento utilizado consistió en mezclar con la pala mecánica del bobcat el estéril y el biosólido. Luego de la realización de las mezclas se dejaron amontonados en pila y se les dio volteos para homogeneizar las mezclas (Figura 9) (Alcañiz *et al.*, 1998)



Figura 9. Homogenización de las mezclas de biosólidos y estériles utilizando la pala mecánica del bobcat.

Posteriormente, las mezclas fueron transportadas en volquetas a la zona del diseño experimental, donde fue localizado tratamiento por tratamiento y marcados con una lámina de aluminio (Figura 10)



Figura 10. Mezclas transportadas de la zona de patios al área experimental por medio de volquetas.

6.2 Métodos

6.2.1 Primer objetivo

6.2.1.1 Fase de Campo

Para identificar la fauna edáfica potencialmente colonizadora del área experimental, se realizó un muestreo en dos zonas de la cantera Soratama 1) Zona de depósito de estériles (Z1) y 2) Zona de relicto de bosque altoandino (Z2). Adicionalmente, se hizo un muestreo en la zona bosque adyacente a la cantera (Z3). La zona 1 fue escogida por ser la más cercana al área experimental, la zona 2 por ser la menos

alterada por la extracción de materiales y la zona 3 por ser el área colindante de la cantera que presenta menor intervención antrópica.

En cada sitio se escogieron de manera aleatoria cinco puntos de muestreo, donde se realizaron monolitos equivalentes cada uno a un volumen de suelo de 20 cm x 20 cm x 30 cm divididos en dos profundidades de 0 a 15 y 15 a 30 cm (Anderson & Ingram, 1993 En: Brown *et al.*, 2001). Este suelo se transportó al laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana en bolsas plásticas debidamente selladas y etiquetadas, para su respectivo análisis.

6.2.1.2 Fase laboratorio

La extracción de la macrofauna de las muestras de suelo se realizó manualmente (Nelson, 1962 En: Chamorro, 1990), en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana. Los Oligoquetos (lombrices de tierra y enchytreidos) colectados se preservaron en formalina al 4% y la artropofauna fue preservada en alcohol al 70%.

La determinación taxonómica del material se realizó hasta familia con claves taxonómicas y la ayuda de especialistas (Kaston, 1978; Borror *et al.*, 1992; Fernández *et al.*, 1996; Schoeman & Jocqué, 1997; Lawrence *et al.*, 1999; Foddai *et al.*, 2002, Hoffman *et al.*, 2002; Schileyko *et al.*, 2002)

6.2.2 Segundo objetivo y tercer objetivo

6.2.2.1 Fase Campo

Para describir el cambio de la macrofauna edáfica que coloniza los tratamientos y su distribución en el perfil del suelo, se realizaron cuatro muestreos: el primero una vez fue montado el diseño experimental (M1), el segundo (M2) a los tres meses, el tercero (M3) a los 6 meses y el cuarto (M4) a los nueve meses.

En cada muestreo se empleó el método recomendado por Tropical Soil Biology and Fertility Programme (TSBF) (Anderson & Ingram, 1993 En: Brown *et al.*, 2001) con algunas modificaciones. En cada parcela se escogieron aleatoriamente 3 puntos, para realizar monolitos de 20 cm x 20 cm x 30 cm divididos en 2 profundidades: superficial de 0 a 15 cm y profundo de 15 a 30 cm, el suelo fue depositado, igualmente en bolsas de plástico etiquetadas y selladas para transportarlas al laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana (Figura 11). Este método de muestreo es diseñado especialmente para coleccionar animales hipogeos y estados larvarios (Sutherland, 1996).

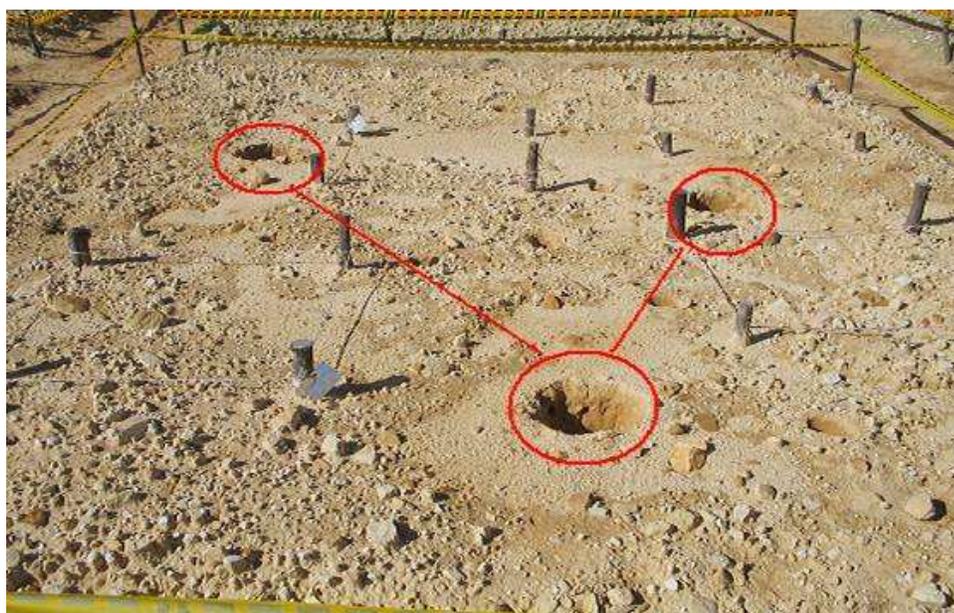


Figura 11. Monolitos de 20 cm x 20 cm x 30 cm realizados en los tratamientos para coleccionar la macrofauna edáfica colonizadora.

Para evitar que los tratamientos fueran disturbados durante los muestreos (compactación y pérdida de la vegetación por pisadas), se utilizó una banca de madera que atravesaba las parcelas para realizar los monolitos (Figura 12).



Figura 12. Banca de madera utilizada en los muestreos para realizar los monolitos.

En el cuarto muestreo, además de los monolitos realizados en cada parcela se colocaron 5 trampas pitfall distribuidas en forma de cruz durante dos días para capturar la macrofauna epigea colonizadora. Estas trampas consisten en mezclar en un vaso plástico 250 ml de agua y jabón, se entierran a ras de la superficie; el jabón es empleado para eliminar la tensión superficial (Sutherland, 1996). Las muestras fueron depositadas en envases plásticos para transportarlas al laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana. Esta técnica solo se realizó en el último muestreo, debido al desarrollo presentado por la vegetación que favorece el establecimiento de la fauna epigea.

6.2.2.2 Fase Laboratorio

La extracción de la macrofauna de cada muestra se realizó de manera manual (Nelson, 1962 En: Chamorro, 1990). Los organismos extraídos, en el caso de los oligoquetos (enchytreidos) fueron preservados en formalina al 4%, mientras que la artropofauna fue en alcohol al 70%. La determinación taxonómica se realizó hasta familia con diferentes claves taxonómicas (Kaston, 1978; Borrór *et al.*, 1992;

Fernández *et al.*, 1996; Schoeman & Jocqué, 1997; Lawrence *et al.*, 1999; Foddai *et al.*, 2002, Hoffman *et al.*, 2002; Schileyko *et al.*, 2002).

7. Análisis de Información

7.1 Composición de la macrofauna edáfica

Fue realizado un listado de los órdenes, familias y morfoespecies de la macrofauna edáfica colectada de las dos áreas de la cantera próximas a las parcelas y del relicto de bosque adyacente. Dicho listado se realizó también para los grupos de macrofauna colonizadora de los tratamientos.

7.2 Riqueza

La riqueza se expresa como el número de especies de una comunidad, en este caso morfoespecies, que son taxas separados por diferencias morfológicas (Oliver & Beattie, 1996). Cada morfoespecie fue codificada con una letra y un número.

Para describir el cambio de la macrofauna edáfica en cada uno de los tratamientos (mezclas de biosólido y estéril), se aplicaron los índices de diversidad de Shannon, de equidad y de dominancia de Simpson para los individuos adultos y estados inmaduros colectados de cada tratamiento en los diferentes muestreos.

7.3 Índice de diversidad de Shannon

El índice de Shannon como estimador de la diversidad es afectado por el número de especies y su equidad. Asume que todas las especies son colectadas al azar y están representadas en la muestra. Su valor usualmente se encuentra entre 1.5 y 3.5 (Magurran, 1989; Ramírez, 1999)

La aplicación de logaritmos en su fórmula reduce el efecto de las especies más abundantes lo que lo constituye en un buen índice de diversidad (Ramírez, 1999) y se calcula así:

$$H' = -\sum p_i \ln p_i$$

p_i = proporción de individuos encontrados en la i-ésima
 \ln = logaritmo natural.

7.4 Índice de equidad

La equidad de Shannon (E) tiene un rango entre 0 y 1. El valor es 0 cuando existe dominancia total de una especie y 1 cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos (Magurran, 1989).

$$E = H' / H_{\text{máx.}} = H' / \ln S$$

S = número de especies de la muestra

7.5 Índice de Simpson

Es conocido como una medida de concentración y refiere a la probabilidad de extraer individuos de una misma especie. Se utiliza como medida de dominancia, dada su marcada dependencia de las especies más abundantes (Ramírez, 1999).

Se calcula así:

$$D = \frac{\sum (n_i(n_i-1))}{(N(N-1))}$$

n_i = número de individuos de las especies i
N = número total de individuos

7.6 Prueba T

Debido a que las muestras fueron pequeñas se aplicó el método de Hutcheson (1970) el cual se obtiene por un sistema de cálculo t (prueba de comparación), para estimar las diferencias significativas de los Índices de Simpson y Shannon entre tratamientos y muestreos (Maguran, 1989).

$$t = \frac{H'_1 - H_2}{(\text{Var } H'_1 + \text{Var } H_2)}$$

Donde H'_1 es la diversidad de la muestra 1 y $\text{Var } H'_1$ es su varianza.

$$t = \frac{D'_1 - D_2}{(\text{Var } D'_1 + \text{Var } D_2)}$$

Donde D'_1 es la dominancia de la muestra 1 y $\text{Var } D'_1$ es su varianza.

Según Taylor (1978) el índice de Shannon y Simpson se distribuyen normalmente, lo que hace posible el uso de la estadística paramétrica

7.7 Índice de Usher

La descripción de la distribución vertical de la macrofauna edáfica, se realizó con las morfoespecies más abundantes mediante el índice de Usher (Usher, 1975 En: Barrera *et al.*, 2001), que considera que la fauna se distribuye en el perfil como una nube tridimensional de densidad variable con la profundidad. Usher dividió el perfil vertical en un número “i” de estratos, cuyos centros se encontrarían a una distancia “di” de la superficie de la capa superior.

El hipotético centro de gravedad de esta nube se calcularía así:

$$M = \sum d_i \cdot n_i / N$$

M= a la profundidad media en cm

d_i= profundidad a la que se halla el centro de cada capa

n_i= densidad del taxón considerado, en cada capa

N= densidad del taxón en total del perfil

A los valores del índice de Usher se aplicó la prueba de contraste de Duncan de rango múltiple, que es diseñada para detectar diferencias significativas (Milton, 2001).

7.8 Índice de disimilaridad de Bray - Curtis

Se utilizó el índice de Bray Curtis que tiene en cuenta la abundancia de las especies, para comparar la composición de la macrofauna de las zonas adyacentes y los diferentes tratamientos implementados (Ramírez, 1999).

$$D_{j,k} = \frac{\sum |X_{ij} - X_{ik}|}{\sum |X_{ij} + X_{ik}|}$$

D_{j,k}= Es la disimilaridad entre j y k

X_{ij} = La abundancia de la especie i en j

X_{ik} = La abundancia de la especie i en k

S = El número de especies a comparar

7.9 Análisis de correspondencia canónica

El análisis de correspondencia canónica fue usado para examinar la frecuencia de las morfoespecies y demostrar la relación entre estas y los diferentes tratamientos implementados (Gibson, 2002).

8. Resultados

En los resultados del método recomendado por TSBF, fueron registrados individuos epigeos debido que en el momento de la extracción del suelo y del substrato se encontraban en la superficie, no obstante, se tuvieron en cuenta en los análisis de datos para esta técnica.

8.1. Macrofauna presente en las áreas de la Cantera y Bosque Adyacente

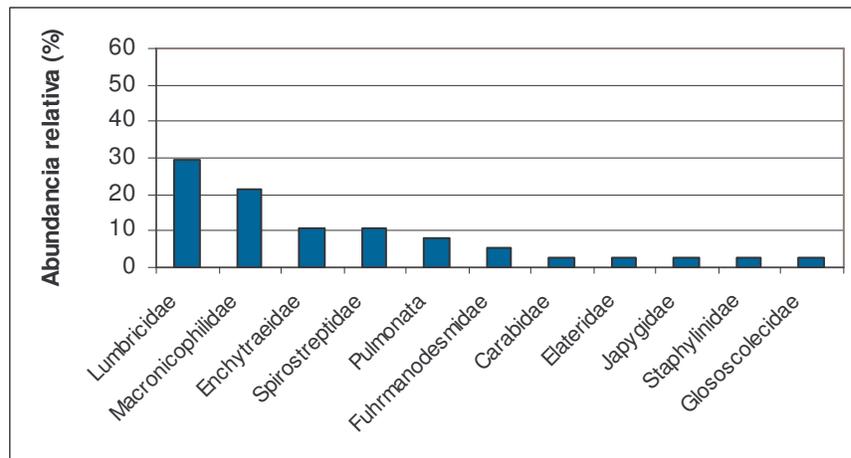
8.1.1 Composición de la macrofauna edáfica adulta

En las zonas: 1) De depósito de estériles, 2) Relicto de bosque altoandino y 3) Bosque adyacente a la cantera se registraron 24 morfoespecies determinadas en 14 órdenes y 18 familias.

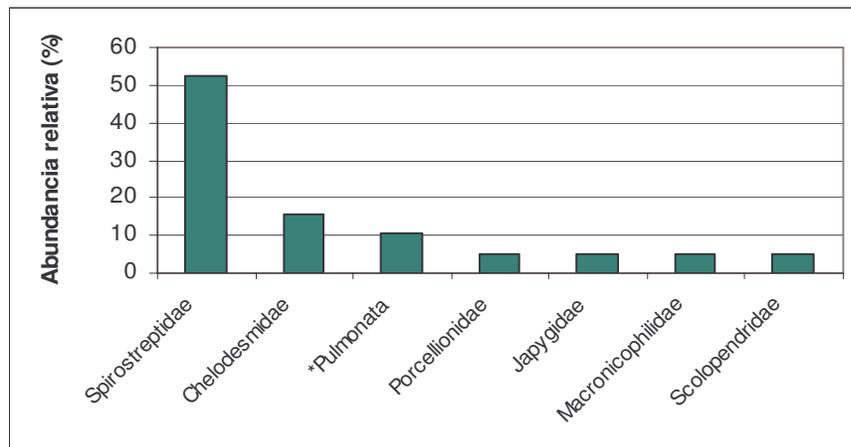
En la zona de depósito de estériles se reconocieron 10 familias. Las más abundantes fueron Lumbricidae (29.72%), seguida por Macronicophilidae (21.62%); Enchytraeidae (10.81%), Spirostreptidae (10.81%), Pulmonata- subclase (8.10%) y Fuhrmanodesmidae (5.40%). Las familias restantes se presentaron en abundancias más bajas (Figura 13a).

En el relicto de bosque altoandino de la cantera se registraron 8 familias. Entre las más abundantes se encontraron Spirostreptidae (52.63%), Chelodesmidae (15.78%) y Pulmonata- subclase (10.52%). Las demás familias se presentaron en menor abundancia (Figura 13b).

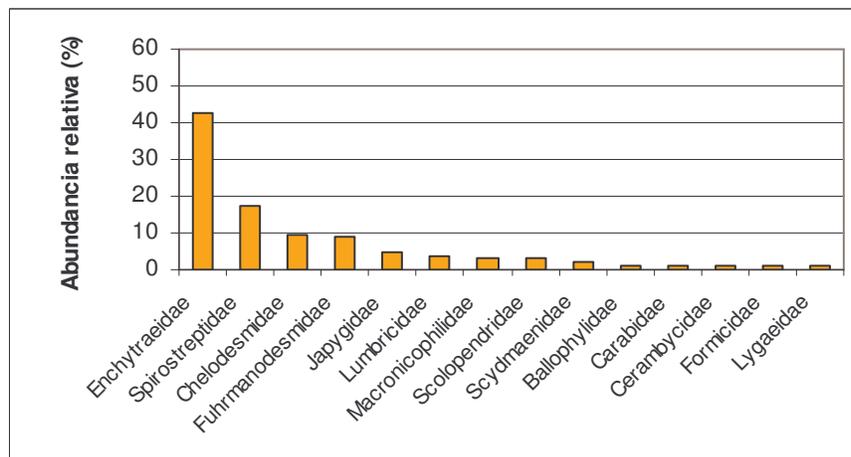
El bosque adyacente a la cantera presentó el mayor número de familias (14). Las más abundantes fueron Enchytraeidae (42.71%), Spirostreptidae (17.47%), Chelodesmidae (8.73%) y Fuhrmanodesmidae (9%). Las demás familias se presentaron en menor abundancia (Figura 13c).



a)



b)



c)

Figura 13. Abundancia relativa de familias en: a) Zona de depósito de estériles, b) Zona de relicto de bosque altoandino y c) Bosque adyacente a la cantera.

8.1.2 Riqueza y abundancia

El bosque adyacente a la cantera fue la zona con mayor riqueza de morfoespecies (16), entre las más abundantes se encontraron: E1 perteneciente a la familia Enchytraeidae (220 indv/m²), D1 y D2 de la familia Spirostreptidae (45 indv/m² cada una), D6 de la familia Chelodesmidae (45 indv/m²) y D5 de la familia Fuhrmanodesmidae (45 indv/m²) (Tabla 4).

La zona de depósito de estériles fue la segunda zona con mayor riqueza, con 10 morfoespecies (Tabla 4). La morfoespecie más abundante de esta zona fue O1 perteneciente a la familia Lumbricidae (50 ind/m²), Ch 4 de la familia Macronicophilidae (40 indv/m²), E1 de la familia Enchytraeidae (20 indv/m²) y D1 de la familia Spirostreptidae (20 indv/m²). Las demás morfoespecies en abundancias menores.

Por último, el relicto de bosque altoandino de la cantera fue la zona con menor riqueza, con 9 morfoespecies (Tabla 4). La morfoespecie más abundante fue D1 de la familia Spirostreptidae (40 indv/m²), D6 de la familia Chelodesmidae (15 indv/m²) y MII2 perteneciente a la subclase Pulmonata (10 indv/m²). Las restantes morfoespecies presentaron abundancias menores.

Las morfoespecies que se presentaron en las tres zonas fueron: Dp1 perteneciente a la familia Japygidae, Ch4 a Macronicophilidae y D1 a Spirostreptidae. Para el relicto de bosque altoandino y el bosque adyacente fueron: D6 perteneciente a la familia Chelodesmidae, Ch5 a Scolopendridae, D2 a Spirostreptidae. Para la zona de depósito de estériles y bosque adyacente a la cantera fue la morfoespecie E1 de la familia Enchytraeidae.

Tabla 4. Densidad por morfoespecie (indv/ m²) de la macrofauna edáfica de las tres zonas de estudio.

Orden	Familia	Morfoespecie	Z1*	Z2*	Z3*
Coleoptera	Carabidae	C 21	5	-	-
		C 22	-	-	5
	Cerambycidae	C 23	-	-	5
	Elateridae	C 24	5	-	-
	Scydmaenidae	C 25	-	-	10
Diplura	Japygidae	C 26	5	-	-
		Dp 1	5	5	25
Geophilomorpha	Ballophilidae	Ch 3	-	-	5
	Macronicophilidae	Ch 4	40	5	15
Hemiptera	Lygaeidae	He 1	-	-	5
Hymenoptera	Formicidae	Hy 2	-	-	5
Malacostraca	Porcellionidae	Is 1	-	5	-
Polydesmida	Chelodesmidae	D 4	-	-	5
		D 6	-	15	45
	Fuhrmanodesmidae	D 5	-	-	45
		D 7	10	-	-
Scolopendromorpha	Scolopendridae	Ch 5	-	5	15
Spirostreptida	Spirostreptidae	D 1	20	40	45
		D 2	-	5	45
		D 3	-	5	-
Subclase: Pulmonata		Mll 1	15	-	-
		Mll 2	-	10	-
Plesiophora	Enchytraeidae	E 1	20	-	220
Ophistophora	Lumbricidae	O 1	50	-	20
		O 2	5		
	Glososcolecidae	O 3	5		
Riqueza			12	9	16
Total general			185	95	515

* Z1: Zona de depósito de estériles, Z2: Zona de relicto de bosque altoandino, Z3: Bosque adyacente a la cantera.

8.1.3 Composición de los estados larvarios

Se registraron estados inmaduros para los órdenes Coleoptera, Diptera y Lepidoptera. Se definieron en total 14 morfoespecies, su presencia y abundancia en cada zona fue variable (Tabla 5). Del total de morfoespecies, 7 no fueron determinadas hasta familia.

Tabla 5. Densidad por morfoespecie (indv/ m²) de los estados inmaduros de la macrofauna edáfica de las tres zonas estudio.

Orden	Familia	Morfoespecie	Z1*	Z2*	Z3*	
Coleoptera	Curculionidae	LC 17	67	8	-	
		Elateridae	LC 20	75	-	-
			LC 21	17	-	-
			LC 22	-	8	25
			LC 25	-	-	8
	Scarabaeidae	LC 7	50	-	-	17
		LC 19	17	8	-	-
	Indeterminada	LC 16	17	-	-	-
		LC 18	8	-	-	8
		LC 23	-	-	-	17
		LC 24	-	-	-	8
		LC 26	-	-	-	8
Diptera	Indeterminada	LD 10	-	-	58	
Lepidoptera	Indeterminada	LL27	8	-	-	
Riqueza			8	3	8	
Total general			259	24	149	

* Z1= Zona de depósito de estériles, Z2: Zona de relicto de bosque altoandino, Z3= Bosque adyacente a la cantera.

La zona de depósito de estériles presentó 8 morfoespecies, de las cuales 7 pertenecen al orden Coleóptera y 1 a Lepidoptera. Las más abundantes fueron LC 20 de la familia Elateridae (75 inv/m²), LC17 de la familia Curculionidae (66 indv/m²), LC7 de la familia Scarabaeidae (50 indv/m²), las demás morfoespecies se presentaron en menor abundancia.

El bosque adyacente a la cantera también presentó 8 morfoespecies, 7 pertenecen al orden Coleoptera y 1 a Diptera. Las más abundantes fueron LD10 del orden Díptera familia indeterminada (58 indv/m²), LC22 de la familia Elateridae (25 indv/m²), LC7 de la familia Scarabaeidae (17 indv/m²), LC23 del orden Coleóptera de familia indeterminada (17 indv/m²). Las morfoespecies restantes representadas en menor abundancia.

En el relicto de bosque altoandino de la cantera se registraron 3 morfoespecies pertenecientes al orden Coleoptera: LC17 de la familia Curculionidae, LC22 de la

familia Elateridae y LC 19 de la familia Scarabaeidae, todas con igual número de individuos (8 indv/m²).

8.2 Área experimental

8.2.1 Macrofauna edáfica colectada por el método recomendado por TSBF (adultos)

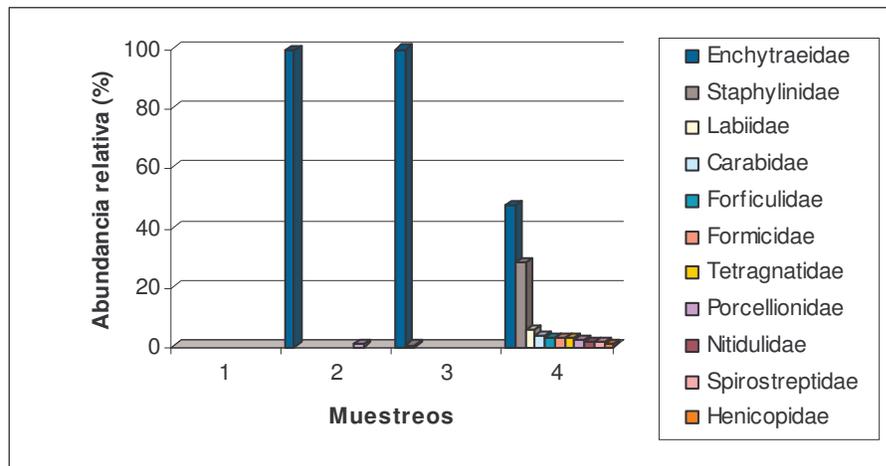
En los resultados de adultos colectados por el método del TSBF, el control no fue incluido en los análisis, debido a que no fue colonizado por ninguna morfoespecie durante todos los muestreos.

8.2.1.1 Composición

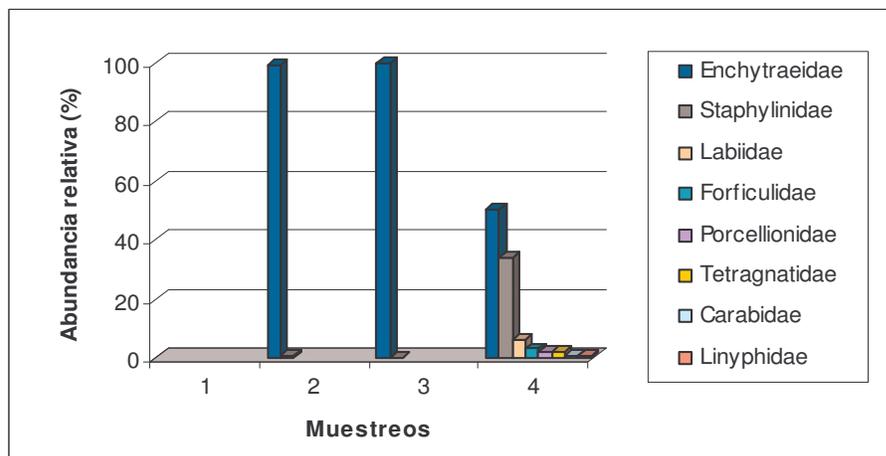
En total se colectaron 24 morfoespecies en los diferentes tratamientos, correspondientes a 9 órdenes y 13 familias. El repoblamiento de la macrofauna edáfica se evidenció en el segundo muestreo (M2) (3 meses después de haber implementado los substratos) para todos los tratamientos.

Para el tratamiento 1, en el muestreo 2 la familia Enchytraeidae colonizó de manera abundante con una representación del 99.26% de los individuos colonizadores y la familia Porcellionidae en abundancia menor (0.73%). Para el muestreo 3, la familia Enchytraeidae siguió dominando con el 99.43% y empieza a colonizar la familia Staphylinidae, sin embargo con un porcentaje muy bajo (0.56%). Para el muestreo 4 se evidenció un incremento en el número de familias colonizadoras de la macrofauna edáfica, no obstante, persistió el dominio de la familia Enchytraeidae, aunque en menor porcentaje de individuos (47.40%), seguido por la familia Staphylinidae (28.14%), Labiidae (5.92%), y Carabidae (3.70%). Las familias Forficulidae, Formicidae, Tetragnatidae, Porcellionidae, Nitidulidae, Spirostreptidae y Henicopidae estuvieron con una menor representación (Figura 14a).

Para el tratamiento 2, en el muestreo 2 al igual que el tratamiento 1, la familia dominante fue Enchytraeidae (99.31%) y la familia Staphylinidae colonizó en un porcentaje bajo (0.68%). Para el muestreo 3, persistieron las dos familias, con aumento en la representación de la familia Enchytraeidae (99.71%) y Staphylinidae con 0.28%. En el muestreo 4 aumentaron las familias colonizadoras, Enchytraeidae estuvo con mayor representación (50.51%), seguida por Staphylinidae (34.02%), Labiidae (6.18%) y Forficulidae (3.09%). Las familias en menor porcentaje de individuos fueron Porcellionidae, Tetragnatidae, Carabidae y Linyphidae (Figura 14b).



a)



b)

Figura 14. Abundancia relativa de las familias colectadas por el método recomendado por TSBF durante los cuatro muestreos en: a) Tratamiento 1 y b) Tratamiento 2.

Para el tratamiento 3, en el muestreo 2 dominó la familia Enchytraeidae (98.96%), además de la colonización de las familias Staphylinidae (0.77%) y Gryllacrididae (0.25%). En el muestreo 3, la familia Enchytraeidae fue la única colectada (100%), y para el muestreo 4, Enchytraeidae persiste en abundancia alta (91.98%) en comparación al tratamiento 1 y 2, aunque colonizan otras familias como Staphylinidae (4.24%) , Henicopidae (0.94%), Porcellionidae (0.94%), Tetragnatidae (0.94%), Chrysomelidae (0.47%) y Forficulidae (0.47%) (Figura 15).

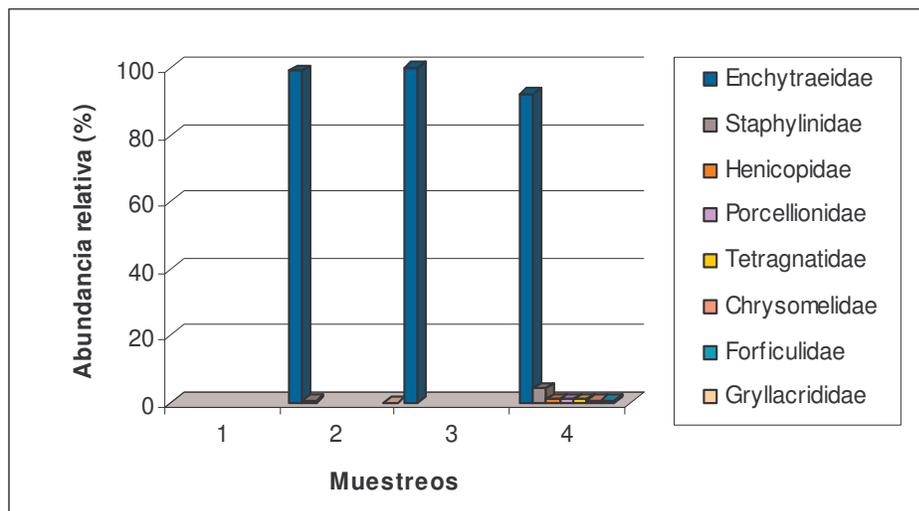


Figura 15. Abundancia relativa de las familias colectadas por el método recomendado por TSBF en el tratamiento 3 durante los cuatro muestreos.

8.2.1.2 Riqueza y abundancia

La riqueza de los tratamientos estudiados, expresada como el número de morfoespecies colonizadoras incrementó con el tiempo, a excepción del tratamiento 3 en el muestreo 3 donde se colectó solo una morfoespecies (Figura 16). En el muestreo 1, no fue colectada ninguna morfoespecie de la macrofauna edáfica en los diferentes tratamientos.

Para el tratamiento 1, en el muestreo 2 se registraron 2 morfoespecies: E1 (1125 indv/m²) perteneciente a la familia Enchytraeidae e Is1 (8 indv/m²) a Porcellionidae.

En el muestreo 3, E1 incremento su abundancia (1458 indiv/m²) y coloniza C2 de la familia Staphylinidae (8 indiv/m²). En el muestreo 4, se colectaron 19 morfoespecies, presentando E1 la mayor abundancia (533 indiv/m²), seguida por C2 (283 indiv/m²), C3 de la familia Carabidae (42 indiv/m²) y De 3 de la familia Labiidae (42 indiv/m²). Las demás morfoespecies presentaron menor número de individuos (Tabla 6).



Figura 16. Variación de la riqueza de adultos colectados por el método recomendado por TSBF en los diferentes tratamientos durante los cuatro muestreos.

Para el tratamiento 2, en el muestreo 2 colonizaron dos morfoespecies: E1 (1216 indiv/m²) y C2 (8 indiv/m²), pertenecientes a las familias Enchytraeidae y Staphylinidae, respectivamente. En el muestreo 3, E1 incrementó su abundancia (11483 indiv/m²) y colonizó C4 (33 indiv/m²) de la familia Staphylinidae. En el muestreo 4, se colectaron 11 morfoespecies, E 1 presentó la mayor abundancia (408 indiv/m²) pero disminuyó con relación a los dos muestreos anteriores, seguido por C2 de la familia Staphylinidae (200 indiv/m²), C4 (75 indiv/m²), Ar 20 de la familia Tetragnatidae (42 indiv/ m²) y De 8 de la familia Labiidae (33 indiv/m²). Las demás morfoespecies presentaron abundancias más bajas (Tabla 7).

Tabla 6. Densidad por morfoespecie (indv/ m²) de la macrofauna edáfica colonizadora del tratamiento 1 en los cuatro muestreos.

Orden	Familia	Morfoespecie	M1	M2	M3	M4	Total
Aranea	Tetragnatidae	Ar 18	-	-	-	8	8
		Ar 20	-	-	-	17	17
		Ar 21	-	-	-	8	8
Coleoptera	Carabidae	C 3	-	-	-	42	42
		Nitidulidae	C 17	-	-	-	8
	C 20		-	-	-	8	8
	Staphylinidae		C 2	-	-	8	283
		C 4	-	-	-	17	17
		C 7	-	-	-	17	17
Dermaptera	Forficulidae	De 2	-	-	-	25	25
		De 7	-	-	-	8	8
	Labiidae	De 1	-	-	-	17	17
		De 3	-	-	-	42	42
		De 4	-	-	-	8	8
Hymenoptera	Formicidae: subfamilia Dolichoderinae	Hy 1	-	-	-	33	33
Lithobiomorpha	Henicopidae	Ch 2	-	-	-	8	8
Malacostraca	Porcellionidae	Is 1	-	8	-	25	33
Spirostreptida	Spirostreptidae	D 1	-	-	-	17	17
Plesiophora	Enchytraeidae	E 1	-	1125	1458	533	3116
Total general			0	1133	1466	1124	3723
Riqueza			0	2	2	19	23

Para el tratamiento 3, en el muestreo 2 colonizan tres morfoespecies: E1 (3191 indv/m²), C2 (25 indv/m²) y Gr3 (8 indv/m²) pertenecientes a las familias Enchytraeidae, Staphylinidae y Gryllacrididae, respectivamente. En el muestreo 3 se registró solamente E1 y para el muestreo 4 además de E1 colonizaron 7 morfoespecies. Igualmente que en todos los tratamientos E 1 presentó la mayor abundancia (1625 indv/m²), seguido por C2 y C4 de la familia Staphylinidae (50 y 25 indv/m² respectivamente). Las restantes morfoespecies estuvieron representadas en abundancias más bajas (Tabla 8).

Tabla 7. Densidad por morfoespecie (indv/ m²) de la macrofauna edáfica colonizadora del tratamiento 2 en los cuatro muestreos.

Orden	Familia	Morfoespecie	M1	M2	M3	M4	Total
Aranea	Linyphidae	Ar 12	-	-	-	8	8
		Tetragnatidae	Ar 2	-	-	-	8
			Ar 20	-	-	-	42
Coleoptera	Carabidae	C 3	-	-	-	8	8
	Staphylinidae	C 2	-	8	-	200	208
		C 4	-	-	33	75	108
Dermaptera	Forficulidae	De 2	-	-	-	25	25
		Labiidae	De 3	-	-	-	17
			De 8	-	-	-	33
Malacostraca	Porcellionidae	Is 1	-	-	-	17	17
Plesiophora	Enchytraeidae	E 1	-	1216	11483	408	13107
Total general			0	1224	11516	12740	12740
Riqueza			0	2	2	11	15

Tabla 8. Densidad por morfoespecie (indv/ m²) de la macrofauna edáfica colonizadora del tratamiento 3 en los cuatro muestreos.

Orden	Familia	Morfoespecie	M1	M2	M3	M4	Total
Aranea	Tetragnatidae	Ar 20	-	-	-	17	17
Coleoptera	Chrysomelidae	C 19	-	-	-	8	8
	Staphylinidae	C 2	-	25	-	50	75
		C 4	-	-	-	25	25
Dermaptera	Forficulidae	De 2	-	-	-	8	8
Lithobiomorpha	Henicopidae	Ch 2	-	-	-	17	17
Malacostraca	Porcellionidae	Is 1	-	-	-	17	17
Orthoptera	Gryllacrididae	Gr 3	-	8	-	-	8
Plesiophora	Enchytraeidae	E 1	-	3192	6408	1625	11225
Total general			0	3225	6408	1767	11400
Riqueza			0	3	1	8	12

De los presentes datos se puede indicar que la aplicación de biosólidos presenta una marcada influencia en el repoblamiento de la macrofauna edáfica, donde es claro que el repoblamiento esta restringido a los tratamientos y no al control.

Los índices de diversidad, dominancia y distribución vertical fueron aplicados desde el muestreo 2, debido a la ausencia de morfoespecies en el muestreo 1.

8.2.1.3 Diversidad de los tratamientos por muestreo

La diversidad de especies provee el mejor camino para detectar y evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos sobre la macrofauna edáfica y el cambio del repoblamiento.

En el muestreo 2 para todos los tratamientos presento valores bajos, siendo el tratamiento 3 el que presentó el mayor valor (0.063), seguido por el tratamiento 1 (0.043) y el tratamiento 2 (0.041). No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

En el muestreo 3, los valores del índice de Shannon disminuyeron para los tratamientos; tratamiento 1 con un valor de 0.015, tratamiento 2 con 0.019 y tratamiento 3 con 0, debido a que solo fue colectada una morfoespecie. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos a través de la prueba t.

Para el muestreo 4, la diversidad aumentó en todos los tratamientos con el valor mas alto para el tratamiento 1 con 1.805, seguido por el tratamiento 2 con 1.581 y tratamiento 3 con 0.421. Cuando se compararon los tratamientos se encontraron diferencias significativas de la siguiente manera: entre los tratamiento 1 y 3 ($t= 9.538592$, $gl= 249$, $P < 0.01$) y entre los tratamiento 2 y 3 ($t= 8.406324$, $gl= 203$, $P < 0.01$) (Figura 17).



Figura 17. Variación del índice de Shannon (adultos) en los diferentes tratamientos durante los muestreos 2, 3 y 4.

8.2.1.4 Diversidad de cada tratamiento a través del tiempo

El cambio de diversidad a través del tiempo para cada tratamiento presentó diferencias significativas en el tratamiento 3 entre los muestreos 2 y 3 y en todos los tratamientos entre los muestreos 3 y 4 (Tabla 9).

Tabla 9. Prueba T que compara los índices de Shannon y Simpson a través del tiempo para los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Muestreo	Shannon			Simpson		
		Calculo t	P valor	gl	Calculo t	P valor	gl
1	M2-M3	0.711	0.238	176	0.678	0.249	176
1	M3-M4	14.659	2.66E-30 *	139	21.957	2,49E-47 *	139
2	M2-M3	0.595	0.276	165	0.572	0.283	165
2	M3-M4	13.894	2.13E-25*	102	18.608	7.25E-35 *	102
3	M2-M3	2.383	0.008 *	387	2.0328	0.021**	387
3	M3-M4	5.273	1.64E-07 *	212	4.550	4.51E-06 *	212

* p < 0.01 **p < 0.05

8.2.1.5 Equidad

Para el muestreo 2, todos los tratamientos presentaron valores bajos, el tratamiento 1 con un valor de 0.062, seguido por el tratamiento 2 con 0.058 y el tratamiento 3 con 0.057. Para el muestreo 3 los valores disminuyeron, tratamiento 1 con 0.05, el tratamiento 2 con 0.028 y tratamiento 3 con un valor de 0 debido a que se colectó una morfoespecie.

Para el muestreo 4, se evidenció un incremento en los valores de equidad, el tratamiento 2 con el mayor valor 0.65, seguido por el tratamiento 1 con 0.613 y el tratamiento 3 con 0.202 (Figura 18).

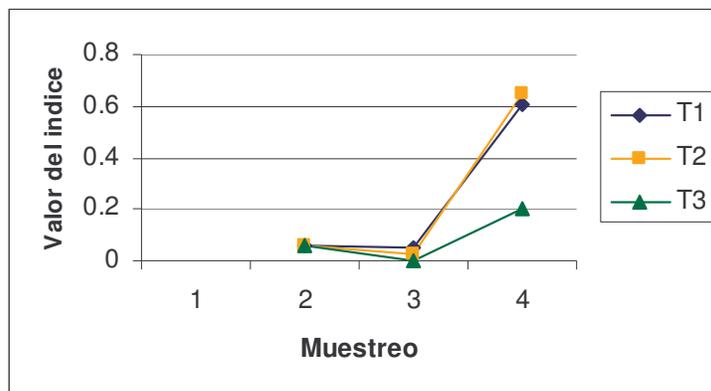


Figura 18. Variación del índice de equidad (adultos) en los diferentes tratamientos durante los muestreos 2, 3 y 4.

8.2.1.6 Dominancia de los tratamientos por muestreo

Los valores del índice de Simpson en los muestreos 2 y 3 fueron altos y variaron entre 0.975 –1 que indican una dominancia alta, datos explicados por la abundancia de la familia Enchytraeidae para todos los tratamientos. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Los valores del índice de Simpson disminuyeron en todos los tratamientos para el muestreo 4. Sin embargo, el tratamiento 3 presentó mayor dominancia con un valor de 0.84, seguido por tratamiento 2 con 0.30 y tratamiento 1 con 0.29. Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos 1 y 3 ($t= 12.131$, $gl= 249$, $P<0.01$) y entre los tratamientos 2 y 3 ($t= 10.903$, $gl= 203$, $P<0.01$).

8.2.1.7 Dominancia de cada tratamiento a través del tiempo

El cambio de dominancia a través del tiempo para cada tratamiento presentó diferencias significativas en el tratamiento 3 entre los muestreos 2 y 3 y en todos los tratamientos entre los muestreos 3 y 4 (Tabla 9 y Figura 19).

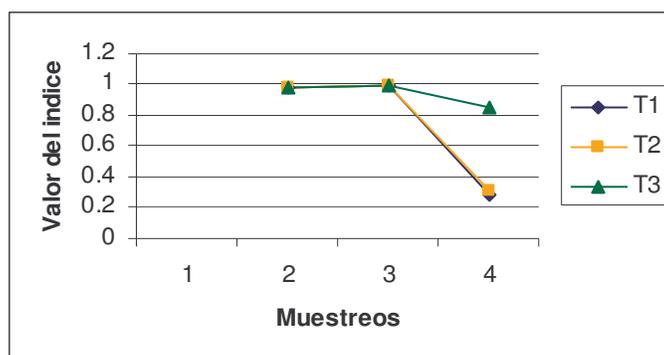


Figura 19. Variación del índice de Simpson (adultos) en los diferentes tratamientos durante los muestreos 2, 3 y 4.

8.2.1.8 Distribución vertical

Para evaluar la distribución vertical se escogieron las morfoespecies más abundantes de los muestreos y se utilizó el índice de Usher que se refiere a la profundidad promedio de la distribución de la morfoespecie en el perfil del suelo.

En el muestreo 2, para la morfoespecie E1 perteneciente a la familia Enchytraeidae, el índice de Usher indicó que para los tratamientos 1 y 2 los individuos se distribuyeron especialmente en la profundidad de 15-30 cm (Usher: 22.5 cm), al contrario que el tratamiento 3 que se distribuyó en la profundidad de 0-15 cm (Usher: 8.17), sin embargo no se presentaron diferencias significativas a través del Test de Duncan.

Para el muestreo 3, en todos los tratamientos esta morfoespecie (E1) se distribuyó especialmente en la profundidad de 15-30 cm con valores del índice así: tratamiento 1: 16.72, tratamiento 2: 15.44 y tratamiento 3: 17.88, sin presentarse diferencias significativas a través del Test de Duncan. En el muestreo 4 al contrario que en el muestreo anterior, la distribución fue especialmente en la profundidad de 0-15 cm en todos los tratamientos, sin presentar diferencias significativas (Figura 20).

Sin embargo, al comparar los valores del índice de Usher en el tiempo, se encontró diferencias significativas a través del Test de Duncan, para el tratamiento 1 entre el muestreo 3 y 4 y para el tratamiento 3 entre el muestreo 2 y 3.

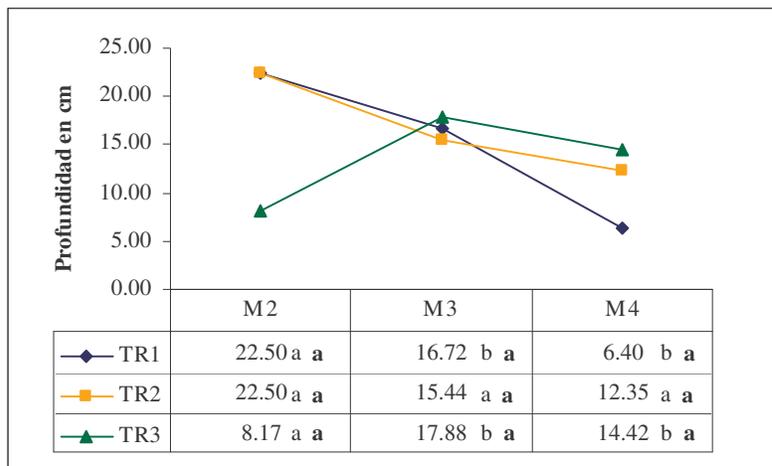


Figura 20. Índice de Usher para la morfoespecie E1 en los tratamientos durante los s muestreos 2, 3 y 4. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas. Las letras que están en negrilla muestran las diferencias de los tratamientos por muestreo y las que están en normal indican las diferencias de los tratamientos a través de los muestreos.

La segunda morfoespecie seleccionada en el análisis de Usher fue C2 perteneciente al Orden Coleoptera y a la familia Staphylinidae, debido a su alta abundancia en todos los tratamientos durante el muestreo 4. Esta morfoespecie se distribuyó especialmente en la profundidad de 0- 15 cm en todos los tratamientos (Figura 21).

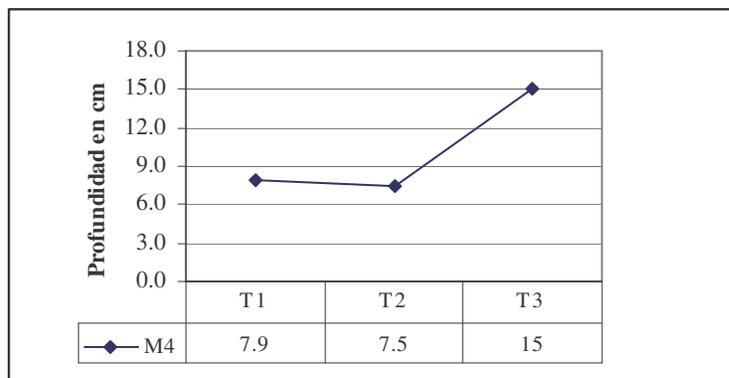


Figura 21. Índice de Usher para la morfoespecie C2 en los tratamientos durante el cuarto muestreo.

8.2.1.9 Similaridad

La similaridad entre las zonas de estudio y los tratamientos en términos de abundancia por morfoespecies es presentada en el dendograma de similaridad de Bray Curtis (Figura 22), donde se identifica una baja similaridad (5%).

Para los tratamientos la similaridad fue mayor entre los tratamientos 2 y 3 (35.81%), seguido por los tratamientos 1 y 2 (29.04%) y el tratamiento 1 y 3 (26.69%).

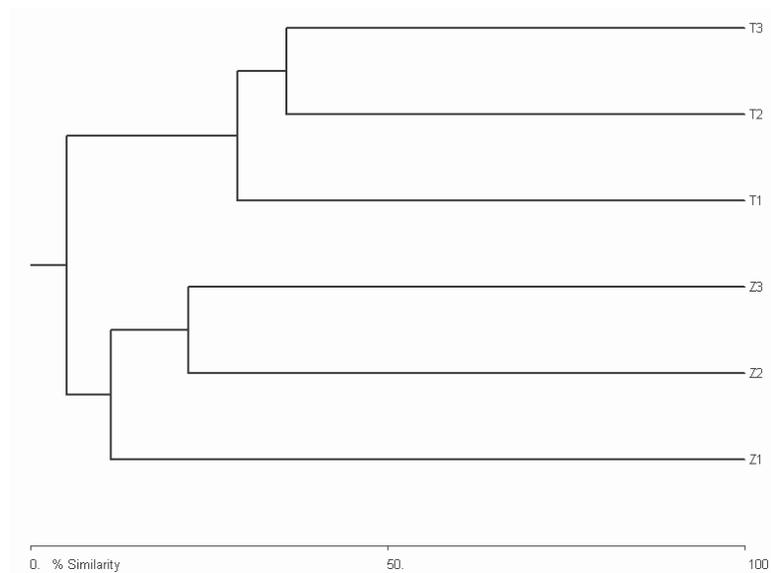


Figura 22. Dendograma de similaridad de Bray Curtis entre las diferentes zonas de la cantera y los tres tratamientos en términos de abundancia de morfoespecies (adultos) colectados por el método recomendado por TSBF.

8.2.1.10 Asociación de especies a los tratamientos

El análisis de Correspondencia Canónica enfatiza el efecto del tratamiento sobre la comunidad de la macrofauna del suelo. En el análisis se identificó que el tratamiento 1 está asociado a 12 morfoespecies, el tratamiento 2 asociado a 5 morfoespecies y el tratamiento 3 a 3 morfoespecies. Entre el tratamiento 1 y 2 se comparten 3 morfoespecies (Figura 23).

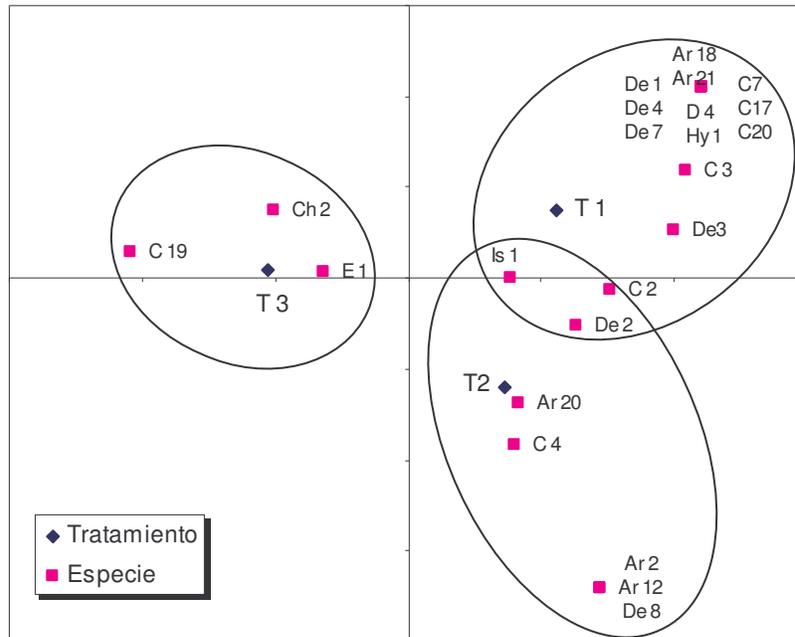


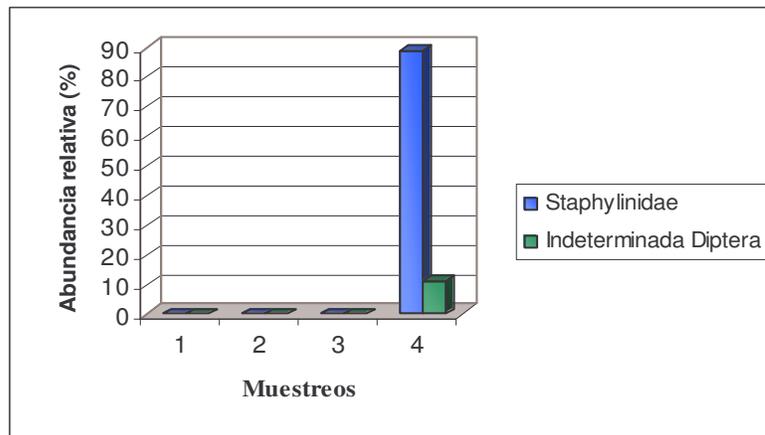
Figura 23. Análisis de Correspondencia Canónica donde se muestran las morfoespecies asociadas a los tratamientos (Método TSBF).

8.2.2 Estados inmaduros de la macrofauna edáfica colectada por el método recomendado por TSBF

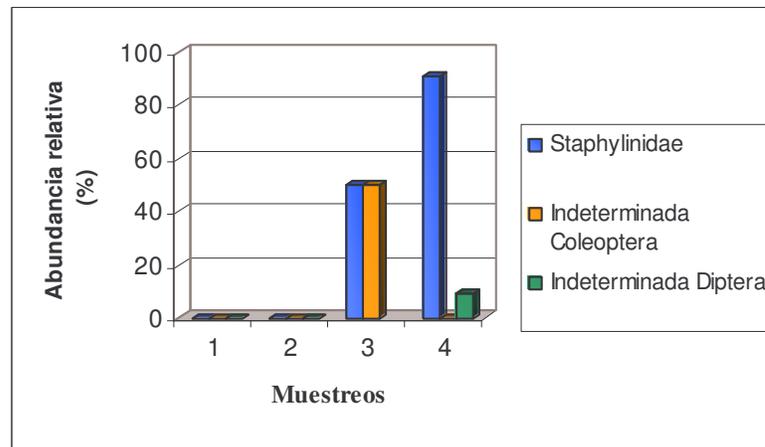
8.2.2.1 Composición

Se registraron de los tratamientos investigados estados inmaduros pertenecientes al Orden Coleóptera y Diptera. Tres morfoespecies no fueron determinadas hasta familia.

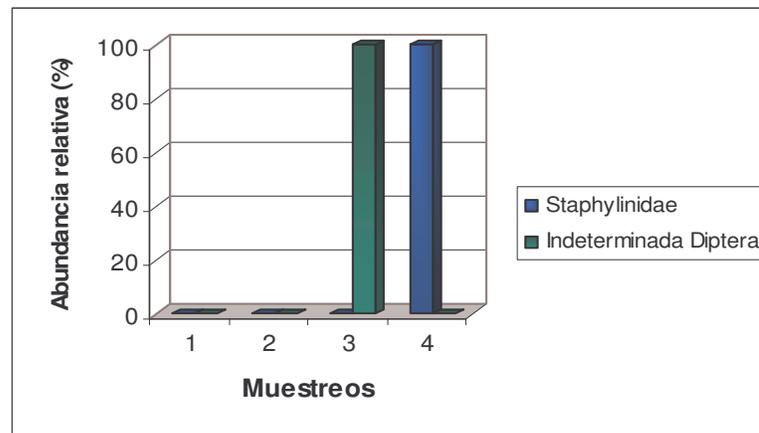
Para el tratamiento 1 la colonización de estados inmaduros se observó en el muestreo 4, pertenecientes a la familia Staphylinidae, representando el 88.88% de individuos y al orden Diptera familia indeterminada con 11.11% (Figura 24a).



a)



b)



c)

Figura 24. Abundancia relativa de las familias y órdenes de los estados inmaduros colectados por el método recomendado por TSBF en los: a) Tratamiento 1, b) Tratamiento 2 y c) Tratamiento 3.

Para el tratamiento 2, la colonización de estados inmaduros se observó desde el muestreo 3 con las familias Staphylinidae (50%) y familia indeterminada del orden Coleoptera (50%). Para el muestreo 4 se incrementó la abundancia relativa de la familia Staphylinidae (90.91%) y colonizó la familia indeterminada del orden Diptera (0.98%) (Figurara 24b).

En el tratamiento 3, la colonización de estados inmaduros se observó desde el muestreo 3 con el orden Diptera familia indeterminada (100%), y para el muestreo 4 colonizaron larvas pertenecientes a la familia Staphylinidae (100%) (Figura 24c).

En el control fueron colectados estados inmaduros solamente en el muestreo 3, pertenecientes a la familia Scarabaeidae del orden Coloeoptera (Figura 25).

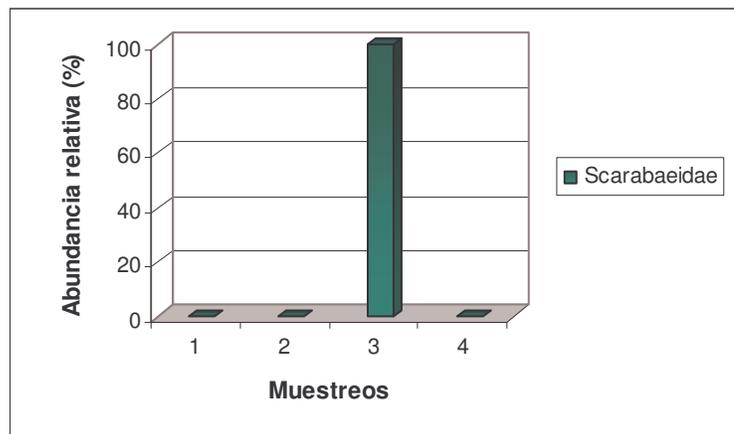


Figura 25. Abundancia relativa por familia de estados inmaduros colectados en el control por el método recomendado por TSBF.

8.2.2.2 Riqueza y abundancia

El número de morfoespecies de estados inmaduros colonizadores se incrementó en todos los tratamientos en el muestreo 4 en comparación al muestreo 3, a excepción del control donde no se colecta ninguna morfoespecie (Figura 26).

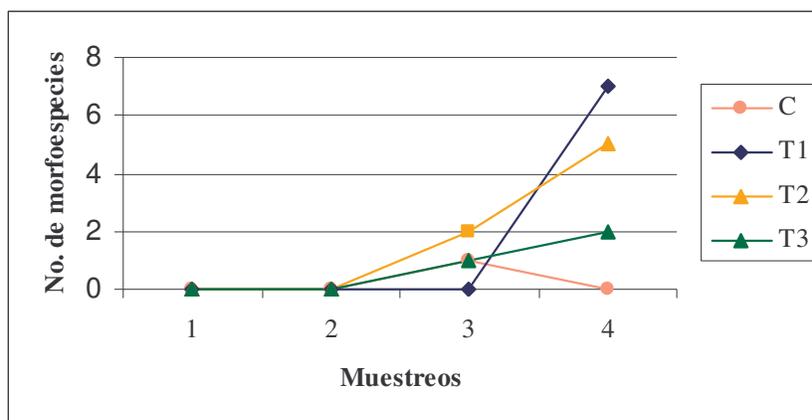


Figura 26. Variación de la riqueza de estados inmaduros colectados por el método recomendado por TSBF, en los diferentes tratamientos y control durante los muestreos.

Para el tratamiento 1, en el muestreo 4 se registraron 6 morfoespecies de las cuales 5 pertenecen a la familia Staphylinidae y dos al orden Diptera. Las mayores abundancias fueron presentadas por las morfoespecies LC4 y LC3 con 108 indv/m² cada una de la familia Staphylinidae. Las demás morfoespecies estuvieron representadas en menor número (Tabla 10).

Para el tratamiento 2, en el muestreo 3 colonizaron dos morfoespecies, LC6 del orden Coloptera familia indeterminada y LC4 de la familia Staphylinidae. En el muestreo 4 la morfoespecie LC4 se mantuvo con mayor abundancia (50 indv/m²) y colonizaron 4 morfoespecies, LC1 de la familia Staphylinidae (17 indv/m²) y las demás con abundancias bajas (Tabla 10).

Para el tratamiento 3, en el muestreo 3 colonizó una morfoespecie del orden Diptera familia indeterminada (8 indv/m²), y en el muestreo 4 colonizaron dos morfoespecies de la familia Staphylinidae LC4 (142 indv/m²) y LC5 (17 indv/m²) (Tabla 10).

Tabla 10. Abundancia por m² de las morfoespecies de los estados inmaduros en los diferentes tratamientos durante los tres muestreos.

Tratamiento	Orden	Familia	Morfoespecie	M1	M2	M3	M4	Total
1	Coleoptera	Staphylinidae	LC1	-	-	-	8	8
1		Staphylinidae	LC2	-	-	-	8	8
1		Staphylinidae	LC3	-	-	-	108	108
1		Staphylinidae	LC4	-	-	-	108	108
1		Staphylinidae	LC5	-	-	-	33	33
1	Diptera	Indeterminada	LD1	-	-	-	8	8
1		Indeterminada	LD2	-	-	-	25	25
2	Coleoptera	Staphylinidae	LC1	-	-	-	16	16
2		Indeterminada	LC6	-	-	8	-	8
2		Staphylinidae	LC3	-	-	-	8	8
2		Staphylinidae	LC4	-	-	8	50	58
2		Staphylinidae	LC5	-	-	-	8	8
2	Diptera	Indeterminada	LD1	-	-	-	8	8
3	Coleoptera	Staphylinidae	LC4	-	-	-	142	142
3		Staphylinidae	LC5	-	-	-	17	17
3	Diptera	Indeterminada	LD2	-	-	8	-	8
C	Coleoptera	Scarabaeidae	LC7	-	-	17	-	17
Total general				0	0	41	547	588

8.2.2.3 Diversidad de los tratamientos por muestreo

El índice de Shannon para estados inmaduros se aplicó solo en el cuarto muestreo, debido a la ausencia de larvas en el muestreo 1 y 2; y en el muestreo 3 por la presencia de una morfoespecie en el tratamiento 3 y control y en el tratamiento 1 por la ausencia de larvas.

En el muestreo 4, el tratamiento con mayor diversidad de estados inmaduros fue tratamiento 1 (H' : 1.485), seguido el tratamiento 2 (H' : 1.294) y por último el tratamiento 3 con la menor diversidad (H' :0.33) (Figura 27). La comparación de la diversidad entre tratamientos mostró diferencias significativas, entre los tratamientos 1– 3 ($t= 3.831$, $gl=53$, $P <0.01$) y entre los tratamientos 2 y 3 ($t= 3.074$, $gl=18$ $P<0.01$).

8.2.2.4 Equidad

Para el muestreo cuatro, los tratamientos que presentaron mayor equidad de estados inmaduros fueron: tratamiento 2 con 0.804 y tratamiento 1 con 0.763. El tratamiento 3 presentó la menor equidad con un valor de 0.485 debido a la gran abundancia de la morfoespecie LC4 de la familia Staphylinidae. (Figura 27).

8.2.2.5 Dominancia

Al igual que para el índice de Shannon, el índice de Simpson se estimó solo para el muestreo 4. El T3 presentó el valor más alto de dominancia (D: 0.80), seguido por T2 (D: 0.29) y T1 (D: 0.26) (Figura 27). Las diferencias de los valores del Índice de Simpson fueron significativas entre los tratamientos 1 y 3 ($t= 4.527$, $gl=53$ $P < 0.01$) y tratamientos 2 y 3 ($t= 19.1676$, $gl= 18$, $P < 0.01$).

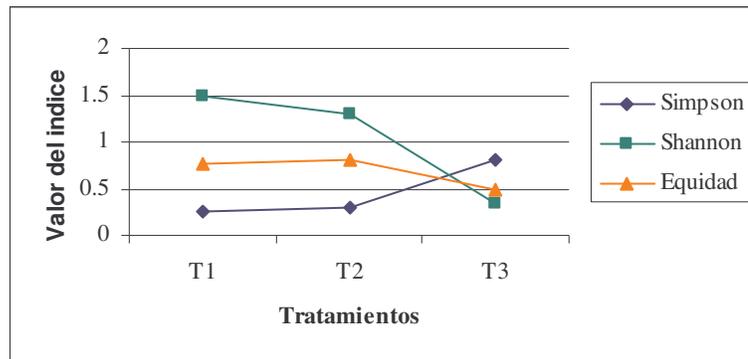


Figura 27. Índices de Shannon, Simpson y equidad para las morfoespecies de estados inmaduros de los tratamientos durante el cuarto muestreo.

8.2.2.6 Distribución vertical

La distribución vertical de los estados inmaduros en el perfil del sustrato fue analizada solo en el muestreo cuatro a través del índice de Usher, debido a la ausencia de morfoespecies en el muestreo 1 y a las bajas abundancias que se presentaron en el muestreo 2. Para este muestreo, el índice fue aplicado a los

estados inmaduros como un todo sin discriminar a que ordenes o familias pertenecían.

El índice de Usher indicó que para todos los tratamientos los estados inmaduros se distribuyeron especialmente en la profundidad de 0-15 cm. Para el tratamiento 1 el centro hipotético de gravedad fue en los 11.25 cm, para el tratamiento 2 en 7.5 cm y en el tratamiento 3 en 3.75 cm (Figura 28).

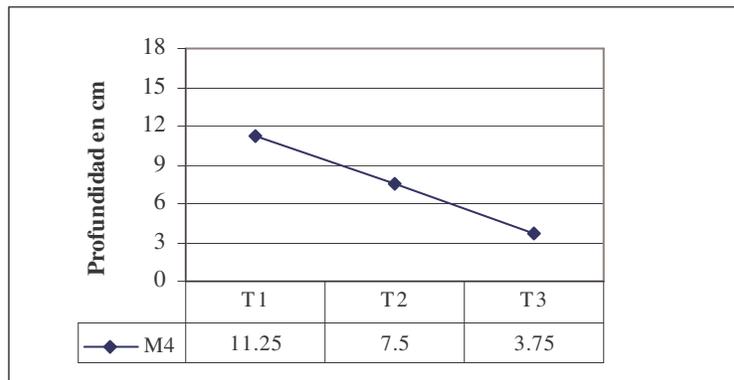


Figura 28. Índice de Usher para los estados inmaduros de los tratamientos durante el cuarto muestreo.

8.2.2.7 Similaridad

El análisis de similaridad de Bray Curtis aplicado para los tratamientos, control y zonas de estudio en términos de abundancia de morfoespecies de estados inmaduros demostró que no existe similaridad (0%) entre los tratamientos y las zonas, y entre el control y las zonas una baja similaridad (8.69%) (Figura29).

Entre tratamientos se encontró que los más similares son tratamiento 1-2 (44.75%), seguido por el tratamiento 1 -3 (39.46%) y por el tratamiento 2 y 3 (23.75%).

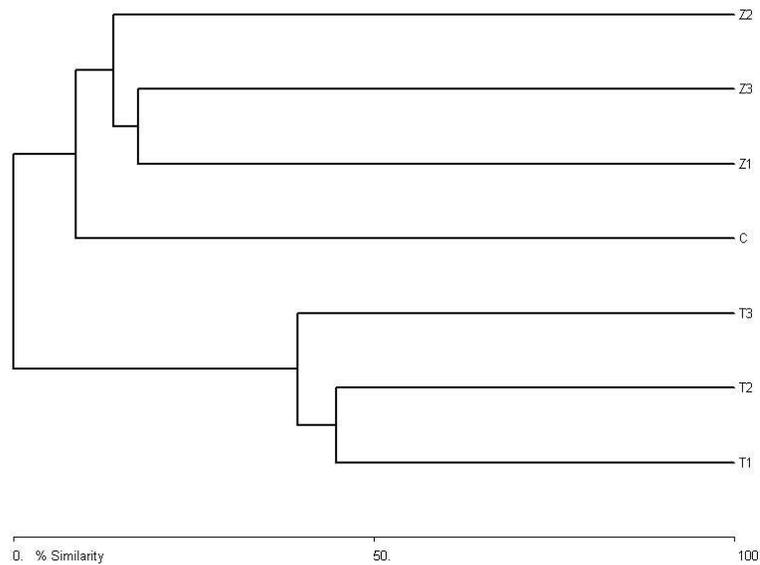


Figura 29. Dendrograma de similaridad de Bray Curtis entre las diferentes zonas de la cantera, los tres tratamientos y control en términos de abundancia de morfoespecies (estados inmaduros) colectados por el método recomendado por TSBF.

8.2.2.8 Asociación de especies a los tratamientos

Con el análisis de Correspondencia Canónica se identificó que no existe una clara asociación de las morfoespecies de estados inmaduros a los tratamientos. Solo se encontró que los tratamientos 1 y 2 están asociados a una morfoespecie, LC2 y LC6 respectivamente. No se aplicó a este análisis el control (Figura 30)

8.2.3 Macrofauna edáfica colectada por trampas pitfall (adultos)

8.2.3.1 Composición

El número total de individuos colectados por trampas pitfall, fue de 234 pertenecientes a 12 órdenes, 26 familias y 50 morfoespecies.

Para el tratamiento 1 se registraron 17 familias, la más abundante fue Tetragnatidae (24.61%), seguida por Lycosidae (15.38%), Labidae (10.76%), Carabidae (7.69%),

Porcellionidae (7.69%), Staphylinidae (6.15%), Formicidae (4.61%), Miridae (4.61%), Gryllacrididae (3.07%), Forficulidae (3.07%) y Linyphidae (3.07). Las demás familias estuvieron representadas cada una con un porcentaje del 1.53% (Figura 31a).

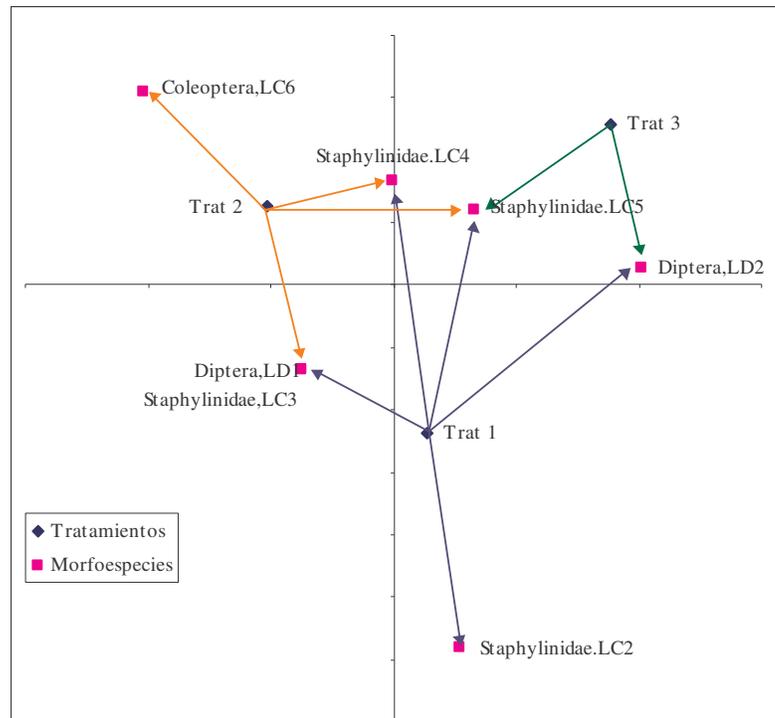


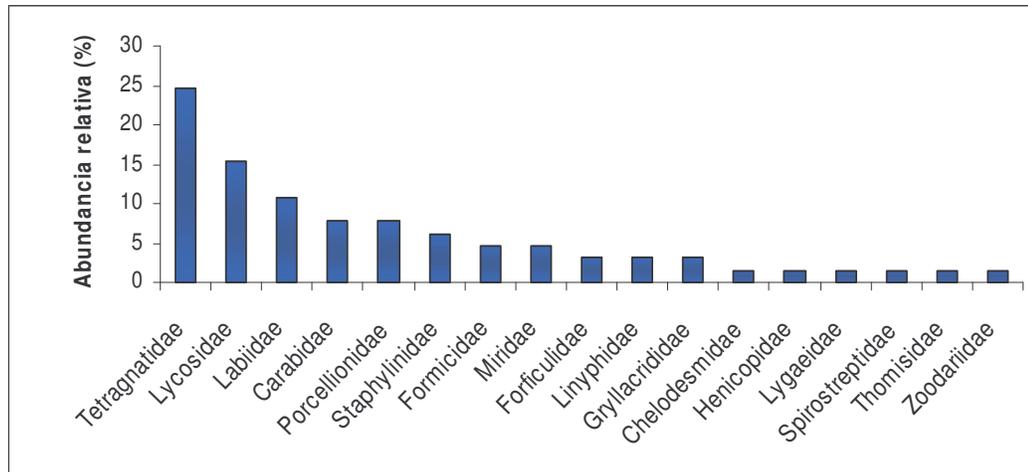
Figura 30. Análisis de Correspondencia Canónica donde se muestran las morfoespecies de estados inmaduros asociadas a los tratamientos (Método del TSBF).

Para el tratamiento 2 se registraron 16 familias; al igual que el T1, la familia con mayor abundancia fue Tetragnatidae (21.11%), seguida de Porcellionidae (16.66%), Staphylinidae (13.33%), Labiidae (12.22%), Lycosidae (7.77%), Cicadellidae (5.55%), Forficulidae (5.55%), Linyphidae (4.44%) y Formicidae (3.33%). Las familias restantes estuvieron representadas en un menor porcentaje (Figura 31b).

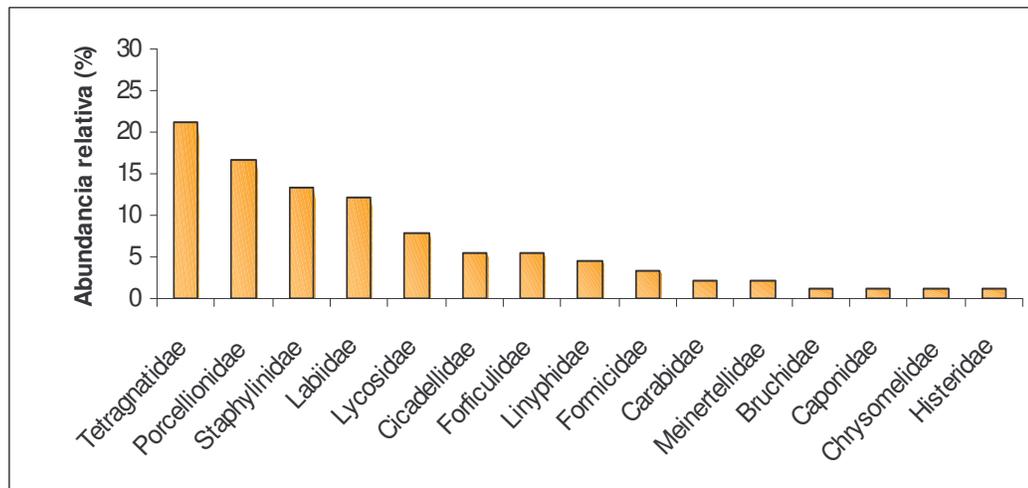
Para el tratamiento 3 se registraron 17 familias, la más abundante fue Staphylinidae (25.97%), seguida de Labiidae (19.48%), Tetragnatidae (14.28%), Carabidae (7.79%), Chrysomelidae (5.19%), Forficulidae (5.19%), Cicadellidae (3.89%) y

Formicidae, Histeridae, Linyphidae y Scarabaeidae (2.59% cada una) . Las familias restantes estuvieron representadas con el 1.29% (Figura 32).

Para el control se registraron solo 2 familias: Tetragnatidae y Cicadellidae, cada una representando el 50%.



a)



b)

Figura 31. Abundancia relativa por familia de la macrofauna edáfica epigea del: a) Tratamiento 1 y b) Tratamiento 2.

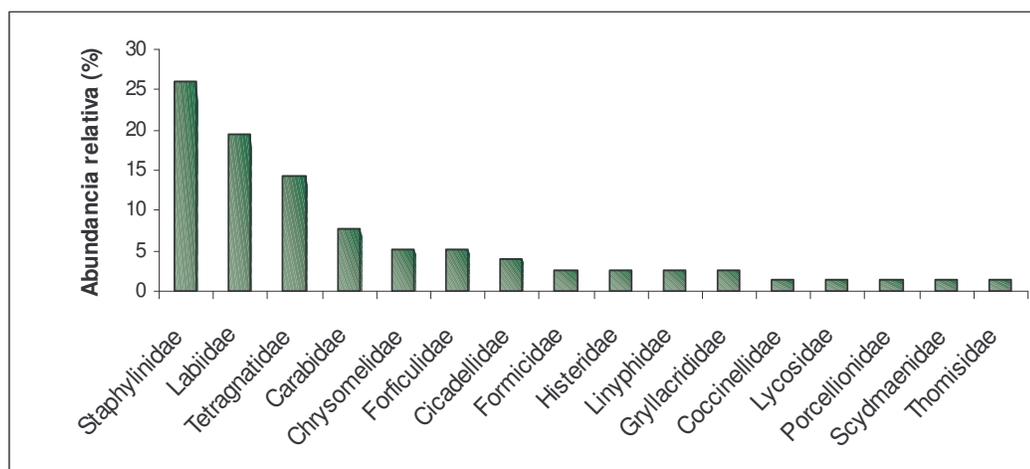


Figura 32. Abundancia relativa por familia de la macrofauna edáfica epigea del tratamiento 3.

8.2.3. 2 Riqueza

El número de morfoespecies registradas por trampas pitfall para el tratamiento 1 es de 25, las más abundantes pertenecen a las familias Tetragnatidae, Lycosidae y Porcellionidae. Para el tratamiento 2, se registraron 28 morfoespecies, donde las más abundantes pertenecen a la familia Porcellionidae, Labiidae, Staphylinidae y Lycosidae. Para el tratamiento 3, se registraron 27 morfoespecies, las más abundantes pertenecen a las familias Staphylinidae, Tetragnatidae, Labiidae y Carabidae (Figura 33).

Para el Control, se registraron 2 morfoespecies, pertenecientes a: Tetragnatidae y Cicadellidae, las dos representadas con el mismo número de individuos.

8.2.3.3 Diversidad

El Índice de Shannon como medida de diversidad fue muy similar entre tratamientos. El tratamiento 2 presentó el mayor valor (H' : 2.94), seguido por el

tratamiento 1 (H' : 2.92) y tratamiento 3 (H' : 2.89). No se presentaron diferencias significativas de los valores entre tratamientos (Figura 34).

El control presentó un valor del índice de Shannon bajo (H' : 0.693). Se encontraron diferencias significativas entre el control y los tratamientos: tratamiento 1 (t : 6.040, $P < 0.05$, gl : 2), tratamiento 2 (t : 6.121, $P < 0.05$, gl : 2) y tratamiento 3 (t : 5.917, $P < 0.05$, gl : 2).

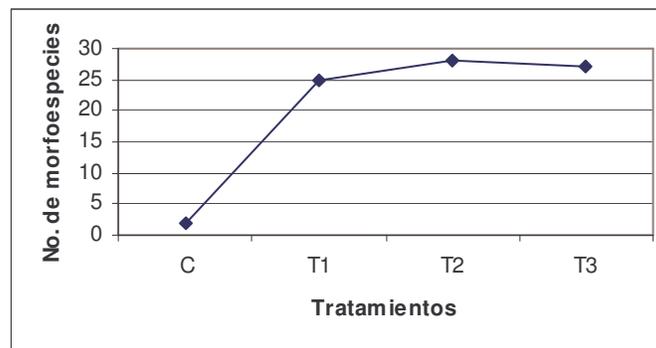


Figura 33. Riqueza de adultos epigeos en los diferentes tratamientos y control en el cuarto muestreo.

8.2.3.4 Equidad

Al igual que la diversidad, la equidad presentó valores muy similares entre tratamientos. El tratamiento 1 presentó la mayor equidad de morfoespecies (0.909), seguido por tratamiento 2 (0.882) y tratamiento 3 (0.87686379). El control presentó valor de 1 (Figura 34).

8.2.3.5 Dominancia

La dominancia explicada por el índice de Simpson es baja en los tres tratamientos. El tratamiento 2 con el valor mayor (D : 0.062), seguido por tratamiento 1 (D : 0.055) y

tratamiento 3 (D: 0.012). No se evidenció diferencias significativas de los valores entre tratamientos (Figura 34).

El control presentó un valor de 0, lo que significa que ninguna morfoespecie ejerce dominio. Se encontraron diferencias significativas entre el control y los tratamientos: T1 (t: 4.781, $P < 0.05$, gl: 2), T2 (t: .678, $P < 0.05$, gl: 2) y T3 (t: 4.692, $P < 0.05$, gl:2).

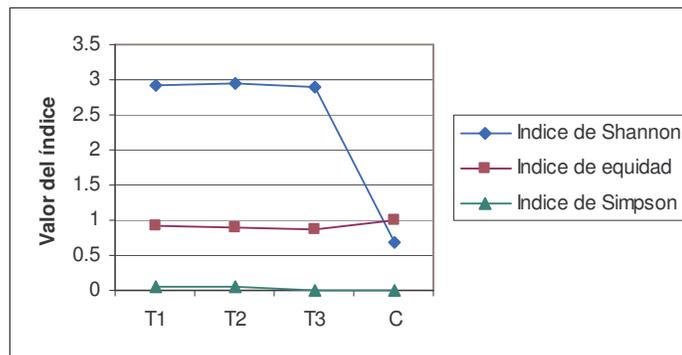


Figura 34. Índice de Shannon, Simpson y equidad de adultos en los diferentes tratamientos y control - trampas pitfall.

8.2.3.6 Similaridad

Cuando se compararon los diferentes tratamientos con el análisis de Bray Curtis para los individuos adultos colectados por trampas pitfall, se encontró que los tratamientos más similares son 1 y 2 (37.36%), sin embargo los valores más bajos se presentaron entre los tratamientos 1 y 2 (27.08%) y los tratamientos 1 y 3 (26.78%). El control respecto a los demás tratamientos presentó valores muy bajos (Figura 35).

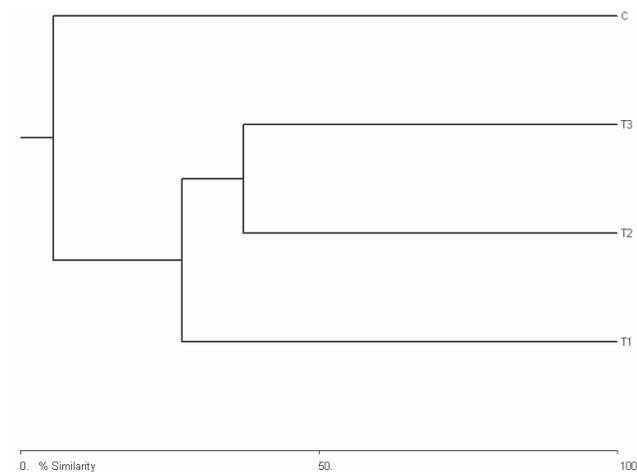


Figura 35. Dendrograma de similaridad de Bray Curtis de los diferentes tratamientos y control en términos de abundancia de morfoespecies, colectados por trampas pitfall.

8.2.3.7 Asociación de especies a los tratamientos

El análisis de Correspondencia Canónica considera el efecto del tratamiento sobre la comunidad de la macrofauna del suelo que es epigea, se realizó sin tener en cuenta el control. En el análisis se identifica que el tratamiento 1 está asociado a 16 morfoespecies, y los tratamientos 2 y 3 asociados a 13 morfoespecies cada uno. Además se identifica que los tratamientos comparten 6 morfoespecies (Figura 36).

8.2.4 Macrofauna edáfica colectada por trampas pitfall (estados inmaduros)

8.2.4.1 Composición y riqueza

En total se colectaron 22 estados inmaduros epigeos en los tratamientos implementados, pertenecientes al Orden Lepidoptera y Coleoptera. En el control no fue colectada ninguna morfoespecie (Figura 37).

Tabla 11. Morfoespecies de estados inmaduros colectados en los tratamientos por las trampas pitfall

Orden	Morfoespecie	T1	T2	T3
Coleoptera	LC 3	2	1	-
	LC 4	1	-	-
Lepidoptera	LL 1	4	-	-
	LL 5	1	-	-
	LL 6	-	1	-
	LL 7	-	-	1
	LL2	7	2	2
Total general		15	4	3

8.2.4.2 Diversidad, equidad y dominancia

El índice de diversidad de Shannon hallado para los estados inmaduros fue mayor para el tratamiento 1 (H' : 1.33), seguido por tratamiento 2 (H' : 1.039) y tratamiento 3 con la menor diversidad (H' : 0.63). No se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 38).

La equidad calculada para los estados larvarios fue alta para todos los tratamientos; el tratamiento 2 con el mayor valor (E :0.94), seguido por el tratamiento 3 (E : 0.91) y por último el tratamiento 1 (E : 0.83) (Figura 38).

El índice de Simpson calculado para los estados inmaduros fue mayor en el tratamiento 3 (D : 0.333), seguido por el tratamiento 1 (D : 0.266) y tratamiento 2 (D :0.166). Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas (Figura 38).

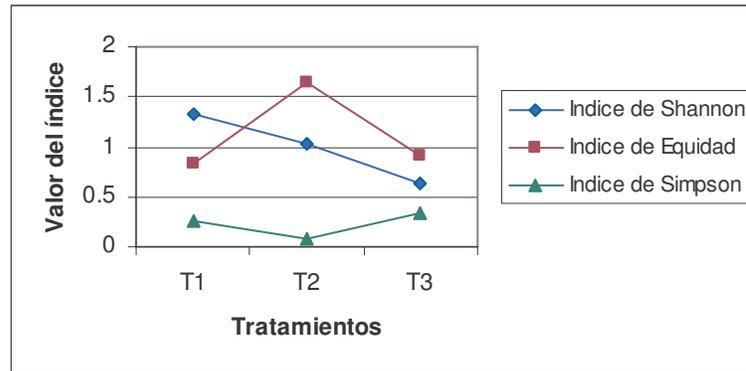


Figura 38. Índice de Shannon, Simpson y equidad de los estados inmaduros en los diferentes tratamientos - trampas pitfall.

9. Discusión

Modificaciones o cambios en la comunidad de la macrofauna edáfica fueron monitoreados para valorar la efectividad de utilizar biosólidos como enmienda orgánica en suelos degradados por la minería a cielo abierto.

Datos relacionados del efecto de los biosólidos sobre la macrofauna edáfica son pocos, dado que la mayoría se han centrado en el estudio de acumulación de metales pesados en las especies y en el suelo (Larsen *et al.*, 1996; Barrera *et al.* 2001; Crouau *et al.*, 2002; Petersen *et al.*, 2003).

Se ha documentado que la adición de biosólidos puede promover el establecimiento y la actividad de la fauna edáfica, al incrementar la disponibilidad de alimento y transformar el hábitat (Al-assiuty *et al.*, 2000; Barrera *et al.*, 2001; Minor & Norton, 2004); además se ha definido que en las canteras donde se ha eliminado el suelo, los biosólidos actúan como substrato que permite una mejor sobrevivencia y acumulación de especies colonizadoras, ya que la fauna gasta una parte de su ciclo

de vida (huevo, larva, pupa) en el suelo y también muchos adultos se refugian en él (Parmenter & MacMahon, 1987; IGAC, 1995).

Los resultados de este estudio para los diferentes tratamientos mostraron que el repoblamiento de los grupos pertenecientes a la macrofauna edáfica fue acelerado comparado con el control, además con el transcurso del tiempo la diversidad y riqueza aumentaron, lo cual está acorde con lo encontrado en otras investigaciones de sucesión y colonización de invertebrados del suelo en áreas mineras (Majer, 1985; Jansen, 1997; Madden & Fox, 1997; Majer & Nichols, 1998).

Los grupos de la macrofauna edáfica tanto de adultos como de los estados inmaduros colonizadores de los diferentes tratamientos, presentaron una baja similitud con los grupos pertenecientes a las zonas adyacentes estudiadas en este trabajo; debido a que se encontró que solo tres morfoespecies de las zonas colonizaron los tratamientos. Dichas morfoespecies pertenecen a las familias Enchytraeidae, Porcellionidae y Spirostreptidae, que según literatura son consideradas de ambientes con buenos contenidos de materia orgánica (Jackson & Raw, 1975; Coleman & Crossley, 1996; Brussaard *et al.*, 1997).

En los estudios realizados de sitios restaurados y rehabilitados, se ha encontrado que la recolonización inicial es dada por especies raras de áreas no disturbadas o especies inmigrantes de áreas similarmente disturbadas, a una considerable distancia (Parmenter & MacMahon, 1987; Longcore, 2003). En este estudio los colonizadores especialmente pertenecientes a la familia Staphylinidae y Carabidae provienen de la zona patios (Alvarez, 2005). Dicha zona presenta condiciones muy similares a la de los tratamientos en lo que respecta al contenido de materia orgánica y textura de substrato (arenosa). Sin embargo, otras especies colonizadoras provienen de la Zona de depósito de estériles que es la más cercana al área experimental (aproximadamente 3 metros).

Diferencias fueron observadas entre el control y los tratamientos, debido a que en el control no se presentó colonización de ninguna especie, lo cual confirma la hipótesis que la aplicación de biosólidos estimula el repoblamiento de la macrofauna edáfica y por ende las funciones que cumplen en el ecosistema.

La diversidad y riqueza en el segundo (3 meses) y tercer (6 meses) muestreo fueron bajas, con alta dominancia en todos los tratamientos, debido a la colonización en gran abundancia de la familia Enchytraeidae.

Se sabe que los suelos que presentan mayor contenido de materia orgánica y un pH ácido pueden presentar poblaciones de Enchytraeidae más grandes, como se presenta en las áreas adyacentes (Jackson & Raw, 1975; IGAC, 1995; Brussaard *et al.*, 1997). Algunas investigaciones han demostrado que la aplicación de biosólidos como abono o enmienda orgánica favorece la actividad de dichos organismos (Adesodun *et al.*, 2005). Cuando el alimento es limitado, es decir la materia orgánica, la aplicación de biosólidos puede permitir el establecimiento de las poblaciones más rápidamente, tal como se presenta en esta investigación donde la abundancia de la morfoespecie E1 aumenta a medida que se incrementa la dosis de biosólidos, razón por la cual el análisis de correspondencia asocia esta morfoespecie de la familia Enchytraeidae al tratamiento 3. Sin embargo, para el muestreo 3 en el tratamiento 2 se presentó la mayor abundancia que los demás tratamientos.

Cuando se analizó el comportamiento de la familia Enchytraeidae a través del tiempo se puede apreciar que en el muestreo 4 disminuye en todos los tratamientos, lo cual pudo ser causado por la estacionalidad, competencia o depredación. Sin embargo, sus poblaciones se mantienen más altas en los tratamientos con mayor dosis de biosólidos (IGAC, 1995).

En cuanto a la diversidad y riqueza encontrada en los tratamientos fue inversamente proporcional a las dosis de biosólidos, es decir, la menor dosis de biosólidos presentó

la mayor diversidad y riqueza de especies, por lo cual el análisis de correspondencia canónica asocio el mayor número de morfoespecies al tratamiento 1.

Algunas investigaciones han hallado que la recolonización de los invertebrados del suelo está muy correlacionada con la vegetación, en cuanto al porcentaje de cobertura, densidad de los estratos, cantidad de hojarasca, desaparición de suelo desnudo y riqueza, diversidad y equidad de especies (Kichner, 1977; Majer, 1985; Parmenter *et al.*, 1991; Greenslade & Majer, 1993; Majer, 1992; Majer & Nichols, 1998; Burger *et al.*, 2002)

Ochoa (2005) para la misma área experimental, encontró que el tratamiento que tiene mayor diversidad y riqueza de plantas fue el tratamiento 1, además fue el segundo en porcentaje de cobertura, lo que concuerda con la alta diversidad, riqueza y equidad hallada de la macrofauna edáfica, siguiendo un orden descendente el tratamiento 2 que presentó la segunda diversidad de plantas y la mayor cobertura y por último el tratamiento 3 presentó la menor diversidad y cobertura de vegetación, y a su vez la menor diversidad y equidad de la macrofauna edáfica.

En el muestreo 4 la segunda familia más abundante es Staphylinidae especialmente en el tratamiento 1 y 2, como lo asocia el análisis de correspondencia canónica. De acuerdo a la literatura es una familia que vive en las grietas y superficie del suelo y su estructura poblacional depende del tipo de sustrato y tipo de vegetación. Su capacidad de colonización se debe a que son buenos voladores, además los que presentan pequeños tamaños (como las morfoespecies presentes en los tratamientos) son llevados por el viento a grandes distancias (Borror *et al.*, 1992; Bohac, 1999).

La mayor parte de las especies de esta familia son reportadas como depredadoras de artrópodos del suelo (nematodos, ácaros, colémbolos, pequeños insectos y larvas), por lo tanto la colonización de estos individuos posiblemente pudo ser causada por la disponibilidad de alimento, ya que se ha confirmado en estudios que las

poblaciones de colémbolos y ácaros son incrementadas con la aplicación de biosólidos (Al-assiuty *et al.*, 2000; Cole *et al.*, 2001; Minor & Norton, 2004). Además esta familia al igual que Enchytraeidae es favorecida por el contenido de humedad del suelo o substrato (Bohac, 1999; Good, 1999).

El aumento en la población de Staphylinidos es acorde con los estados larvarios que se presentaron de esta familia, ya que donde se encuentran más adultos (T1) es donde hay mayor abundancia, diversidad, riqueza y equitatividad de estados inmaduros. Al igual que los adultos los estados inmaduros presentan los mismos hábitos alimenticios y según la literatura son relativamente comunes en el suelo y tiene gran importancia pedobiológica (IGAC., 1995; Borror *et al.*, 1992)

También en este muestreo 4 se establecen además de los Enchytreidos otros grupos saprófagos, como la familia Porcellionidae, Labiidae y Forficulidae, estas dos últimas pueden migrar fácilmente por su capacidad de volar (Borror *et al.*, 1992); además de los herbívoros como Chrysomelidae y depredadores como arañas de la familia Tetragnatidae y chilopodos de la familia Henicopidae. Aunque estas familias son epigeas se tuvieron en cuenta en las muestras de suelo; y su presencia en este muestreo se debe a que la vegetación presente puede sostener un mayor grupo de individuos, al generar un microclima adecuado y proveer alimento por la hojarasca (Sousa, 1984; Larsen *et al.*, 1996).

Se puede decir que los primeros colonizadores de la macrofauna edáfica son aquellos capaces de explotar el contenido de materia orgánica aportado por los biosólidos, seguido por depredadores que se alimentan de los grupos favorecidos y por último de omnívoros y herbívoros.

En cuanto a los tratamientos que generan el mejor repoblamiento de la macrofauna edáfica, se puede decir que son los tratamientos 1 y 2 (menores dosis de biosólidos), ya que presentaron mayor diversidad y riqueza de especies, lo que sugiere un

desarrollo y mejor restablecimiento de las funciones ecológicas de la macrofauna edáfica, al contrario de lo presentado en el tratamiento 3, que aunque presenta el mayor número de individuos, presenta la menor diversidad, riqueza y a alta dominancia.

9.1 Distribución vertical de las familias más abundantes y estados inmaduros

Del cálculo del índice de Usher para la familia Enchytraeidae se deduce que los desplazamientos verticales pueden alcanzar una profundidad mayor a los 15 cm durante el muestreo 2 y 3, esto pudo ser debido a que existe una tendencia a que los organismos más pequeños son más abundantes en las capas más profundas del suelo, además de reflejar cambios en la humedad y la distribución de disponibilidad de alimento. Guacaneme (2005) para la misma área experimental en estos dos muestreos, encontró que el porcentaje de carbono orgánico (alimento) y porcentaje de humedad fue mayor en la capa 15-30 cm en todos los tratamientos (Jackson & Raw, 1975; Frouz & Ali, 2004).

Para el cuarto muestreo la vegetación establecida y el desarrollo de una capa de hojarasca (aporte de materia orgánica), posiblemente disminuyeron la necesidad de migrar las especies de Enchytraeidae y Staphylinidae a las capas más profundas del sustrato, ya que se generan mejores condiciones microclimáticas que protegen a los individuos contra la desecación, además de proporcionar alimento (Frouz & Ali, 2004).

Al igual que los adultos de la familia Staphylinidae, los estados larvarios principalmente de esta familia se distribuyen en la capa superficial del perfil, lo que concuerda con la literatura (Kuhnelt *et al.*, 1976). Además esta distribución puede deberse a que se registra que se encuentran en los mismos lugares que los adultos y se alimentan de los mismos elementos (Borror *et al.*, 1992).

9.2 Técnica Pitfall

El éxito de los colonizadores especialmente de los epigeos, no solo es beneficiado por fuentes disponibles de alimento, sino también por cambios en el ambiente abiótico (temperatura, régimen de humedad) y biótico (predación y competencia) (Parmenter *et al.*, 1991).

Para el caso del ambiente abiótico puede favorecerse con el establecimiento de la vegetación al generar sombra, refugio, hábitat, alimento, mejorar el microclima y las condiciones humedad (Muzika & Twery, 1997), tal como se presenta en los tratamientos 1, 2 y 3 que presentaron mayor diversidad y cobertura de vegetación comparados con el control (Ochoa, 2005), razón que puede explicar las diferencias significativas que se encontraron entre el control y los tratamientos.

Los artrópodos que presentaron mayor abundancia para los tratamientos 1 y 2 fueron las arañas especialmente de la familia Tetragnatidae, y para el tratamiento 3 la familia Staphylinidae, lo que puede deberse a la oferta de alimento presente en la superficie del substrato, ya que son depredadores de otros grupos de invertebrados. (Wheater, 2000; Longcore, 2003).

La presencia de familias de artrópodos como Labiidae, Forficulidae, Porcellionidae, Chelodesmidae y Spirostreptidae puede ser debido a que el establecimiento de la vegetación puede generar aporte de materia orgánica, importante para el alimento de estos grupos al ser saprófagos (Brown & Hyman, 1986).

Familias como Chrysomelidae, Gryllacrididae, Cicadellidae, Miridae, Lygaeidae y larvas de Lepidoptera, se ven favorecidos en los tratamientos, ya que la vegetación en el cuarto muestreo se encontraba cubriendo gran parte de la superficie de los tratamientos y por tanto existe una provisión de alimento para estas familias que son herbívoras. Caso que no se presentó en el control, ya que presentaba la mayor parte

del área con suelo desnudo.

Gran parte de las especies colonizadoras de los tratamientos y colectadas por la técnica pitfall, han sido colectadas en el área más cercana (Zona de depósito de estériles) Alvarez (2005).

Se observaron diferencias entre el control y los tratamientos lo cual pudo ser debido a que el control presentó la menor diversidad, riqueza y cobertura vegetal. Sin embargo, no se evidencian diferencias entre los tratamientos en diversidad, riqueza y equidad de especies por medio de esta técnica pitfall, esto puede deberse a que los animales presentes son muy móviles y las áreas de las parcelas son pequeñas, razón por la que supone que puede haber una mezcla de especies de los tratamientos.

10. Conclusiones

- Se evidenció a través de la macrofauna edáfica que los biosólidos pueden ser una buena alternativa de enmienda orgánica para el restablecimiento del suelo en áreas disturbadas por extracción de materiales a cielo abierto.
- En las menores proporciones de biosólidos (tratamientos 1 y 2) se observó que la diversidad y riqueza de especies fueron favorecidas, mientras que en la proporción de biosólidos mayor (tratamiento 3) se vio favorecida la abundancia.
- La macrofauna edáfica colectada en los diferentes tratamientos durante los primeros nueve meses presentó una baja similitud con las áreas adyacentes muestreadas.

11. Recomendaciones

- Realizar trabajos con periodos de muestreo mayor para evaluar el cambio de las

especies de la macrofauna edáfica en los sustratos implementados.

- Realizar investigaciones que relacionen el repoblamiento de la macrofauna edáfica y el restablecimiento de la estructura del suelo o sustratos implementados.
- Realizar estudios con dosis mayores de biosólidos con el propósito de evaluar la concentración que limite el repoblamiento de la macrofauna edáfica.
- Utilizar en futuros trabajos el método de captura de trampas pitfall en diseños que presenten mayor separación de unidades experimentales.
- Realizar trabajos de investigación que incluyan el repoblamiento de los grupos pertenecientes a la mesofauna edáfica.

12. Referencias

Adesodun, J., D. Davidson and D. Hopkins. 2005. Micromorphological evidence for changes in soil faunal activity following application of sewage sludge and biocide. *Applied Soil Ecology*. 29: 39-45.

Alcañiz, J., L. Comellas y M. Pujolá. 1996. Manual de Restauració d'activitats extractives amb fangs de depuradora. Recuperació de terrenys marginals. Produccions, ICGSL. Barcelona. Pp: 68.

Alcañiz, J., L. Comellas, M. Pujolá y E. Serra. 1998. Utilización de lodos de depuración en la rehabilitación de suelos de canteras. *Ingeopres*. 59: 28-34

Al-assiuty, A., M. Khalil and H. Abdel-Lateif. 2000. Effects of dry sludge application on soil microarthropod communities in a reclaimed desert ecosystem. *Pedobiología*. 44: 567-578.

Alvarez, A. 2005. Estudio de la comunidad de Coleópteros en áreas con diferente condición de abandono en la cantera Soratama. Localidad Usaquén. Bogotá. D.C. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana. Biología. Pp: 96.

Amat, G. y L. Soto. 1988. Efectos del uso actual del suelo sobre la macrofauna edáfica en la Región del Guejar (Reserva Natural Integral la Macarena, Meta). *Perez Arbelaezia*. 2 (6-7):44-67.

Ayala, F., L. Vadillo, C. Lopez, M. Aranburu, M. Escribano, R. Escribano, S. Manglano, C. Mataix y J. Toledo. 1989. Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. Instituto Geominero de España. Segunda Edición. Madrid. Pp: 201- 215.

Barrera, I., P. Andrés and J. Alcañiz. 2001. Sewage Sludge Application on Soil: Effects on Two Species Earthworm species. *Water, Air, and Soil Pollution*. 129: 319 – 332.

Barrera, I y H. Ríos. 2002. Acercamiento a la Ecología de la Restauración. *Pérez Arbelaezia* 13: 33-46.

Barros, E., B. Pashanasi, R. Constantino and P. Lavelle. 2002. Effects of land use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biology and Fertility Soils*. 35: 338-347.

Bazzaz, F. 1983. Characteristics of Populations in Relation to Disturbance in Natural and Man-Modified Ecosystems. Pp: 259-275: In: Mooney, H. And M. Godron. *Disturbance and Ecosystems: components of response*. Springer- Verlag. Berlín.

- Beeby, A. 1994. *Applying Ecology*. Chapman & Hall. London. Pp: 441.
- Berry, E. 1994. Earthworms and other fauna in the soil. Pp: 61-89. In: Hatfield, J., B. Stewart (eds): *Soil Biology. Effects on soil quality*. Lewis Publishers.
- Bogotana de Aguas y Saneamiento (BAS). 2002. Situación Actual y futura del aprovechamiento de los biosólidos de la PTAR El Salitre en el Relleno Sanitario Doña Juana. Documento Interno. Bogotá. Pp: 1-5.
- Bohac, J. 1999. Staphylinid beetles as bioindicators. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 74: 357-372.
- Borror, J., C. Triplehorn and N. Johnson. 1992. *A introduction to the study insects*. Sixth edition. Hartcourt Brace College Publishers. United States of America. Pp: 875
- Bradshaw, A.1984. The importance of soil ecology in restoration science. Pp: 33-66. In: Bradshaw. A (ed). *Ecosystem Restoration*. Elsevier.
- Bradshaw, A. 1997. Restoration of mined lands – using natural processes. *Ecological Engineering*. 8: 225-269.
- Bradshaw, A. 2002. Introduction and philosophy. Pp. 3-9. In: Perrow, M. and A. Davy (eds). *Handbook Ecological Restoration*. Vol.1. University Press. Cambridge. UK.
- Brown, V. And Hyman. 1986. Successional communities of plants and phytophagous coleoptera. *The journal of ecology*. 74: 963-975.

Brown, S. and A. Lugo. 1994. Rehabilitation of Tropical Lands: A Key to Sustaining Development. *Restoration Ecology*. 2 (2): 97 – 111.

Brown, G., C. Fragoso, I. Barois, P. Rojas, J. Patrón, J. Bueno, A. Moreno; P. Lavelle, V. Ordaz y C. Rodríguez. 2001. Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana*. Número especial 1: 79-110.

Brown, G., A. Pasini, N. Benito, A. Aquino and M. Fernandes. 2001b. Diversity and functional role of soil macrofauna communities in Brazilian no tillage agroecosystems: a preliminary analysis. *International Symposium on managing biodiversity in agricultural ecosystems*. Montreal. Canadá. 1-20.

Brussaard, L., V. Behan-Pelletier, D. Bignell, V. Brown, W. Didden, P. Folgarait, C. Fragoso, Freckman, V.S.R. Gupta, T. Hattori's, D.L. Hawksworth, C. Klopatek, P. Lavelle, D. Molloch, J. Rusek, B. Soderstrom, J. Tiedje and R. Virginia . 1997. Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil. *Ambio*. 26 (8): 563-570.

Burbidge, A., K. Leicester, S. McDavitt and J. Majer. 1992. Ants as indicators of disturbance at Yanchep National Park, Western Australia. *Journal of the Royal Society of Western Australia*. 75: 89-95.

Burger, J., R. Redak, E. Allen, J. Rotenberry and M. Allen. 2002. Restoring arthropod communities in Coastal Sage Scrub. *Conservation Biology*. 17 (2): 460-467.

Chamorro, C. 1990. Los páramos que circundan la ciudad de Bogotá. *Investigaciones*. 2 (1): 11-45.

Clewell, A. 1993. Ecology, Restoration Ecology, and Ecological Restoration. *Restoration Ecology*. 1: 141

Cole, L., D. McCracken, G. Foster and M. Aitken. 2001. Using Collembola to assess the risks of applying metal-rich sewage sludge to agricultural land in western Scotland. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 83: 177-189.

Coleman, D. and D. Crossley. 1996. *Fundamentals of soil ecology*. Academic Press. San Diego California. Pp: 205 .

Correa, A. 2000. *La explotación Racional de Canteras y su Incidencia en el Medio Ambiente. Restauración de Ecosistemas Alterados por la Explotación Minera*. IICER 2000. Bogotá. Pp: 13.

Correa, A. 2000b. *Situación Actual de la Explotación de Canteras en El Distrito Capital*. *Revista Ingeniería e Investigación*. (46): 45-55.

Correa, A. 2003. *La minería a cielo abierto en el contexto del desarrollo y su impacto sobre el medio ambiente. El caso de Colombia, el caso de Bogotá, D.C. Curso Internacional de Restauración Ecológica de Canteras y el Uso de Biosólidos*. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Pp: 1-26.

Correa, A. y J. Correa. 2003. *Recuperación morfológica y ambiental de la antigua cantera Soratama*. IX. Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá. Pp: 34.

Crouau, Y., C. Gisclard and P. Perotti. 2002. The use of *Folsomia candida* (Collembola, Isotomidae) in bioassays of waste. *Applied soil ecology*. 19: 65-70.

Culliney, T., D. Pimentel and D. Lisk. 1986. Impact of chemically contaminated sewage sludge on the collard arthropod community. *Environmental Entomology*. 15 (4): 826-833.

Curry, J. 1998. Factors Affecting earthworm abundance in soils. Cap: 3. Pp. 37-64
In: Edwards, C (ed). Earthworm Ecology. St. Lucie Press. USA.

Daguer, G. 2003. Gestión de biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre. Curso Internacional de Restauración Ecológica de Canteras y el Uso de Biosólidos. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

Delgado, A. y M. Mejía. 2000. Diagnóstico de la actividad extractiva en la Localidad Usaquén. Relación de las actividades extractivas y situación actual y análisis de las áreas afectadas por minería dentro de la Localidad Usaquén. Contrato 078/00. Alcaldía Mayor. Departamento Técnico Administrativo (DAMA). Documento Interno. Bogotá. Pp: 21.

Delgado, A. y M. Mejía. 2002. Actividades extractivas en el nuevo perímetro urbano de Bogotá. Contrato 078/00 (DAMA). Documento Interno. Bogotá. Pp: 51.

Fernández, F., E. Palacio, W. MacKay y E. MacKay. 1996. Introducción al estudio de las hormigas (Hymenoptera: Formicidae) de Colombia. Cap: X. Pp: 349-362. En: Andrade, M., G. Amat y F. Fernández (eds). Insectos de Colombia. Estudios ecológicos. Editorial Guadalupe Ltda. Bogotá.

Foddai, D., A. Minelli and L. Pereira. 2002. Chilopoda. Geophilomorpha. Pp: 459-474. In: Joachin Adis. Amazonian Arachnida and Myriapoda. Pensoft Publishers. Bulgaria.

Foddai, D., A. Schileyko and A. Minelli. 2002. Chilopoda. Lithobiomorpha. Pp: 475-478. In: Joachin Adis. Amazonian Arachnida and Myriapoda. Pensoft Publishers. Bulgaria.

Forman, R. and M. Godron. 1986. *Landscape Ecology*. Jhon Wiley & Sons. New York. Pp: 619.

Fragoso, C., P. Rojas and G. Brown. 1999. The role of soil macrofauna in the paradigm of tropical soil fertility: some research imperatives. Pp: 421-428. In: Siqueira, J., F. Moreira, A. Lopes, L. Guilherme, V. Faquin, J. Carvalio. *Soil Fertility, Soil Biology and plant nutrition interrelationships*. Universidad Federal de Lavras.

Fragoso, C., P. Reyes y P. Rojas. 2001 La importancia de la biota edáfica en México. *Acta Zoológica Mexicana*. Número especial 1: 1-10.

Frouz, J., and A. Ali. 2004. Soil macroinvertebrates along a successional gradient in central Florida. *Florida Entomologist*. 87 (3): 386-390.

Fundación Restauración de Ecosistemas Tropicales (FRET). 2001. *Proyecto de Utilización de Biosólidos de Depuración en la Rehabilitación de Suelos*. Bogotá.

Gibson, D. 2002. *Methods in comparative plant population ecology*. Oxford. University Press. USA. Pp: 344.

Glenn-Lewin, D., R. Peet and T. Veblen. 1992. Chapman & Hall. London. Pp: 352.

Good, J. A. 1999. Recolonisation by Staphylinidae (Coleoptera) of old metalliferous tailings and mine soils in Ireland. *Biology and Environment*. 99B (1): 27-35.

Greenslade, P., and J. Majer. 1993. Recolonization by Collembola of rehabilitated bauxite mines in Western Australia. *Australian Journal of Ecology*. 18: 385-394.

Guacaneme, S. 2005. Efecto de la aplicación de biosólidos en diferentes proporciones en la recuperación de un suelo disturbado por actividad extractiva. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana. Ecología. Pp: 110.

Hernández, E. 1996. Explotación de Canteras y Medio Ambiente. Programas de Restauración y usos futuros de terrenos afectados por actividades mineras. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Pp: 23.

Higgs, E. 1997. What is good ecological restoration?. *Conservation Biology*. 11(2):338-348.

Hobbs, R. and D. Norton. 1996. Towards a Conceptual Framework for Restoration Ecology. *Restoration Ecology*. 4 (2): 93 – 110.

Hoffman, R., S. Golovatch, J. Adis and J. de Morais. Diplopoda. Pp: 505-533. In: Joachin Adis. *Amazonian Arachnida and Myriapoda*. Pensoft Publishers. Bulgaria.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Subdirección Agrológica.. 1995. *Suelos de Colombia*. Bogotá. Colombia Pp: 622.

Jackson, R. and F. Raw. 1975. *Life in the soil*. The Camelot Press. London. Pp: 59

Jansen, A. 1997. Terrestrial invertebrate community structure as an indicator of the success of a tropical rainforest restoration project. *Restoration Ecology*. 5(2): 115-124.

Kaston, B. 1978. *How to know the spiders*. Third edition. Mc. Graw Hill. United States of America. Pp: 272.

Kirchner, T. 1977. The effects of resource enrichment on the diversity of plants and arthropods in a shortgrass prairie. *Ecology*. 58 (6): 1334-1344.

Kuhnelt, W., N. Walker, J. Butcher and C. Laughlin. 1976. *Soil Biology*. London. Pp: 215.

Larsen, K., F. Purrington, S. Brewer, and D. Taylor. 1996. Influence of sewage sludge on the ground beetle (Coleoptera: Carabidae) fauna of an old – field community. *Environmental Entomology*. 25 (2): 452-459.

Lavelle, P., C. Gilot, C. Fragoso and B. Pashanasi. 1994. Soil fauna and sustainable land use in the humid tropics. Pp: 291-308. In: Greenland D.J. and I. Szabolcs (eds). *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CAB. Budapest Hungary.

Lavelle, P., M. Dangerfield, C. Fragoso, V. Eschenbrenner, D. Lopez, B. Pashanasi and Brussaard. 1994b. The Relationship Between Soil Macrofauna and Tropical Soil Fertility. Pp: 137-169. In: Woomer, W.L and M.J. Swift. *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. TSBF. John Wiley & sons-Sayce-TSBF.

Lavelle, P., A. Chauvel and C. Fragoso. 1995. Faunal activity in acid soils. Pp. 201-211. In: R.A. Date *et al* (eds). *Plant Soil Interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

Lawrence, J., A. Hastings, m. Dallwitz, T. Paine and E. Zurcher. 1999. Beetle larvae of the world. A program interactive identification and information retrieval. Division of Entomology. Intkey Version 5.8. Edition 1.06. Canberra. Australia.

Levings, S., and D. Windsor. 1982. Seasonal and annual variation in litter arthropod populations. pp: 346-397. In: Leigh, E., R. Stanley and D. Winsor (Eds). *The*

ecology of a tropical forest. Seasonal Rhythms and long term changes. Smithsonian Institution Press. Washington. p 468.

Longcore, T. 2003. Terrestrial arthropods as indicators of ecological restoration success in Coastal Sage Scrub (California, U.S.A). *Restoration Ecology*. 11 (4): 397-409.

Madden, K., and B. Fox. 1997. Arthropods as indicators of the effects of flouride pollution on the succession following sand mining. *The Journal of Applied Ecology*. 34 (5): 1239-1256.

Magurran, E. 1989. *Diversidad ecológica y su medición*. Primera Edición. Ediciones Vedra. Barcelona. España. Pp: 200.

Majer, J. 1985. Recolonization by ants of rehabilitated mineral sand mines on North Stradbroke Island, Queensland, with particular reference to seed removal. *Australian Journal of Ecology*. 10: 31-48.

Majer, J. 1992. Ant recolonisation of rehabilitated bauxite mines of Pocos Caldas, Brazil. *Journal of Tropical Ecology*. 8 (1): 97-108.

Majer, J., and G. Nichols. 1998. Long-term recolonization patterns of ants in Western Australian rehabilitated bauxite mines with reference to their use as indicators of restoration success. *Journal of Applied Ecology*. 35: 161-182.

Marashi, A. and J. Scullion. 2003. Earthworm cast form stable aggregates in physically degraded soils. *Biology and Fertility Soils*. 37: 375-380.

Milton, S. 2001. *Estadística para biología y ciencias de la salud*. Tercera Edición. . Mac Graw Hill. Madrid. Pp. 592.

Minor, M. and R. Norton. 2004. Effects of soil amendments on assemblages of soil mites (Acari: Oribatida, Mesostigmata) in short – rotation willow plantings in central New York. *Can. J. For. Res.* 34: 1417 –1425.

Munshower, F.1994. *Disturbed Land Revegetation*. Lewis Publishers. United States of America. Pp: 265.

Muzika, R., and M. Twery. 1997. Early season activity characteristics of terricolous spider families (Araneae) in a Appalachian oak-mixed hardwood forest. *Environmental Entomology*. 26 (3): 497-506.

Oliver, I. and A. Beattie. 1996. Invertebrate Morphospecies as surrogates for species: A case study. *Conservation Biology*. 10 (1): 99-109.

Ochoa, A. 2005. Efecto de la aplicación de biosólidos a diferentes proporciones como enmienda orgánica en el desarrollo de la vegetación en la cantera Soratama. Localidad de Usaquén. Bogotá D.C. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana. Ecología. Pp: 97.

Ortiz, 1992. *Derecho de minas*. Editorial Temis. Bogotá. Pp: 443.

Parmenter, R., J. MacMahon. 1987. Early successional patterns of arthropod recolonization on reclaimed strip mines in Southwestern Wyoming: the ground-dwelling beetle fauna (Coleoptera). *Environmental Entomology*. 16 (1): 168-177.

Parmenter R., J. MacMahon and C. Gilbert. 1991. Early successional patterns of arthropod recolonization on reclaimed wyoming strip mines: The grasshoppers (Orthoptera: Acrididae) and allied fauna (Orthoptera: Gryllacrididae, Tettigonidae). *Environmental Entomology*. 20(1): 135-142.

Petersen, S., K. Henriksen, G. Mortensen, P. Krogh, K. Brandt, J. Sorensen, T. Madsen, J. Petersen and C. Gron. 2003. Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility. *Soil & Tillage Research*. 72: 139-152.

Ramírez, A. 1999. *Ecología Aplicada: Diseño Análisis Estadístico*. Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. pp. 325.

Salamanca, B. y G. Camargo. 2002. *Protocolo Distrital de Restauración Ecológica*. DAMA. Bogotá. Pp: 164-170.

Sánchez, J., O. Moreno y J. Gamba. 2003. *Caracterización de la vegetación y suelos en la Cantera Soratama – Usaqué*. Documento Interno (DAMA). Bogotá. Pp: 202.

Schileyko, A. Chilopoda. Scolopendromorpha. Pp: 479-500. In: Joachin Adis. *Amazonian Arachnida and Myriapoda*. Pensoft Publishers. Bulgaria.

Schoeman, A., and R. Jocqué. 1997. *African spiders. An identification Manual*. Printed Ultra Litho. South Africa. Pp: 392.

Scullion, J. 1992. Re-establishing life in restored topsoils. *Land Degradation & Rehabilitation*. 3: 161-168.

Sort, X., and M. Alcañiz. 1996. Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries. *Land Degradation & Development*. 7: 69-76.

Sort, X., and M. Alcañiz. 1999. Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation & Development*. 10: 3-12.

Sousa, W. 1984. The role of disturbance in natural communities. *Annual Review of Ecological Systematics*. 15: 353-391.

Sousa, W. 1985. Disturbance and Patch Dynamics on Rocky Intertidal Shores. Cap 7. Pp: 101-124. In: Pickett, S.T.A and P. S. White (eds). *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press. San Diego.

Sutherland, W. 1996. *Ecological census handbook*. Cambridge University Press. Great Britain. Pp: 336.

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.

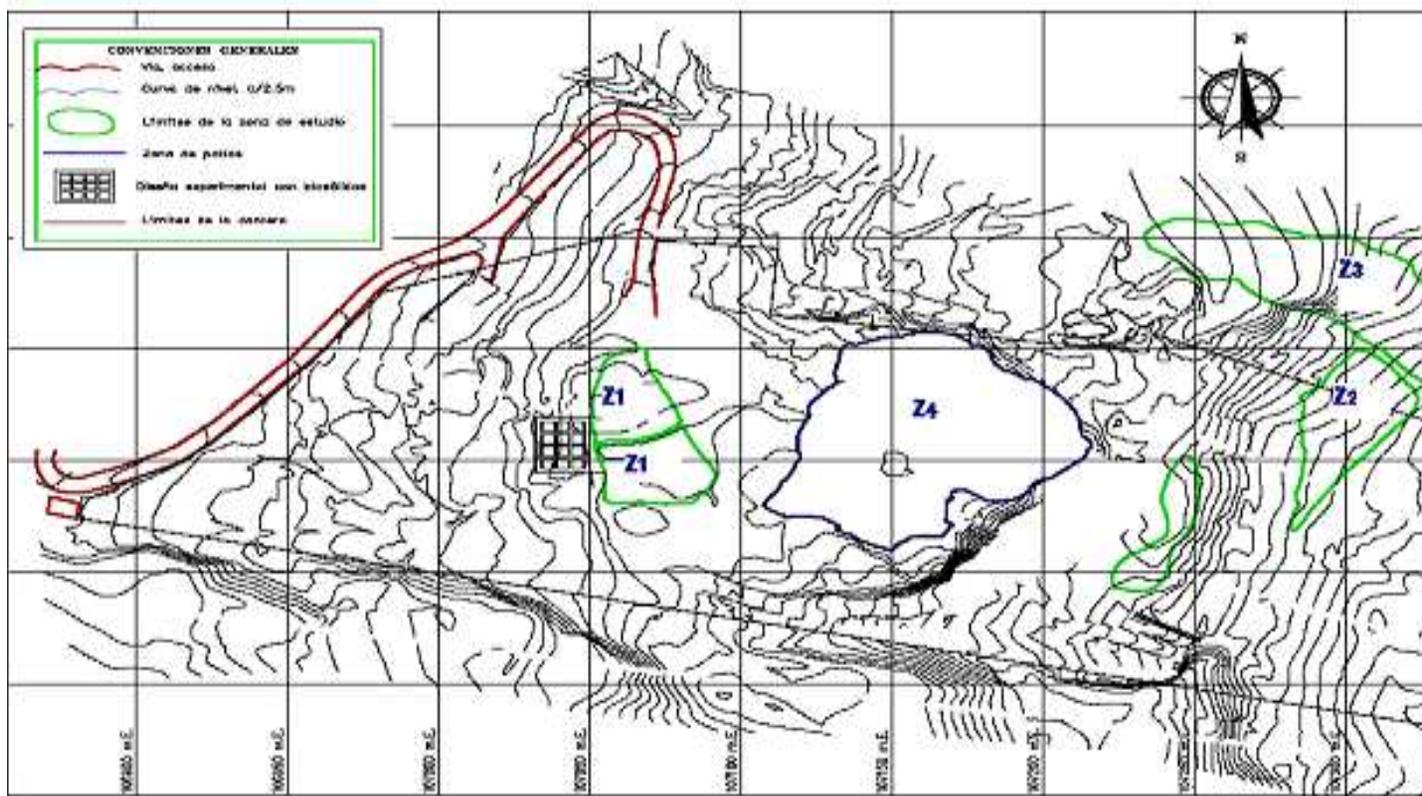
Vadillo, L., C. López, M. Escribano, S. Manglano, C. Mataix y J. Toledo. 2000. Guía de restauración de graveras. Preparación del sustrato. Cap: 7. Pp: 65-83. Segunda edición. Madrid.

Wheater, C., W. Cullen & J. Bell. 2000. Spider communities as tools in monitoring reclaimed limestone quarry landforms. *Landscape Ecology*. 15: 401-406.

White, P. and S. Pickett. 1985. Natural Disturbance and Patch Dynamics an Introduction. Cap. 1. Pp: 3-13. In: Pickett, S.T.A and P. S. White (eds). *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press. Inc. San Diego.

ANEXOS

Anexo 1. Mapa de ubicación de las zonas de la cantera Soratama: Depósito de estériles (Z1), Relicto de bosque altoandino (Z2), Bosque adyacente a la cantera (Z3), patios (Z4) y diseño experimental con biosólidos (Z5)



Anexo 2. Variables químicas del estéril y biosólido utilizado en los tratamientos.

Variables	Estéril	Biosólido
%Carbono orgánico	0.09	11.7
pH	5.4	7.3
% Nitrógeno total		116
Fósforo (ppm)	0.03	1.7

Anexo 3. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 0-15 cm al inicio del experimento

Variables	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.13	0.39	0.71	0.03
ph	7.6	7.4	7.4	5.0
% de humedad	9.76	9.56	12.97	3.72
% Nitrógeno total	0.02	0.06	0.11	0.002
Fósforo (ppm)	92.2	211.0	346.7	5.3

Anexo 4. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 15-30 cm al inicio del experimento.

Variables	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.23	0.47	1.01	0.03
pH	7.5	7.5	7.5	5.0
% de humedad	10.85	13.49	16.46	5.92
% Nitrógeno total	0.02	0.07	0.14	0.003
Fósforo (ppm)	188.33	30.0	485.67	5.93

Anexo 5. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 0-15 cm, después de tres meses de haber sido implementados en la Cantera Soratama.

Variables	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.15	0.42	0.55	0.02
pH	7.0	7.1	7.1	5.1
% de humedad	5.44	9.54	11.79	5.16
% Nitrógeno total	0.03	0.07	0.10	0.008
Fósforo (ppm)	88.3	276.3	281.3	7.5

Anexo 6. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 15-30 cm, después de tres meses de haber sido implementados en la Cantera Soratama.

Variab les	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.21	0.39	0.63	0.03
PH	7.1	7.1	7.2	4.9
% de humedad	8.095	12.087	15.703	6.153
%Nitrógeno total	0.037	0.07	0.08	0.08
Fósforo (ppm)	155.67	259.00	386.33	7.20

Anexo 7. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 0-15 cm, después de seis meses de haber sido implementados en la Cantera Soratama.

Variab les	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.25	0.48	0.82	0.03
pH	7.3	7.2	7.1	5.3
% de humedad	10.08	11.82	17.70	5.50
%Nitrógeno total	0.03	0.07	0.127	0.008
Fósforo (ppm)	158.7	307.3	388.3	5.7

Anexo 8. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 15-30 cm, después de seis meses de haber sido implementados en la Cantera Soratama.

Variab les	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.22	0.49	0.87	0.02
pH	7.3	7.1	7.1	5.2
% de humedad	11.97	15.70	20.42	8.44
%Nitrógeno total	0.037	0.08	0.147	0.008
Fósforo (ppm)	189.0	400.0	421.67	7.03

Anexo 9. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 0-15 cm, después de nueve meses de haber sido implementados en la Cantera Soratama.

Variables	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.27	0.50	0.93	0.03
pH	7.3	7.0	6.9	5.0
% de humedad	9.44	12.91	20.22	9.16
% Nitrógeno total	0.04	0.08	0.13	0.008
Fósforo (ppm)	169.0	323.0	427.7	7.1

Anexo 10. Tabla de variables físicas y químicas de los tratamientos y control en la profundidad de 15-30 cm, después de nueve meses de haber sido implementados en la Cantera Soratama.

Variables	T1	T2	T3	C
%Carbono orgánico	0.26	0.51	0.96	0.03
Ph	7.3	6.97	6.9	5.0
% de humedad	11.88	15.12	23.17	7.93
%Nitrógeno total	0.04	0.08	0.147	0.005
Fósforo (ppm)	201.0	333.67	454.33	6.50

Anexo 11. Número de individuos por ordenes, familias, morfoespecies de la macrofauna edáfica epigea colonizadora del tratamiento 1-

Orden	Familia	Morfoespecie	No. de individuos
Aranea	Linyphiidae	Ar 5	2
		Lycosidae	Ar 11
	Tetragnatidae	Ar 7	3
		Ar 2	6
		Ar 3	10
		Thomisidae	Ar 1
Coleoptera	Zoodariidae	Ar 6	1
	Carabidae	C 3	4
C 5		1	
Staphylinidae		C 2	2
C 4		2	
Dermaptera	Forficulidae	De 2	2
		Labiidae	De 1
	Labiidae	De 3	3
		De 4	1
		De 9	1
Hemiptera	Lygaeidae	He 3	1
	Miridae	He 2	3
Hymenoptera	Formicidae	Hy 1	3
Lithobiomorpha	Henicopidae	Ch 1	1
Malacostraca	Porcellionidae	Is 1	5
Orthoptera	Acrididae	Gr 1	1
		Gr 2	1
Polydesmida	Chelodesmidae	D 1	1
Spirostreptida	Spirostreptidae	D 2	1
Total general			65

Anexo 12. Número de individuos por ordenes, familias, morfoespecies de la macrofauna edáfica epigea colonizadora del tratamiento 2.

Orden	Familia	Morfoespecie	No. de individuos	
Aranea	Caponidae	Ar 14	1	
		Linyphidae	1	
			Ar 13	1
			Ar 15	1
			Ar 5	1
	Lycosidae	Ar 10	1	
		Ar 11	6	
	Tetragnatidae	Ar 16	2	
		Ar 2	5	
		Ar 3	5	
Ar 8		3		
Ar 9		4		
Coleoptera	Bruchidae	C 8	1	
		Carabidae	2	
	Coccinellidae	2		
	Chrysomelidae	1		
	Histeridae	1		
	Staphylinidae	C 2	8	
		C 4	3	
C 7		1		
Dermaptera	Forficulidae	De 2	5	
		Labiidae	10	
		De 3	1	
Hemiptera	Cicadellidae	Ho 1	4	
		Ho 3	1	
Hymenoptera	Formicidae	Hy 1	3	
Malacostraca	Porcellionidae	Is 1	15	
Microcoryphia	Meinertellidae	Mc 1	1	
Total general			90	

Anexo 13. Número de individuos por ordenes, familias, morfoespecies de la macrofauna edáfica epigea colonizadora del tratamiento 3.

Orden	Familia	Morfoespecie	No de individuos	
Aranea	Linyphidae	Ar 12	1	
		Ar 5	1	
	Lycosidae	Ar 11	1	
		Tetragnatidae	Ar 16	1
			Ar 18	2
			Ar 3	7
			Ar 8	1
		Thomisidae	Ar 17	1
	Coleoptera	Carabidae	C 3	5
			C 5	1
Coccinellidae		C 6	1	
Chrysomelidae		C 11	4	
Histeridae		C 9	2	
Scarabaeidae		C 14	2	
Scydmaenidae		C 13	1	
Staphylinidae		C 15	8	
		C 16	1	
		C 2	5	
		C 4	4	
	C 7	2		
Dermaptera	Forficulidae	De 2	4	
	Labiidae	De 1	15	
Hemiptera	Cicadellidae	Ho 2	2	
		Ho 4	1	
Hymenoptera	Formicidae	Hy 1	2	
Malacostraca	Porcellionidae	Is 1	1	
Orthoptera	Gryllacrididae	Gr 1	1	
Total general			77	

Anexo 14. Número de individuos por ordenes, familias, morfoespecies de la macrofauna edáfica epigea colonizadora del control.

Orden	Familia	Morfoespecie	No. de individuos
Aranea	Tetragnatidae	Ar 3	1
Hemiptera	Cicadellidae	Ho 2	1
Total general			2



a)

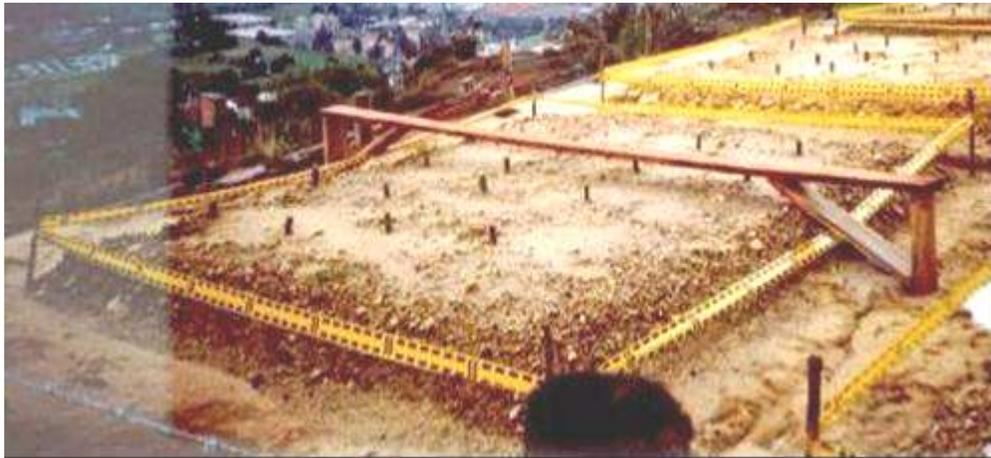


b)



c)

Anexo 15. Tratamiento 1: a) muestreo 2, b) muestreo 3 y c) muestreo 4.



a)



b)



c)

Anexo 16. Tratamiento 2: a) muestreo 2, b) muestreo 3 y c) muestreo 4.



a)



b)



c)

Anexo 17 Tratamiento 3: a) muestreo 2, b) muestreo 3 y c) muestreo 4.



a)



b)



c)

Anexo 18. Control: a) muestreo 2, b) muestreo 3 y c) muestreo 4.