

01177
UNAM
POSGRADO 19

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

CAMPO DE CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS PROVENIENTES DE UNA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO
DOMÉSTICO COMO MEJORADORES DEL SUELO**

PRESENTADA POR:

RUBÉN VEGA GONZÁLEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(AMBIENTAL)

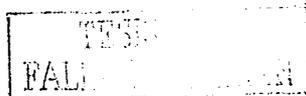
CAMPO DISCIPLINARIO SUELO Y AGUA SUBTERRANEA

DIRIGIDA POR:

M. en ING. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

Ciudad Universitaria, México, D.F. enero del 2003

A





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNAM
POSGRADO

PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

Subcomité Académico por Campo del Conocimiento
Ingeniería Ambiental

Ciudad Universitaria, D.F. a 6 de junio de 2002

Dr. Jesús Rivera Rodríguez
Coordinador del Programa de
Posgrado en Ingeniería
Presente

En su reunión del 6 de junio de 2002, el SACC de Ingeniería Ambiental analizó la siguiente solicitud y emitió el dictamen que a continuación se indica:

| | |
|-------------|---|
| Estudiante: | Vega González, Rubén |
| Asunto: | Solicitud de asignación de jurado para presentación del examen de grado de maestría |

| | |
|--------------------|---|
| Dictamen del SACC: | <p>Se aprueba la siguiente integración de su jurado para la presentación del examen de grado de maestría</p> <p>Presidente: Dra. Christina Siebe Grabach Vocal: Dra. Rosario Iturbe Argüelles Secretario: M. en I. Ana Elisa Silva Martínez Primer suplente: Dra. Nathalie Cabirol Segundo suplente: M. en I. Rolando Salvador García Gómez</p> |
|--------------------|---|

Atentamente,

Dr. Simón González Martínez, Presidente

Dr. Germán Buitrón Méndez

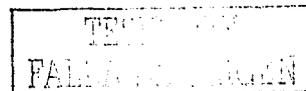
Dr. Joan Genescá Llongueras

Dr. Adalberto Novoa Robles
Representante electo

Dra. María del Carmen Durán de Bazúa

Dr. Pedro Martínez Pereda

Dra. Georgina Fernández Villagómez



B



PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

La Dirección General de Innovación y Desarrollo Científico y Tecnológico tiene a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcionado.
NOMBRE: Rubén Vega González
FECHA: 27/NOV/2002
FIRMA: [Signature]

Recibí Notificación para formar parte del jurado para el examen de Maestría en Ingeniería en el campo del conocimiento **Ingeniería Ambiental (SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS)** del alumno: **RUBEN VEGA GONZALEZ.**

JURADO

PRESIDENTE: DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH
VOCAL: DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES
SECRETARIO: M EN I. ANA ELISA SILVA MARTINEZ
SUPLENTE: DRA. NATALIE CABIROL
SUPLENTE: M EN I. ROLANDO SALVADOR GARCIA GOMEZ

FIRMA FECHA

[Signature] 19/11/2002
[Signature] 14 Nov 2002
[Signature] 12-Nov-2002
[Signature] 13-Nov-2002
[Signature] 14-Nov-02

BJS*jac.

02 NOV 19 14:58

TESIS
FALLA DE CALIFICACION

C



PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

RECIBI COPIA DE TESIS DESARROLLADO POR EL ALUMNO: **RUBEN VEGA GONZALEZ**.

PARA PRESENTAR EXAMEN DE GRADO DE MAESTRIA EN INGENIERIA EN EL CAMPO DEL CONOCIMIENTO INGENIERIA AMBIENTAL (SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS).

JURADO

| JURADO | FIRMA | FECHA |
|---|---------------------------------|-------------|
| PRESIDENTE: DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH | <i>Christina Siebe Grabach</i> | 19/Nov/2002 |
| VOCAL: DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES | <i>Rosario Iturbe Argüelles</i> | 14/Nov/2002 |
| SECRETARIO: M EN I. ANA ELISA SILVA MARTINEZ | <i>Ana Elisa Silva Martinez</i> | 14-Nov-2002 |
| SUPLENTE: DRA. NATALIE CABIROL | <i>Natalie Cabirol</i> | 15/Nov/2002 |
| SUPLENTE: M EN I. ROLANDO SALVADOR GARCIA GOMEZ | <i>Rolando S. Garcia Gomez</i> | 14-Nov-02 |

APROBACION DEL TRABAJO DE TESIS POR EL DEPARTAMENTO.

Aprobado Ruben Vega

BJS+jac.

TESIS
FALLA DE EXAMEN

D

AGRADECIMIENTOS

A Jesús por toda la esperanza y fuerza que bajo su luz he podido obtener, siempre mil gracias

A la División de Estudios de Posgrado de La Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación profesional

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo y formación de recursos humanos.

A mis directores de tesis:

A la M en Ing. Ana Elisa Silva Martínez de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería por su apoyo técnico, dedicación y compromiso para poder llegar a buen termino este trabajo.

A la Dra. Christina Siebe Grabach del Instituto de Geología de la UNAM por su apoyo técnico y brillantes aportaciones.

A la Dra. Rosario Iturbe Argüelles del Instituto de Ingeniería de la UNAM por su apoyo técnico y confianza.

A la Dra Natalie Cabirol y el M. en Ing. Rolando Salvador García Gómez por sus valiosas aportaciones para la conclusión de este trabajo.

A todos los profesores que tuvieron el tiempo de compartir sus conocimientos.

Al M. en C. Benjamín Miramontes Flores coordinador del laboratorio de suelos y agua en la Universidad Autónoma Metropolitana por su generoso apoyo y brillantes consejos, así como, al equipo de trabajo del laboratorio de suelos (Ing. León Arroyo Vázquez y al Ing. Mario H. Alva Reséndiz) por su apoyo técnico y valiosa amistad mi mas sincero agradecimiento.

Al Ing. Fernando Ceron y al Ing. Antonio del Ángel, superintendente y operador de la planta de tratamiento de aguas residuales PEMEX por todo su apoyo y facilidades para la correcta ejecución de este trabajo.

A Laura por su apoyo y soporte pero sobretodo por su valiosa amistad... muchas gracias

TPSIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

Los suelos son el sustrato básico para la agricultura. La erosión o pérdida de suelo es el principal problema edáfico en México. Siendo la erosión hídrica, la deficiencia de cubierta vegetal y las prácticas productivas inadecuadas, los principales factores que generan esta pérdida de suelo. La práctica más recomendable para reducir el grado de afectación de los suelos sin afectar el medio ambiente es la incorporación de materia orgánica.

El lodo subproducto del tratamiento de aguas residuales de origen doméstico contiene materia orgánica y nutrientes, el cual después de ser estabilizado y de reducir el contenido de patógenos se le denomina biosólido y puede ser aplicado en el suelo con el fin de mejorar las propiedades de éste, además, proporciona una alternativa a las opciones de disposición de los lodos.

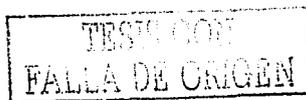
La investigación se realizó en el laboratorio de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, estableciendo un cultivo de ciclo corto (*Avena sativa*) en tres tipos de suelo: arena, arcilla y franco limoso, a los cuales se les aplicó en forma de riego biosólidos clase B. En las mismas condiciones de suelo y cultivo, se aplicó una solución nutritiva que sirvió de testigo.

A los suelos así regados se les determinó periódicamente: contenido de materia orgánica, estructura, conductividad hidráulica, salinidad, sodicidad, capacidad de intercambio de cationes y pH.

Se concluyó que por el efecto de la aplicación de biosólidos, la estructura se modificó de una de tipo granular simple a una de tipo granular; se mejoró la capacidad de intercambio de cationes hasta un 77% para el suelo de tipo tepojar, la permeabilidad se mantuvo dentro del parámetro moderado en los tres suelos, el contenido de materia orgánica se incrementó considerablemente en el suelo tipo tepojar y en el franco limoso.

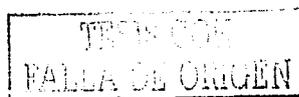
Cabe hacer mención que no se encontraron efectos negativos en relación al pH, salinidad y sodicidad en los tres tipos de suelo.

De los tres tipos de suelos los mejores resultados se observaron en el suelo de tipo arenoso "tepojar".



CONTENIDO.

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 8 |
| 2 | OBJETIVOS | 9 |
| 2.1 | Objetivos específicos: | 9 |
| 3 | ALCANCES Y LIMITANTES | 9 |
| 4 | HIPÓTESIS | 10 |
| 5 | MARCO TEORICO | 10 |
| 5.1 | Definición y características de los lodos de desecho de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) | 10 |
| 5.1.1 | Composición de lodos | 11 |
| 5.1.2 | Características físicas | 12 |
| 5.1.3 | Contenido de sólidos | 12 |
| 5.1.4 | Características químicas | 13 |
| 5.1.5 | Características microbiológicas | 16 |
| 5.2 | Propiedades de los biosólidos | 16 |
| 5.2.1 | Generación de los biosólidos | 17 |
| 5.2.2 | Clasificación de los biosólidos | 18 |
| 5.2.3 | Usos de los biosólidos | 20 |
| 5.2.4 | Aplicación de biosólidos al suelo | 22 |
| 5.3 | Legislación para lodos | 23 |
| 5.3.1 | Normatividad para lodos en México | 23 |
| 5.3.2 | Normatividad existente en otros países sobre disposición de lodos biológicos. | 25 |
| 5.4 | Propiedades de los suelos | 27 |
| 5.4.1 | El sistema suelo | 27 |
| 5.4.2 | La fracción mineral del suelo | 27 |
| 5.4.3 | Componentes del suelo | 28 |
| 5.4.4 | Propiedades físicas y químicas del suelo | 29 |
| 5.4.4.1 | Textura | 29 |
| 5.4.4.2 | Estructura | 30 |
| 5.4.4.3 | Color | 35 |
| 5.4.4.4 | Densidad aparente | 36 |
| 5.4.4.5 | Densidad real | 37 |
| 5.4.4.6 | Porosidad | 37 |
| 5.4.4.7 | Permeabilidad y conductividad hidráulica | 38 |
| 5.4.4.8 | Contenido de materia orgánica | 39 |
| 5.4.4.9 | Capacidad de intercambio de cationes | 41 |
| 5.4.4.10 | pH | 41 |
| 5.4.4.11 | Salinidad y sodicidad | 42 |
| 5.5 | Control de las propiedades físicas del suelo | 43 |
| 5.5.1 | Resistencia a la erosión | 43 |
| 5.5.2 | Labranza para el control de las propiedades físicas del suelo | 44 |

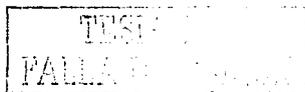


| | | |
|-------|--|-----------|
| 5.5.3 | La materia orgánica y el mejoramiento de las condiciones físicas de los suelos | 45 |
| 5.5.4 | Tratamiento químico para el mejoramiento del suelo | 46 |
| 5.5.5 | Sustancias químicas para mejorar los suelos | 46 |
| 5.6 | Legislación mexicana sobre contaminación del suelo | 47 |
| 5.6.1 | Legislación mexicana sobre contaminación del suelo | 47 |
| 5.7 | Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales PEMEX | 49 |
| 6 | METODOLOGÍA | 52 |
| 6.1 | Obtención de biosólidos clase B | 52 |
| 6.2 | Obtención de los suelos para el experimento | 52 |
| 6.3 | Instalaciones | 54 |
| 6.4 | Unidades experimentales | 54 |
| 6.5 | Diseño del experimento | 55 |
| 6.5.1 | Dosis | 56 |
| 6.5.2 | Unidades de tratamiento | 57 |
| 6.5.3 | Ensayos | 57 |
| 6.5.4 | Evaluación del experimento | 58 |
| 6.5.5 | Toma de muestras | 58 |
| 6.6 | Métodos de análisis para los suelos | 59 |
| 6.6.1 | Determinación del pH del suelo | 59 |
| 6.6.2 | Conductividad eléctrica | 60 |
| 6.6.3 | Capacidad de intercambio catiónico | 60 |
| 6.6.4 | Relación de adsorción de sodio | 61 |
| 6.6.5 | Porcentaje de materia orgánica | 61 |
| 6.6.6 | Conductividad hidráulica | 62 |
| 6.6.7 | Estabilidad de agregados | 62 |
| 6.6.8 | Biomasa | 63 |
| 7 | RESULTADOS | 64 |
| 7.1 | Parámetros iniciales de biosólidos | 64 |
| 7.2 | Parámetros iniciales de los suelos | 64 |
| 7.3 | Análisis del experimento | 66 |
| 7.3.1 | Análisis de resultados del pH | 66 |
| 7.3.2 | Análisis de resultados de la conductividad eléctrica | 67 |
| 7.3.3 | Análisis de resultados de intercambio catiónico | 68 |
| 7.3.4 | Análisis de resultados de materia orgánica | 69 |
| 7.3.5 | Análisis de resultados de biomasa | 70 |
| 7.3.6 | Análisis de resultados de la relación de adsorción de sodio | 71 |
| 7.3.7 | Análisis de resultados de la conductividad hidráulica | 72 |
| 7.3.8 | Análisis de resultados del diámetro de agregados | 73 |
| 7.3.9 | Análisis de resultados del tamaño específico de agregados | 74 |
| 8 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 76 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 1 | Composición química promedio de lodos de desecho de algunas plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos | 14 |
| Tabla 2 | Composición química y propiedades típicas de lodo crudo y digerido en varias etapas de tratamiento | 15 |
| Tabla 3 | Tecnologías utilizadas para reducir patógenos y obtener biosólidos clase A o clase B | 18 |
| Tabla 4 | Restricciones para la cosecha, pastoreo de animales y acceso público en sitios donde se han aplicado biosólidos clase B | 20 |
| Tabla 5 | Sitios de disposición de lodos en el Reino Unido 1990-1991 | 21 |
| Tabla 6 | Aporte de los efluentes de los procesos de tratamiento de agua residual y tratamiento con filtrado | 22 |
| Tabla 7 | Reglamentos ambientales nacionales que aplican para sólidos de aguas residuales | 24 |
| Tabla 8 | Clasificación de lodos en relación a sus principales parámetros microbiológicos | 26 |
| Tabla 9 | Tipos de suelo en relación al color que presentan | 36 |
| Tabla 10 | Valores promedios de densidad aparente para las diferentes fracciones minerales del suelo | 37 |
| Tabla 11 | Clasificación de velocidades para indicar permeabilidad | 39 |
| Tabla 12 | Efectos provocados a los suelos en relación con la conductividad eléctrica | 43 |
| Tabla 13 | La estructura del suelo en relación con la labranza a diferentes niveles de humedad | 44 |
| Tabla 14 | Descripción de los ensayos (Tratamiento con biosólidos) | 58 |
| Tabla 15 | Descripción de los ensayos (Tratamiento con solución nutritiva) | 58 |
| Tabla 16 | Calendario de muestreo respecto a las etapas de desarrollo | 59 |
| Tabla 17 | Caracterización de los lodos de la planta PEMEX | 64 |
| Tabla 18 | Parámetros iniciales en los suelos de estudio | 64 |
| Tabla 19 | Porcentaje de agregados retenidos por tipo de suelo y por número de malla | 65 |
| Tabla 20 | Diámetro de agregados por tipo de suelo | 65 |
| Tabla 21 | Diámetro promedio de agregados por tipo de suelo | 65 |
| Tabla 22 | Comparación del pH entre suelos con biosólidos | 83 |
| Tabla 23 | Resultados del análisis del pH para tepojar | 83 |
| Tabla 24 | Resultados del análisis del pH para tepetate | 83 |
| Tabla 25 | Resultados del análisis del pH para suelo franco limoso | 83 |



| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 26 | Conductividad eléctrica entre suelos con biosólidos | 84 |
| Tabla 27 | Resultados del análisis de conductividad eléctrica para tepojar | 84 |
| Tabla 28 | Resultados del análisis de conductividad eléctrica para tepetate | 84 |
| Tabla 29 | Resultados del análisis de conductividad eléctrica para Franco Limoso | 84 |
| Tabla 30 | Capacidad de intercambio catiónico entre suelos con biosólidos | 85 |
| Tabla 31 | Resultados del análisis de capacidad de intercambio catiónico para tepojar | 85 |
| Tabla 32 | Resultados del análisis de capacidad de intercambio catiónico para tepetate | 85 |
| Tabla 33 | Resultados del análisis de capacidad de intercambio catiónico para suelos Franco limosos | 85 |
| Tabla 34 | Materia Orgánica entre suelos con Biosólidos | 86 |
| Tabla 35 | Resultados del análisis de materia orgánica para tepojar | 86 |
| Tabla 36 | Resultados del análisis de materia orgánica para tepetate | 86 |
| Tabla 37 | Resultados del análisis de materia orgánica para Suelo Franco Limoso | 86 |
| Tabla 38 | Análisis de Biomasa entre Suelos | 87 |
| Tabla 39 | Resultados del análisis de biomasa para tepojar | 87 |
| Tabla 40 | Resultados del análisis de biomasa para tepetate | 87 |
| Tabla 41 | Resultados del análisis de biomasa para suelos Franco Limosos | 87 |
| Tabla 42 | Relación de adsorción de sodio entre suelos | 88 |
| Tabla 43 | Relación de adsorción de sodio para Tepojar (meq/l) | 88 |
| Tabla 44 | Relación de adsorción de sodio para Tepetate (meq/l) | 88 |
| Tabla 45 | Relación de adsorción de sodio para suelos Franco Limosos (meq/l) | 88 |
| Tabla 46 | Conductividad hidráulica entre suelos | 89 |
| Tabla 47 | Conductividad hidráulica para Tepojar (m/s) | 89 |
| Tabla 48 | Conductividad hidráulica para Tepetate (m/s) | 89 |
| Tabla 49 | Conductividad hidráulica para suelos Franco Limosos (m/s) | 89 |
| Tabla 50 | Diámetro de agregados entre suelos | 90 |
| Tabla 51 | Tamaño específico de agregados Tepojar | 90 |
| Tabla 52 | Tamaño específico de agregados Tepetate | 91 |
| Tabla 53 | Tamaño específico de agregados franco limoso | 91 |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|----------|---|----|
| FIG. 1. | Componentes del sistema suelo y su distribución en porcentaje de volumen | 28 |
| FIG. 2. | Rangos de pH de la mayoría de los suelos minerales tanto de las regiones húmedas como áridas. Valor pH extremo de los suelos sólidos y suelos de turba muy ácidos | 42 |
| FIG. 3. | Tratamiento sucesivos del suelo para mejorar la estructura y la aereación | 46 |
| FIG. 4. | Sedimentador secundario y digestor de lodos planta PEMEX | 51 |
| FIG. 5. | Diagrama de flujo planta de tratamiento de aguas residuales PEMEX | 51 |
| FIG. 6. | Incremento de pH de 6 a 12 en los lodos para obtener biosólidos | 52 |
| FIG. 7. | Suelo de textura arenosa (tepojar) | 53 |
| FIG. 8. | Suelo de textura arcillosa (tepetate) | 53 |
| FIG. 9. | Suelo de textura (franco limoso) | 54 |
| FIG. 10. | Maceta tipo utilizada durante el experimento | 54 |
| FIG. 11. | Diagrama de columnas para conductividad hidráulica | 55 |
| FIG. 12. | Columnas empacadas para conductividad hidráulica | 55 |
| FIG. 13. | Aplicación de biosólidos a las unidades de tratamiento | 57 |
| FIG. 14. | Determinación del pH en el suelo | 60 |
| FIG. 15. | Determinación de la conductividad eléctrica al suelo | 60 |
| FIG. 16. | Determinación de la CIC en flamómetro | 61 |
| FIG. 17. | Lectura de materia orgánica | 61 |
| FIG. 18. | Tamizado del suelo para evaluación del tamaño medio de agregados | 63 |
| FIG. 19. | Relación de pH entre suelos | 66 |
| FIG. 20. | Conductividad eléctrica entre suelos | 68 |
| FIG. 21. | Capacidad de intercambio catiónico entre suelos | 68 |
| FIG. 22. | Porcentaje de materia orgánica entre suelos | 70 |
| FIG. 23. | Gramos de biomasa entre suelos | 71 |
| FIG. 24. | Relación de adsorción de sodio entre suelos | 72 |
| FIG. 25. | Conductividad hidráulica entre suelos | 73 |
| FIG. 26. | Diámetro promedio de agregados entre suelos | 74 |
| FIG. 27. | Tamaño específico de agregados tepojar | 75 |
| FIG. 28. | Tamaño específico de agregados tepetate | 75 |
| FIG. 29. | Tamaño específico de agregados franco limoso | 75 |

LISTA DE ABREVIATURAS.

| ABREVIATURA | SIGNIFICADO |
|--------------------|--|
| AB | Agua Blanca |
| CEE | Comunidad Económica Europea |
| CIC | Capacidad de Intercambio de Cationes |
| DEPFI | División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería |
| DOF | Diario Oficial de la Federación |
| DQO | Demanda Química de Oxígeno |
| EEC | Comunidad Económica Europea (Por sus siglas en ingles) |
| EPA | Agencia de Protección Ambiental |
| ES | Efluente Secundario |
| FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación |
| Ha | Hectáreas |
| INE | Instituto Nacional de Ecología |
| Ks | Conductividad Hidráulica Saturada |
| L | Litro |
| LGEEPA | Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente |
| MWD | Diámetro Promedio de Agregados (Por sus siglas en ingles) |
| NMP | Número más Probable |
| NOM | Norma Oficial Mexicana |
| NR | No Requerido |
| pH | Potencial de Hidrógeno |
| PSI | Porcentaje de Sodio Intercambiable |
| PTAR | Planta de Tratamiento de Aguas Residuales |
| RAS | Relación de Adsorción de Sodio |
| SARH | Secretaría de Recursos Hidráulicos |
| SEMARNAP | Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca |
| T | Toxicidad |
| Ton | Toneladas |
| UFC | Unidades Formadoras de Colonias |
| UK | Reino Unido |
| USEPA | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de America |
| UV | Ultra Violeta |

1 INTRODUCCIÓN

En su totalidad los suelos del país sufren algún grado de afectación, siendo la erosión una de las más importantes, sin embargo, la mayoría de ellos se encuentra en condiciones que permiten seguir utilizándolos productiva e indefinidamente si se introducen, en los sistemas de producción actual, prácticas que contribuyan a este propósito, siendo la práctica más recomendada, la incorporación de materia orgánica. En este trabajo se analiza la factibilidad técnica de emplear lodos de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales como mejoradores de suelos erosionados. Para ello se seleccionaron tres tipos de suelos de diferentes características tanto físicas como químicas, con la finalidad de evaluar el comportamiento durante la aplicación de los lodos en los suelos disgregados por procesos de erosión, es decir, suelos pobres en materia orgánica con bajo grado de agregación y de texturas contrastantes: arena (tepojar), arcilla (tepetate) y suelo franco limoso.

El lodo es un producto final inevitable en el tratamiento de aguas residuales. Muchos sólidos orgánicos, compuestos químicos orgánicos e inorgánicos tóxicos, son removidos durante el tratamiento de aguas residuales y concentrados en el lodo producto de este tratamiento. Se estima que en Estados Unidos se producen anualmente un promedio de 5.3 millones de toneladas en peso seco de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico, por lo que se espera un incremento durante los próximos años (EPA, 1999).

La disposición final de los lodos siempre ha representado una parte sustancial en los costos de manejo en una planta de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, en la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria Burlington Yecapixtla, en Yecapixtla Morelos, esta operación representa el 56% de los costos de operación de la planta (Juárez G. 2001).

El lodo que resulta del proceso de tratamiento de aguas residuales municipales contiene materia orgánica y nutrientes que, cuando es apropiadamente tratado y aplicado en el suelo, puede mejorar las propiedades físicas y la productividad agrícola, además de que su uso agrícola proporciona una alternativa a las opciones de disposición, como pueden ser la incineración o el relleno.

A los lodos domésticos provenientes de una planta de tratamiento después de ser estabilizados y de haber reducido el contenido de patógenos se les denomina "biosólidos", pues provienen de compuestos predominantemente orgánicos y pueden tener un uso benéfico. Este nuevo nombre refleja la tendencia actual de considerarlos más como un producto susceptible de revalorización que como un desecho, ya que su aplicación depende de su contenido de compuestos químicos contaminantes y de los microorganismos patógenos (EPA, 1994^a).

Existen numerosos trabajos como los de Muñoz G. (1999), Davis (1996), y Palacios (1999), que utilizan biosólidos como fertilizantes, sin embargo, es necesario

profundizar en la capacidad de los biosólidos como mejoradores del suelo, en particular en sus características físicas y químicas.

Para ello en esta investigación se considera emplear biosólidos obtenidos de lodos provenientes de sistemas de lodos activados, los cuales son aplicados con mayor frecuencia en México.

Por lo que para el desarrollo de la investigación se considera la necesidad de transformar los lodos tratados por digestión aerobia, en biosólidos de clase B los cuales pueden ser aplicados en los suelos durante la producción agrícola de granos en un sistema controlado a nivel laboratorio.

2 OBJETIVOS

Evaluar la capacidad de los biosólidos clase B, provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales PEMEX, como mejoradores de las características físicas y químicas del suelo, durante la producción agrícola de granos a nivel laboratorio.

2.1 Objetivos específicos:

- Caracterizar el suelo propuesto, mediante los parámetros de pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, relación de adsorción de sodio, porcentaje de materia orgánica, conductividad hidráulica, textura.
- Evaluar el mejoramiento del suelo en términos de características físico - químicas (contenido de materia orgánica, estructura, conductividad hidráulica, salinidad, sodicidad, capacidad de intercambio catiónico y pH)

3 ALCANCES Y LIMITANTES

- El estudio se desarrolló sobre tres tipos de suelo: suelo arenoso, suelo arcilloso y suelo franco limoso en macetas experimentales
- El experimento se realizó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM; para controlar las variables ambientales aleatorias, como son la: temperatura, la precipitación y la humedad. El área de las unidades de tratamiento, fue restringida a macetas de dimensiones de 15 cm de diámetro por 15 cm de altura.
- La evaluación del mejoramiento de la estructura de los suelos se realizó a través de las variables estabilidad y tamaño de los agregados.
- Debido a que el estudio busca promover el mejoramiento en los suelos agrícolas se involucró el crecimiento de las plantas cultivadas, para lo cual se introdujo el desarrollo de un cultivo de ciclo corto (*avena sativa*) durante un sólo periodo agrícola



- Los biosólidos fueron producidos en el laboratorio mediante el proceso de enclamiento hasta tener un pH de 12, a partir de los lodos digeridos aeróbicamente en la planta de tratamiento de aguas residuales de PEMEX

4 HIPÓTESIS

Es posible mejorar los suelos a través de la aplicación de biosólidos clase B, por lo que:

- a) El contenido de materia orgánica aumentará en los tres suelos
- b) La estructura se modificará de una estructura de tipo granular simple hacia una de tipo granular
- c) La conductividad hidráulica (K) debe tender a flujo moderado dentro del intervalo de 1.38^{-6} a 4.1^{-5} m/s, facilitando el flujo del agua a través del suelo
- d) La capacidad de intercambio de cationes aumentará, permitiendo la disponibilidad de nutrimentos para los cultivos, además de evitar pérdidas por lixiviación
- e) Existirá un aumento en la salinidad del suelo, debido al NH_4^+ , Ca^{+2} y a otras sales contenidas en los lodos; esperándose que no se llegue a niveles de suelos salinos
- f) Disminuirá la relación de adsorción de sodio (RAS) debido a la incorporación de otros cationes como Ca^{2+} , del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que se adiciona a los lodos

5 MARCO TEORICO

5.1 *Definición y características de los lodos de desecho de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*

Una planta de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR) es una instalación en la que mediante una serie de procesos físicos, físico-químicos y/o biológicos, los contaminantes suspendidos y disueltos son separados de la mezcla, produciendo finalmente un efluente limpio (dentro de los límites permisibles por la normatividad), y un lodo de desecho que puede estar en estado líquido o sólido. El influente es el término que se refiere al agua residual que ingresa a la PTAR para su limpieza. El efluente es el agua que sale de la PTAR y que contiene una cantidad mucho menor de contaminantes que la inicial y que puede liberarse a un cuerpo de agua natural sin afectar al medio ambiente.

El lodo de desecho es el material que se separa en los conductos de purga y lavado en los procesos de sedimentación y filtración durante el tratamiento de aguas residuales municipales. Este material se compone por sólidos sedimentables suspendidos en agua en el primer caso, y por sólidos suspendidos más ligeros

retenidos por el lecho filtrante en el segundo caso. En las PTAR se agregan dos tipos de lodos básicamente que son los lodos primarios crudos, separados durante la sedimentación primaria, y los lodos secundarios, separados del agua residual una vez que ha dejado el reactor biológico.

De acuerdo con Metcalf & Eddy, (1996). Existen diversos tipos de lodo en una planta de tratamiento de aguas residuales, los que podrían clasificarse de la siguiente manera:

- a) Lodo resultante de la clarificación preliminar. Es producido cuando las sustancias sedimentables se asientan en el agua residual cruda.
- b) Lodo resultante del tratamiento biológico. Es producido a partir de la actividad biológica de los microorganismos que intervienen en el proceso de tratamiento. Este tipo de lodo presenta una estructura floculenta y es separado de la unidad de sedimentación secundaria.
- c) Lodo químico. Se refiere al lodo que se produce en la etapa de tratamiento fisicoquímico, y que se deposita en las unidades de sedimentación posteriores; contiene tanto los materiales suspendidos y disueltos contenidos originalmente, como los que se hayan agregado durante el proceso (o los productos resultantes de las reacciones efectuadas).
- d) Lodo digerido. Se le designa al lodo crudo tratado en los compartimientos de digestión; en este proceso se reduce su volumen a unos dos tercios del volumen inicial.

5.1.1 Composición de lodos

La composición del lodo producido en las plantas de tratamiento de aguas residuales depende de su origen y de la etapa de digestión del mismo. El lodo primario proveniente de las unidades de clarificación preliminar es de color gris amarillento, en el aún se pueden distinguir los compuestos más gruesos (heces, residuos de frutas y verduras, etc.), este lodo se descompone más rápidamente durante las estaciones cálidas, afectadas por la temperatura. El lodo primario se encuentra formado por material particulado de tipo orgánico e inorgánico que sedimenta con facilidad y se separa en la sedimentación primaria.

El lodo secundario es el material sedimentable procedente del digestor biológico y que se separa en la sedimentación secundaria, a este tipo de lodo también se le conoce como lodo activado.

Según Ramahlo (1983), de los lodos primarios en el reactor biológico, dos terceras partes son empleadas por los microorganismos como fuente de energía, y el tercio restante pasa a formar parte de la masa microbiana, cuyo exceso se elimina del reactor a través de la purga de los lodos.



El lodo proveniente de las etapas de tratamiento biológico es más homogéneo. Cuando está fresco su color varía de gris a marrón, se descompone con mayor rapidez debido, al alto contenido de materia orgánica, la cual es atacada por bacterias saprofitas. El lodo digerido por completo adquiere un color negro, conserva el olor del alquitrán y puede deshidratarse con relativa facilidad. El lodo estabilizado aeróbicamente tiene un color parduzco y un olor a tierra.

Se denomina lodo "doméstico" al residuo sólido, semisólido o líquido que se genera en una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico. Por definición incluye los desechos de los desnatadores, sedimentadores primarios y secundarios y del procesamiento de los lodos. No incluye desechos de desarenadores, rejillas o cenizas de incineradores (Santos M, 1998).

Los lodos domésticos estabilizados son denominados "biosólidos", pues provienen de compuestos básicamente orgánicos y pueden tener un uso benéfico, su aplicación depende de su contenido de elementos químicos contaminantes y de los microorganismos patógenos (EPA, 1994^a).

5.1.2 Características físicas

Las características físicas de los lodos que son de mayor importancia en los procesos de tratamiento son las que se refieren a sus propiedades para fluir, y a las que describen su composición física. Las propiedades mecánicas del agua se modifican a medida que aumenta la concentración de sólidos en las diferentes etapas de su tratamiento, siendo las variables que se ven modificadas la viscosidad y la densidad. El estado de floculación que presenta el lodo también tiene un efecto sobre la facilidad con la que se lleve a cabo el espesamiento, haciéndose más eficiente en los lodos digeridos anaeróbicamente que en los tratados por digestión aerobia (Santos M, 1998).

5.1.3 Contenido de sólidos

La cantidad de sólidos que contiene el lodo se expresa por lo común en mg/L, aunque cuando se trata con lodos deshidratados en los que la consistencia es más parecida a una pasta o a un sólido, puede expresarse como porcentaje en masa. En este trabajo se tratará con lodos en estado líquido y la densidad es considerada como igual a la del agua pura, ya que no hay gran diferencia, y el trabajo no requiere de una mayor aproximación.

El contenido de sólidos en los lodos puede encontrarse en niveles bajos del 2 al 4% cuando se encuentran en estado líquido, que es la fase que presenta al salir de las operaciones de sedimentación, hasta valores superiores a 90% cuando se trata de lodos deshidratados. El contenido de humedad determina el modo de aplicación al terreno; cuando el lodo se encuentra en estado líquido se puede aplicar por inyección o por aspersión, mientras que un lodo deshidratado con 16 a 30% de sólidos se puede

distribuir sobre el terreno y posteriormente incorporarse al suelo con el paso de un arado o una rastra (WPCF, 1988).

5.1.4 Características químicas

La composición química de los lodos varía de acuerdo al tipo de agua residual de la que proviene, por lo que no es constante a lo largo del año ni en lo referente al tipo de sustancias, ni a su concentración. Las aguas residuales municipales contienen materia orgánica en su mayor parte (de origen fecal y desechos de alimentos), puede contener pequeñas cantidades de desechos industriales, residuos de procesos domésticos de limpieza (cloro, amonio, grasas, solventes) y materiales orgánicos e inorgánicos arrastrados por las aguas pluviales.

Los lodos contienen muchos de los nutrientes necesarios para el crecimiento de los vegetales. La clasificación de los nutrientes vegetales se basa en la cantidad necesaria de cada uno de ellos por las plantas, por lo que se agrupan como macro nutrientes y micro nutrientes. El grupo de los macro nutrientes es reducido e incluye al nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre aunque regularmente se manejan los tres primeros en el cálculo de dosis de fertilización; el grupo de los micro nutrientes comprende los siguientes elementos: hierro, manganeso, boro, cobre, zinc, molibdeno y cloro (WPCF, 1988; Bidwel, 1979).

El manual sobre uso de sólidos de desecho de la Water Pollution Control Federation de los Estados Unidos de Norte América (1988), proporciona datos sobre la composición química de los lodos de desechos de las plantas de tratamiento de aguas municipales en ese país como es mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1 Composición química promedio de lodos de desecho de algunas plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos

| Componente | Concentración % (base seca) | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------|-------|
| | Mínimo | Máximo | Medio |
| Carbono orgánico | 6.5 | 48 | 30.4 |
| Carbono inorgánico | 0.3 | 54.3 | 1.4 |
| Nitrógeno total | <0.1 | 17.6 | 3.3 |
| Nitrógeno amoniacal | <0.1 | 6.7 | 1.0 |
| Nitrógeno de nitratos | <0.1 | 0.5 | <0.1 |
| Fósforo total | <0.1 | 14.36 | 2.3 |
| Fósforo orgánico | <0.1 | 2.4 | 1.3 |
| Azufre total | 0.6 | 1.5 | 1.1 |
| Calcio | 0.1 | 25 | 3.9 |
| Hierro | <0.1 | 15.3 | 1.1 |
| Aluminio | 0.1 | 13.5 | 0.4 |
| Sodio | 0.1 | 3.1 | 0.2 |
| Potasio | 0.2 | 2.6 | 0.3 |
| | | mg/L | |
| Zinc | 101 | 27800 | 1740 |
| Cobre | 84 | 10400 | 850 |
| Níquel | 2 | 3515 | 82 |
| Cromo | 10 | 99000 | 890 |
| Manganeso | 18 | 7100 | 260 |
| Cadmio | 3 | 3410 | 16 |
| Plomo | 13 | 19730 | 500 |
| Mercurio | <1 | 10600 | 5 |
| Cobalto | 1 | 18 | 4 |
| Molibdeno | 5 | 39 | 30 |
| Bario | 21 | 8980 | 162 |
| Arsénico | 6 | 230 | 10 |
| Boro | 4 | 757 | 33 |

Fuente : WPCF, (1988).

Metcalf & Eddy (1996), incluyen un cuadro indicativo de las características químicas y algunas físicas de los lodos procedentes de las etapas del proceso de tratamiento; estos datos se incluyen en la Tabla 2.



Tabla 2 Composición química y propiedades típicas de lodo crudo y digerido en varias etapas de tratamiento

| Parámetros | Lodo primario | | Lodo primario digerido | | Lodo secundario |
|---|---------------|--------|------------------------|--------|-----------------|
| | Intervalo | Típico | Intervalo | Típico | Intervalo |
| Sólidos totales (ST), % | 2.0-8.0 | 5.0 | 6.0-12.0 | 10.0 | 0.83-1.16 |
| Sólidos volátiles, % de ST | 60.8-80.0 | 65.0 | 30.0-60.0 | 40.0 | 59.0-88.0 |
| Grasas y aceites, % de ST | | | | | |
| Solubles en éter | 6.0-30.0 | - | 2.0-20.0 | 18.0 | - |
| Extractables con éter | 7-0-35.0 | - | - | - | 5.0-12.0 |
| Proteína, % de ST | 20.0-30.0 | 25.0 | 15.0-20.0 | 18.0 | 32.0-12.0 |
| Nitrógeno, % de ST como N | 1.5-4.0 | 2.5 | 1.6-6.0 | 3.0 | 2.4-5.0 |
| Fósforo, % de ST como P ₂ O ₅ | 0.8-2.8 | 1.6 | 1.5-4.0 | 2.5 | 2.8-11.0 |
| Potasio, % de ST como K ₂ O | 0-1.0 | 0.4 | 0-3.0 | 10.0 | 0.5-0.7 |
| Celulosa, % de ST | 8.0-15.0 | 10.0 | 8.0-15.0 | 10.0 | - |
| Hierro (excepto sulfuro) | 2.4-4.0 | 2.5 | 3.0-8.0 | 4.0 | - |
| Sílice, % de ST como SiO ₂ | 15.0-20.0 | - | 10.0-20.0 | - | - |
| Valor pH | 5.0-8.0 | 6.0 | 6.5-7.5 | 7.0 | 6.5-8.0 |
| Alcalinidad (mg/L como CaCO ₃) | 500-1500 | 600 | 2500-3500 | 3000 | 580-1100 |
| Ácidos Orgánicos (mg/L como HAc) | 200-2000 | 500 | 100-600 | 200 | 1100-1700 |
| Contenido de energía, Btu/lb) | 10000-12500 | 11000 | 4000-6000 | 5000 | 8000-10000 |

Fuente: Metcalf & Eddy, (1996).

Los lodos también contienen elementos traza, es decir, aquellos que en bajas concentraciones pueden ser esenciales para plantas y animales en algunos casos, y en otros pueden tener efectos nocivos. Entre estos elementos se encuentran los metales pesados, cuyos contenidos están reglamentados por la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) y se restringe la aplicación de lodos por su contenido de arsénico (As), cromo (Cr), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni), selenio (Se) y zinc (Zn) (WPCF, 1988).



5.1.5 Características microbiológicas

Los lodos primarios contienen una gran cantidad de sólidos sedimentables entre los que se encuentran muchos microorganismos provenientes tanto del proceso de descomposición biológica que se da en los drenajes, como los procedentes del tracto digestivo en los desechos fecales (humanos, mascotas, animales callejeros, ratas, etc.).

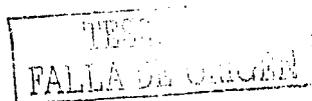
Los lodos secundarios contienen una masa de microorganismos formada en el reactor biológico de la planta de tratamiento. Aunque los microorganismos patógenos para el ser humano no son los que se encargan de la descomposición biológica que se lleva a cabo dentro del reactor, algunas poblaciones de ellos resisten las condiciones del tratamiento y salen junto con el grueso de la población en la purga de los lodos. La presencia de dichos patógenos se detecta generalmente de manera indirecta a través de organismos indicadores que se identifican con mayor facilidad en las muestras de agua. El parámetro que se emplea con más frecuencia para monitorear el contenido de microorganismos patógenos en los lodos es el contenido de huevos de helminto. El apartado 503 título 40 de Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (USEPA) basa sus limitaciones sobre el manejo de los lodos en su contenido de huevos de helminto, Salmonella y conteo en placa para bacterias y virus (USEPA 40 CFR parte 503, 1993; EPA/625/R-92/013, 1999).

Entre los grupos de microorganismos que se encuentran en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales se encuentran bacterias, protozoarios y algas. Otra forma de vida que es de importancia para la salud humana son los virus, los cuales en algunos casos pueden resistir las condiciones del tratamiento y estar presentes en el efluente. Los virus pueden resistir el paso por el reactor de forma independiente, o más probablemente, pueden hacerlo como parásitos de microorganismos, principalmente bacterias. Los virus son de importancia para el ser humano por las enfermedades que ocasionan: hepatitis, gastroenteritis, etc.

La presencia de microorganismos patógenos en los lodos de desecho a para su uso en terrenos agrícolas es un factor de preocupación por el peligro potencial que representan ya que pueden entrar en contacto con el ser humano a través de diferentes vías, ya sea por la ingestión de suelo transportado por el aire o durante actividades que implican movimientos de suelo, también de forma indirecta a través del consumo de verduras o frutas que se cultivaron empleando lodos de desecho.

5.2 Propiedades de los biosólidos

Los biosólidos son materia orgánica rica en nutrientes que son el resultado del tratamiento de lodo generado en una planta de tratamiento de aguas residuales. Cuando se trata y se procesa, el lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales se transforma en material biosólido. Estos materiales pueden reciclarse y aplicarse como fertilizantes y mejoradores de suelos para estimular el crecimiento de las plantas (EPA, 2000).



5.2.1 Generación de los biosólidos

Para poder obtener biosólidos clase B es necesario aplicar alguna de las tecnologías descritas a continuación:

- Por medio de digestión aerobia.
Es llevada a cabo entre 40 días a una temperatura de 20°C y por un periodo de 60 días a 15°C. En este proceso el lodo es oxidado bioquímicamente en un reactor abierto o cerrado.
- Por medio de secado con aire.
En lechos de secado de arena o celdas durante 3 meses por lo menos. Durante 2 de los 3 meses la temperatura promedio diaria debe ser superior a 0°C.
- Por medio de digestión anaerobia.
Entre 15 días de 35°C a 55°C y 60 días a 20°C. Emplea microorganismos que trabajan en un medio libre de oxígeno, convirtiendo los sólidos volátiles en CO₂, CH₄ y NH₄, estas reacciones se llevan a cabo en un tanque cerrado que puede o no ser calentado (Santos M, 1998).
- Por medio de Composteo.
En contenedor, pila estática aireada o en surcos a 40°C o más durante 5 días y en el transcurso de ese periodo a más de 55°C durante 4 horas. Para poder realizar el Composteo es necesario añadir agentes como viruta, restos de corteza, aserrín, paja o lodos ya composteados a los lodos sin tratar para absorber humedad, incrementar la porosidad y servir como fuente de carbono, la mezcla es almacenada en pilas, sacos o tanques por un periodo de tiempo para que sean descompuestos en forma biológica. En este periodo la temperatura se eleva en forma natural por arriba de 55°C. Es necesario mezclar frecuentemente tanto para airear como para controlar la temperatura (Santos M, 1998).
- Estabilización con cal.
Por más de 2000 años el Ca(OH)₂ o cal se ha empleado para estabilizar y desodorizar el estiércol. Actualmente, el proceso de estabilización alcalina para el control de patógenos en lodos cobra mayor popularidad. En el proceso se emplea cal hidratada (Ca(OH)₂), deshidratada o cal viva como se le conoce comúnmente (CaO) o cenizas en cantidades suficientes para elevar el pH. Por lo que el lodo en forma líquida o con una alta concentración de sólidos se puede estabilizar mezclándolo con el álcali.

La estabilidad con cal reduce los patógenos en un 99% y tiene una eficiencia parcial sobre los huevos de helmintos, más sin embargo, no reduce el contenido de sólidos volátiles, por lo que si el pH desciende de un valor de 11 los procesos biológicos se pueden reactivar. Si se mantiene una

temperatura considerablemente elevada durante el proceso, la remoción de organismos patógenos se ve incrementada. (EPA, 1992)

En la tabla 3 se muestran las principales tecnologías que se utilizan para reducir los patógenos y se especifican qué tipo de biosólidos generalmente se pueden obtener a partir de su aplicación.

Tabla 3 Tecnologías utilizadas para reducir patógenos y obtener biosólidos clase A o clase B

| Tecnología | Tipo de biosólidos que se pueden obtener | |
|-------------------------|--|---------|
| | Clase A | Clase B |
| Digestión aerobia | X | X |
| Digestión anaerobia | | X |
| Estabilización alcalina | X | X |
| Composteo | X | X |
| Secado | X | X |
| Tratamiento con calor | X | |
| Pasteurización | X | |
| Irradiación | X | |

Existen diferentes tecnologías para la reducción de organismos patógenos; algunas de ellas se aplican para obtener tanto biosólidos clase A como clase B. En el punto 5.2.2 se mencionan los parámetros de operación que deben cumplirse para cada caso. Es importante mencionar que la diferencia que existe entre una misma tecnología para la obtención de biosólidos clase A o B es la diferencia de temperatura durante el proceso.

5.2.2 Clasificación de los biosólidos

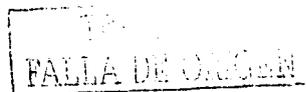
a) Biosólidos clase A.

Para que un biosólido sea considerado de clase A, la densidad de patógenos se debe reducir por debajo de los límites de detección mencionados a continuación:

- Menor a 3 organismos de *Salmonella sp*, por 4 gramos de sólidos secos totales, determinados como Número más probable (NMP).
- Menor a 1 virus entérico por 4 gramos de sólidos totales.
- Menor a 1 huevo de helminto viable por 4 gramos de sólidos totales.

A pesar de esto, existe el riesgo de que ocurra recrecimiento de los organismos; por lo que para evitar ésto, todas las opciones para obtener biosólidos clase A requieren el siguiente monitoreo de organismos.

- La densidad de coliformes fecales en el lodo debe ser menor a 1000 NMP por gramo de sólidos totales, o



- La densidad de Salmonella sp debe ser menor a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales

Los requerimientos anteriores se deben cumplir en el momento de su empleo o disposición, o en el momento de preparar el biosólido para su distribución en bolsas u otros contenedores y su deposición en suelos.

Cuando estos biosólidos van a ser aplicados al suelo o dispuestos en forma superficial, deben cumplir una de las opciones de reducción de atracción de organismos vectores (organismos que pueden transportar los patógenos de los lodos; pueden ser insectos, roedores, pájaros, etc.).

b) Biosólidos clase B

La obtención de biosólidos clase B implica la reducción adecuada de la densidad de patógenos, lo cual se debe demostrar por una densidad de coliformes fecales menor que 2, 000,000 (NMP o unidades formadores de colonia (UFC) por gramo de sólidos totales en base seca, por lo que la determinación se realiza tomando siete muestras del lodo tratado al momento de su uso o disposición y el valor que se compara con el límite mencionado es la medida geométrica de los valores de densidad para cada muestra, por lo que no es necesaria la reducción de huevos de helminto viables en este tipo de lodos, no obstante, los biosólidos de clase B se utilizan para aplicación a granel en suelo agrícolas, bosques, sitios de contacto público y sitios de restauración. También es necesario que los lodos cuenten con esta calidad, si van a ser dispuestos superficialmente, a menos que la unidad activa donde se estén aplicando los sólidos se cubra al final de cada día de operación.

Debido al contenido de microorganismos patógenos, la aplicación de biosólidos de clase B se encuentra restringida para cultivos, pastoreo de animales y lugares de acceso público hasta que los factores ambientales reduzcan sustancialmente los patógenos, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4 Restricciones para la cosecha, pastoreo de animales y acceso público en sitios donde se han aplicado biosólidos clase B

| Restricciones para la cosecha | |
|---|--|
| a) | Los cultivos en los que las partes comestibles no tocan la superficie del suelo, no deben cosecharse antes de que pasen 30 días a partir de la aplicación de biosólidos |
| b) | Los cultivos en los que las partes comestibles tocan la mezcla biosólidos/suelo y están completamente por arriba del suelo, no deben cosecharse antes de transcurridos 14 meses a partir de la aplicación de los biosólidos |
| c) | Los cultivos cuyas partes comestibles se encuentran por debajo de la superficie de un suelo en el que los biosólidos hayan permanecido en la superficie durante 4 meses o más antes su incorporación con el suelo, pueden cosecharse cuando se cumplan 20 meses después de la aplicación de los biosólidos |
| d) | Los cultivos con partes comestibles bajo el nivel del suelo donde los biosólidos permanezcan en la superficie por 4 meses o menos antes de su incorporación con el suelo, pueden cosecharse cuando se cumplan 38 meses después de la aplicación de los biosólidos |
| e) | El pasto que crece en suelo donde se han aplicado biosólidos, no deben transportarse a suelos con un alto potencial de exposición al público o en prados si no ha pasado por lo menos un año desde la aplicación del biosólido, a menos que la autoridad competente especifique algo diferente |
| Restricción para el pastoreo de animales | |
| a) | Los animales pueden pastorear en suelos después de 30 días de la aplicación de biosólidos |
| Restricciones para contacto público | |
| a) | El acceso a suelos con un alto potencial de exposición pública, tales como parques o canchas deportivas, están restringidas durante un año después de la aplicación de los biosólidos |
| b) | El acceso a suelos con bajo potencial de exposición al público, por ejemplo, terrenos para cultivo privados, están restringidos durante 30 días después de la aplicación del biosólidos |

Fuente: EPA, (1994^a).

5.2.3 Usos de los biosólidos

En el Reino Unido el principal destino de los lodos municipales es su aplicación en campos agrícolas, para 1991 el 42% de los lodos generados eran dispuestos de esta manera, mientras que el 30% se vertía en el mar; sin embargo se planteó que para el año 1998 se dejaría de disponer lodos de esta última forma (Davis, 1996). El mismo autor proporciona una tabla donde se indica el destino que tienen los lodos generados en aquel país como se aprecia en la Tabla 5.

La política europea incorpora el concepto de desarrollo sustentable y tiene la siguiente prioridad en el manejo de los lodos: a) prevención, b) minimización, c) reciclaje, d) incineración (con aprovechamiento de energía) y e) relleno sanitario (Davis, 1996).

La Comunidad Europea en su conjunto, disponía en 1990 – 1991 del 40% de sus lodos en rellenos sanitarios. En esa región los generadores de lodos se enfrentaban con problemas como: a) falta de sitios de disposición, b) aumento en las presiones de las normativas ambientales y c) necesidad de encontrar soluciones económicamente efectivas para disponer de ellos, por lo que en general con mejores prácticas de manejo, es factible que los lodos puedan disponerse en un mayor número de sitios (Davis, 1996).

Tabla 5 Sitios de disposición de lodos en el Reino Unido 1990-1991
(x10³t materia seca/año)

| Sitio o destino | Total de lodos |
|---------------------------------|----------------|
| Agricultura | 465 (42%) |
| Tierras de disposición de lodos | 25 (2%) |
| Vertido al mar | 334 (30%) |
| Incineración | 77 (7%) |
| Relleno sanitario | 88 (8%) |
| Beneficio | 68 (6%) |
| Almacenamiento | 50 (5%) |

(Davis, 1996).

En el Valle Salinas condado de Monterrey, California, Estados Unidos, se tenían problemas por la extracción excesiva de agua subterránea, lo que ocasionaba que el nivel freático bajara y se produjera una intrusión salina hacia los acuíferos. En 1980 se arrancó un proyecto (Monterrey Regional Water Pollution Control Agency, 1987) con el que se pretendía mostrar que el uso de agua residual tratada no causaba daños a los suelos y los cultivos no se veían afectados en su rendimiento y calidad para consumo humano. Se montó un experimento en el que se comparó el riego con agua de pozo y agua residual tratada por el proceso Title-22 (T-22) y un efluente filtrado. Este experimento que tuvo una duración de cinco años demostró que: 1) no había acumulación de metales pesados en los suelos; 2) los niveles de salinidad eran más altos en las aguas tratadas, pero sin llegar a niveles que impidan su uso en la agricultura (STD<480mg/L, adecuado para riego; STD>1920mg/L, inutilizable para la agricultura), 3) el consumo de las hortalizas cultivadas no representaba un riesgo en la transmisión de virus, bacterias y coliformes patógenos; 4) no había acumulación de metales en las partes comestibles de los cultivos en que se hizo la prueba (alcachofa, brócoli, coliflor, apio y lechuga), 5) la irrigación con agua residual tratada no aportaba contaminantes al agua subterránea más allá de lo que pueden aportar los fertilizantes (evaluándose los mismos metales que para el suelo además de nitratos); 6) la tasa de infiltración no se vio alterada como consecuencia del riego con aguas tratadas (aporte de sodio), y 7) no se detectó la presencia de microorganismos patógenos en áreas

vecinas asociada con la dispersión de aerosoles provenientes de la zona de estudio. El aporte de nutrientes de los dos efluentes utilizados en el trabajo mencionado anteriormente, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Aporte de los efluentes de los procesos de tratamiento de agua residual Title 22 y tratamiento con filtrado

| Nutriente | Title-22 | Efluente filtrado |
|-----------|----------|-------------------|
| Nitrógeno | 34kg/ha | 37 kg/ha |
| Fósforo | 10 kg/ha | 28 kg/ha |
| Potasio | 52 kg/ha | 66 kg/ha |

Monterrey Regional Water Pollution Control Agency, (1987).

5.2.4 Aplicación de biosólidos al suelo

Muñoz G. et al., (1999) aplicaron diferentes dosis de lodos de una planta de tratamiento de agua residual municipal en un suelo agrícola del Valle del Guadalquivir, encontrando que la densidad aparente del suelo disminuyó cuando la dosis de lodo aplicada fue mayor a 80 Ton/ha aunque estadísticamente no fue significativo. En cuanto a la retención de humedad encontraron que la dosis más alta de lodos condujo a la retención de un mayor volumen de agua, lo que atribuyeron al incremento de microporos por la materia orgánica aplicada. La conductividad hidráulica saturada (Ks) disminuyó a medida que se incrementó la dosis de lodo, aunque el cambio más importante se presentó entre el testigo y el tratamiento con 40 Ton/ha, sin embargo, en este caso tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

Por otro lado, Palacios et al., (1999) trabajaron en un cultivo de plátano aplicando agua de cinco calidades diferentes preparadas a partir de mezclas de agua blanca (AB), efluente secundario (ES) y efluente secundario desalinizado de una planta de tratamiento de agua residual municipal en las Islas Canarias. La conductividad hidráulica se redujo en todos los casos, pero sin llegar a niveles críticos para el cultivo, la producción fue mayor en el tratamiento con efluente secundario (ES) y la conductividad eléctrica que era el factor de mayor preocupación debido a la susceptibilidad del cultivo a las altas concentraciones de sales en el agua de riego no superó en ningún caso el nivel crítico en el que se reducía la producción del cultivo a 0.5ds/m.

En la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Muñoz, (1997) realizó un trabajo sobre la lixiviación de aluminio en lechos de secado de lodos procedentes de un tratamiento primario avanzado con sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) en el suelo del ex - lago de Texcoco. Concluyéndose que es factible esta forma de disposición de lodos en esa zona, ya que el elevado pH de los suelos inmoviliza a las especies y complejos de aluminio. Por otro lado, advirtió que debido a su composición, estos lodos pueden aplicarse en suelos agrícolas, después de su estabilización con cal ($Ca(OH)_2$) de acuerdo con las restricciones que establecen la Comunidad Económica Europea y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (los reglamentos de ambos organismos no restringen la aplicación de lodos por

su contenido de aluminio), esta forma de disposición se encuentra limitada por la toxicidad del aluminio sobre cultivos agrícolas y forestales (la concentración de aluminio en los lixiviados tuvo un promedio de 151.1mg/L) aunque la disponibilidad de este metal también depende de las condiciones del pH del suelo donde se aplique.

Krogmann et al., (1997) comentan los trabajos de Shepherd, (1996) y de Misselbrook et al., (1996) quienes aplicaron lodos crudos y digeridos aeróbicamente con dos técnicas de aplicación una en superficie y otra en inyección. Ellos encontraron que hay una mayor lixiviación de nitritos con la aplicación de lodos digeridos en comparación con los lodos crudos y que la aplicación en la superficie produce menos lixiviados que la inyección.

El mismo autor cita el trabajo de Chen et al., (1996) en el que se compara la aplicación de biosólidos con la aplicación de estiércol bovino en pasto ray grass, y reporta que el estiércol liberó una gran cantidad de nitrógeno durante toda la fase experimental de 84 días, mientras que los biosólidos sólo liberaron nitrógeno durante las dos primeras cosechas.

En otros trabajos reportados por Krogmann et al, (1997), se muestran incrementos en el contenido de nitrógeno, fósforo, cobre y zinc, así como aumento en la salinidad y contenido de materia orgánica del suelo. En cuanto a propiedades físicas del suelo menciona el trabajo de Abdusharar (1996), quien encontró que la aplicación de biosólidos, mejora la tasa de infiltración y la estabilidad estructural del suelo, atribuyéndolo al incremento en la salinidad y contenido de materia orgánica.

5.3 Legislación para lodos

5.3.1 Normatividad para lodos en México

En México, es escasa la normatividad federal y estatal que regula el tratamiento y disposición de los sólidos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. Hoy en día, se considera que los lodos que se generan durante el tratamiento secundario del agua residual son residuos peligrosos y en consecuencia deben sujetarse a las regulaciones que al respecto emite el Instituto Nacional de Ecología (INE). La idea del uso benéfico de los lodos provenientes de aguas residuales domésticas y el empleo del concepto de biosólidos no se aplican aún en el país a pesar de una marcada tendencia internacional al respecto. Cabe mencionar que actualmente se lleva a cabo una revisión para normar el tratamiento de lodos y favorecer su reúso. En la Tabla 7, se mencionan algunos reglamentos y se hace un breve análisis de la parte relacionada con el manejo y disposición de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

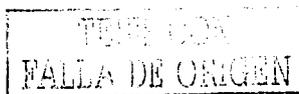
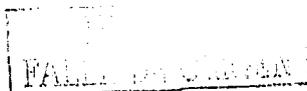


Tabla 7 Reglamentos ambientales nacionales que aplican para sólidos de aguas residuales

| Reglamento | Descripción |
|--|---|
| Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente (1996) | Los lineamientos que pueden ser aplicados para todos se encuentran en las secciones sobre prevención y control de la contaminación de aguas continentales o marinas y de suelos. La ley señala a las autoridades responsables de otorgar permisos y los criterios limitantes para utilizar a las aguas y suelos nacionales como contenedores finales de diferentes tipos de residuos |
| Proyecto de Norma Oficial Mexicana: NOM-055-ECOL-1996 | Establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado y la instalación de centros integrales para el manejo de residuos industriales peligrosos. En el punto 5.8 de la norma se considera que los lodos de las plantas para tratamiento pueden confinarse in situ siempre y cuando se coloquen a una distancia mínima de 1000 m del centro de población más próximo y asegurar que no habrá afectación a los mantos acuíferos |
| Norma Oficial Mexicana: NOM-052-ECOL-1993 | Establece las características de los residuos peligrosos, presenta un listado de los mismos y los límites de toxicidad al ambiente. De acuerdo con esta norma los lodos que provienen del tratamiento de las aguas residuales de las industrias textiles, de galvanoplastia, químico-farmacéutica, electroquímica, de la producción de pinturas, entre otras son residuos peligrosos. Así como los lodos del tratamiento biológico de aguas residuales, cuando se exceden los límites de toxicidad propuestos en el punto 5.5 de esta norma |
| Norma Oficial Mexicana: NOM-001-ECOL-1996 | Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Los lodos se mencionan únicamente en el Anexo 1 de esta norma, donde se define la técnica para la determinación de huevos de helmintos |

Los lodos de desecho del tratamiento biológico de aguas residuales se encuentran considerados como residuos peligrosos por la NOM-052-ECOL-1993 (DOF, 1993) "Norma oficial la cual establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente". Los lodos se consideran peligrosos por su capacidad biológica infecciosa y en algunos casos por su toxicidad. La clave CRETIB correspondiente es T (toxicidad al ambiente) y su clave ante el INE es RPNE1.1/02.



5.3.2 Normatividad existente en otros países sobre disposición de lodos biológicos.

La USEPA define como uso benéfico de los lodos a cualquier forma de disposición que aproveche al menos una de las siguientes propiedades de los lodos: a) contenido de nutrientes, b) acondicionador de suelos y/o propiedades combustibles (WPCF, 1988). Por lo que uno de los puntos de más cuidado en cuanto a la aplicación de lodos en terrenos agrícolas es el contenido de metales. Las normas que establecen los distintos países se basan en los siguientes criterios:

- 1) La no acumulación de metales pesados en el suelo más allá de concentraciones críticas.
- 2) La minimización en la acumulación de metales en el suelo
- 3) La estimación del riesgo.

Las normas para la disposición de lodos en suelos agrícolas para la Comunidad Económica Europea se encuentran en la Directiva 86/278/EEC. Por lo que tanto las normas Europeas como las Estadounidenses (fijadas por la EPA) establecen niveles críticos para la acumulación de metales en los suelos, pero no limitan a los compuestos orgánicos (Davis, 1976). Para la USEPA es un factor importante el contenido de patógenos en los lodos. El reglamento de esta asociación con relación al uso benéfico de lodos fue publicado en el Code of Federal Regulations en octubre de 1979, como el título 40, parte 257 (40-CFR-257), en donde se clasifica a los procesos de estabilización de lodos, que reducen significativamente el contenido de patógenos (PFRP) (WPCF, 1988).

Por otro lado, para la Comunidad Económica Europea, la disposición de los lodos de desechos de las plantas 86/278/CEE del 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente, en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura, tiene por objeto, regular la utilización de los lodos en la agricultura para evitar efectos nocivos en los suelos, la vegetación, los animales y el ser humano, fomentando al mismo tiempo su utilización. Prohíbe la aplicación de lodos en cultivos hortícolas y para aquellos cultivos frutícolas en los que el producto esté en contacto con el suelo y se consuman en estado fresco. De igual forma, limita la aplicación de lodos por su pH (cuando su pH es menor a 7), contenido de nitrógeno y fósforo y por su contenido de metales como cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo; Así mismo establece que en los suelos donde se realizará la aplicación de lodos debe realizarse un análisis para determinar el contenido de los metales antes mencionados y de su pH, de manera que la aplicación de los lodos no ocasione la acumulación de metales por encima de los valores establecidos (Directiva 86/278/CEE, 1986).

La EPA desarrolló el reglamento "Estándares para el uso y disposición de lodos provenientes del tratamiento de agua residual doméstica", el cual fue publicado en el Capítulo 40 del Reglamento de Código Federal (CFR) el 19 de febrero de 1993, y que comúnmente se conoce como apartado 503. Esta normatividad es de las primeras y más completas del mundo, por lo que será modelo para estructurar la norma mexicana.

En los reglamentos de la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (USEPA), el apartado 40 del código de regulaciones federales, en su parte 503 establece límites en la concentración de metales en los lodos, así como límites para las dosis acumuladas de ellos en los suelos. Los metales que se consideran en este reglamento son: arsénico, cadmio, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, selenio y zinc. Este mismo reglamento controla la aplicación de lodos productos de fosas sépticas a terrenos agrícolas, forestales, sitios con acceso al público y sitios en recuperación, para ello, clasifica a los lodos en clases A y B y establece parámetros microbiológicos y técnicas de tratamiento para cada uno de ellos (Tabla 8). Otro aspecto que controla este reglamento es la reducción de la atracción de vectores hacia los lodos, para ellos, las personas responsables de su elaboración y aplicación deben cumplir con requisitos sobre reducción de sólidos volátiles, condiciones térmicas durante la digestión, tratamiento térmico-alkalino, contenido de humedad de los lodos, así como cubrir los lodos con el suelo una vez realizada la aplicación (USEPA, 40 CFR parte 503, 1993).

Tabla 8 Clasificación de lodos en relación a sus principales parámetros microbiológicos

| Requisito | Lodos (clase A) | Lodos (clase B) | Producto de limpieza de fosa séptica |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------------------------|
| Coliformes fecales | <1000NMP por 1g | <2,000,000NMP por 1g | NR |
| Salmonela | <3 NMP por 4g | NR | NR |
| Virus entéricos | <1 UFP por 4g | NR | NR |
| Huevos de helminto viables | <1 por 4g | NR | NR |
| Unidades formadoras de colonias | NR | <2,000,000NMP por 1g * | NR |
| Tratamiento térmico | Alternativa 1 | NR | NR |
| Tratamiento térmico -alkalino | Alternativa 2 | NR | Requiere tratamiento térmico-alkalino |

NR: No recomendado

USEPA, 40 CFR parte 503, (1993).

Cabe señalar que en la sección 503.9 de esta norma se permite la utilización de lodos provenientes de una planta de tratamiento de tipo doméstico en las cubiertas de granos pequeños tales como avena, trigo o cebada antes de la cosecha.

ESTE CON
FALLA DE ORIGEN

5.4 Propiedades de los suelos

5.4.1 El sistema suelo

El término suelo se deriva del latín *Solum* que significa piso o terreno. En general el suelo se refiere a la superficie suelta de la tierra para distinguirlo de la roca sólida (Aguilera, 1990).

Son varios los factores que intervienen en la formación y desarrollo del suelo y es importante considerar las dos acepciones siguientes:

1. El suelo es un material mineral no consolidado sobre la superficie inmediata de la corteza terrestre que sirve como un medio natural para el desarrollo de las plantas terrestres.
2. El suelo es el material mineral no consolidado sobre la superficie de la tierra; que ha estado sujeto e influenciado por factores del medio ambiente como son el material madre, el clima, incluyendo efectos de humedad y temperatura, los macro y microorganismos y la topografía; todos éstos actuando en un periodo de tiempo y originando un producto, el suelo, que difiere del material del cual es derivado en muchas propiedades y características física, químicas, biológicas y morfológicas (Aguilera, 1990).

En el suelo existen nutrientes y trazas de elementos, los cuales resultan indispensables para el crecimiento de las plantas. Los suelos son muy complejos en su composición y constitución física. Los sólidos del suelo se encuentran formados por materiales minerales y orgánicos. Estos constituyen comúnmente del 35 al 75% del volumen total del suelo. El promedio de los suelos productivos de textura media es aproximadamente del 50%. El resto del volumen del suelo está formado por los poros entre las partículas. Los poros están llenos de agua y aire y deben conservarse en las proporciones adecuadas. Si el agua llena los poros, falta aire para la respiración de las raíces, y si el aire predomina, las plantas sufren por la falta de agua (Aguilera, 1990).

5.4.2 La fracción mineral del suelo

La fracción mineral del suelo consiste en grava, arena, limo y arcilla. La grava y la arena incluyen todas las partículas mayores de 0.05mm de diámetro.

La fracción de limo representa las partículas de diámetros entre 0.05 y 0.002 mm. Las partículas consisten, en su mayor parte, de minerales primarios como feldspatos, mica y cuarzo. Las partículas de limo proporcionan solo pequeñas cantidades nutrimentos directamente a las plantas. Los suelos que tienen una proporción elevada de limo pueden presentar la tendencia a compactarse y a dificultar la formación de una estructura granular.

La fracción de arcilla es la de mayor actividad físico - química del suelo. Debido al pequeño tamaño de sus partículas (<2mm), las arcillas tiene una gran superficie por unidad de masa. Además, esta superficie presenta carga por lo que adquieren sustancias con carga opuesta. Las arcillas del tipo de la montmorillonita se hinchan,



produciendo una superficie interna que sujeta al agua y a los elementos minerales. El detalle importante de las partículas de arcilla con relación a la nutrición de la planta, es la capacidad para adsorber iones los cuales pueden ser intercambiados por otros iones en cantidades equivalentes, como por ejemplo calcio, magnesio y potasio, los principales elementos intercambiables. En los suelos ácidos, el hidrógeno es el ion intercambiable dominante. Los elementos esenciales adsorbidos en cantidades menores en esta forma incluyen el hierro, zinc, manganeso y cobre (Aguilera, 1990).

La arcilla también tiene efectos importantes en las propiedades físicas del suelo. Actúa como aglutinante, agregando partículas de arena, limo y arcilla para formar agregados o peds. La arcilla tiene una elevada capacidad de adsorción de agua. Se hincha y se contrae con los cambios de humedad. Debido a estas cualidades físicas distintivas, las cantidades relativas y tipos de arcillas que contiene el suelo, influyen en el desarrollo de las plantas y la aptitud del suelo para la agricultura. Generalmente los suelos con contenidos intermedios de arcilla (del 5 al 40%) se prefieren para fines agrícolas (Ortiz, 1990).

5.4.3 Componentes del suelo

En general se puede decir que los suelos se encuentran compuestos por material mineral, material orgánico, solución del suelo y atmósfera del suelo; en la FIG. 1, se presenta la distribución porcentual respecto al volumen de los distintos componentes en un suelo típico.

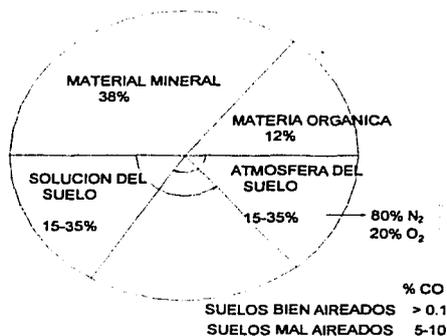


FIG. 1. Componentes del sistema suelo y su distribución en porcentaje de volumen (Ortiz, 1990).

En la Figura 1 se puede observar que el 38% de los componentes corresponden al material mineral, un 12% al material orgánico y del 15 al 35% a la solución del suelo, correspondiendo estos mismos porcentajes a la atmósfera del suelo. El contenido de materia orgánica del suelo depende de la cantidad de biomasa producida por la vegetación nativa y por las condiciones climáticas prevalecientes en el sitio, las cuales



influyen en la velocidad en que la biomasa muerta se descompone. En cuanto a los minerales, éstos son sustancias inorgánicas que tienen composición química y propiedades físicas definidas. En el suelo existen partículas secundarias o agregados. Los minerales, son partículas primarias o unitarias. Las partículas secundarias o agregados están conformados por la unión de las partículas primarias, por medio de cementantes (Ortiz, 1990).

5.4.4 *Propiedades físicas y químicas del suelo*

La unidad de estudio en los suelos es el perfil o sucesión de capas llamadas horizontes.

Propiedades físicas

Dentro de las propiedades físicas más importantes del suelo podemos contar a la textura, estructura, color, densidad aparente, densidad real, porosidad, infiltración, permeabilidad, conductividad, a continuación se citaran cada una de ellas.

5.4.4.1 *Textura*

Se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla del suelo. La importancia de su estudio radica en la influencia que ésta tiene con respecto a la cantidad de agua que puede almacenar un suelo, el movimiento de agua en el suelo, la facilidad de abastecer de nutrientes, de agua y de aire al mismo. Para determinar en campo la textura del suelo, se realiza una prueba relativamente sencilla, pero que requiere de algo de experiencia. Se toma una porción húmeda de suelo en la mano y se hace una pequeña pelota con ésta y se frota entre los dedos.

- En el suelo arenoso se siente arena suelta. No se puede formar una pelota y se cae en pedazos cuando se frota entre los dedos.
- El suelo limoso es liso, parcialmente arenoso y pegajoso y forma una pelota que se desmenuza fácilmente, es una combinación de arena y partículas de la arcilla.
- Los suelos de arcilla son lisos, pegajosos y plásticos. Los suelos de arcilla exigen más presión para poder formar una pelota.

Otra propiedad física del suelo es su permeabilidad. Ésta depende de la textura del suelo. Los suelos percolan agua a diferentes velocidades. Los suelos deben de regarse tanto como el suelo pueda absorber agua sin la necesidad de drenarse.

- Los suelos arenosos infiltran más de dos pulgadas de agua por hora. Son suelos muy porosos, con espacios grandes entre sus partículas, y con la característica de secar rápidamente.

- Los suelos limosos infiltran de 0.25 pulgadas a 2.0 pulgadas de agua por hora. Por lo que la tierra se encuentra suelta y porosa.
- Los suelos arcillosos infiltran menos de 0.25 pulgadas de agua por hora. Los suelos arcillosos son mas compactos con pocos espacios de aire entre las partículas.

En términos generales los suelos se dividen en suelos de textura fina y suelos de textura gruesa.

En los suelos de textura fina predomina la arcilla y tienen una capacidad mayor de adsorción de nutrientes, en general son los suelos más fértiles.

5.4.4.2 Estructura

Por estructura del suelo se entiende el arreglo de las partículas individuales en agregados secundarios. Aun con un examen somero de un suelo en un campo productivo, se demuestra que la mayor parte de los elementos más pequeños de arcilla y de limo están adheridos formando agregados complejos de tamaños y formas variables. La estructura del suelo generalmente se describe en función del tamaño (clase), de la forma (tipo), y del grado de desarrollo de los agregados.

Desde el punto de vista morfológico, la estructura del suelo se ha definido como la disposición o arreglo de las partículas primarias (arcilla, limo, arena). Otra definición se refiere a la capacidad para formar pedos o gránulos. (Aguilera, 1990). La estructura influye en la permeabilidad, el drenaje, la aeración y el desarrollo de raíces, afectándose la productividad del suelo y las labores de labranza.

A simple vista, es posible distinguir varios tipos principales de estructuras; que se mencionan a continuación:

1. Granular. Agregados no porosos, pequeños (tamaño menor a 2cm. De diámetro), de forma esferoide.
2. Migajosa. Agregados porosos, en donde se forman agregados pequeños y esferoides.
3. Laminar. En este tipo de estructuras, se forman agregados similares a placas, en donde las dimensiones verticales de los agregados en posición natural son menores que sus dimensiones horizontales. Por lo general, las placas a menudo se superponen e impiden la permeabilidad.
4. Bloques. Este tipo de estructuras forman bloques limitados por otros agregados, con caras lisas y vértices angulares bien definidos.
5. Bloques subangulares. Limitados por otros agregados, cuyas caras son irregulares y con vértices redondeados.

6. Prismática. Estas estructuras son agregados similares a columnas con la parte superior no redondeada.
7. Columnar. Este tipo se caracteriza en que las dimensiones verticales de los agregados en posición natural son mayores que sus dimensiones horizontales, encontrándose las columnas separadas por grietas verticales y generalmente se encuentran quebradas por grietas horizontales, las cabezas de las columnas son redondeadas.

Existen dos términos descriptivos par las condiciones en que no existe una estructura definida:

De granos separados: En la que cada partícula forma en sí una unidad como en la arena de duna.

Masiva: Las cuales son grandes masas uniformes de suelo cohesivo, como las del horizonte C de muchos suelos pesados.

Las capas de arcilla compacta, o de terreno duro, son condiciones del perfil del suelo que limitan el valor agrícola de la tierra. Las capas de arcilla compacta pudieron formarse en su lugar o, más específicamente en las zonas aluviales, de arcilla depositada que proviene de otras zonas. Las capas de terreno duro pueden estar cementadas y a menudo consisten en una gran proporción de partículas de limo.

Cuando estas dos clases de terrenos se presentan a profundidades mayores de 30 o 45 cm, es difícil mejorarlos. La estructura ideal para la producción de cultivos puede depender de muchos factores. Yoder en 1937 obtuvo el mayor rendimiento de semilla de algodón en semilleros preparados artificialmente con grupos de agregados que variaban de 3.17 mm a 6.35 mm de diámetro.

Tanto el tamaño, como la estabilidad de los agregados son importantes en la estructura del suelo, ya que los suelos formados de agregados que se desintegran cuando se encuentran mojados, tienen poca ventaja sobre los suelos pulverizados. Ambos suelos forman costras duras después del riego y son difíciles de cultivar, por lo que la buena aeración y las relaciones convenientes de humedad en el suelo requieren que una gran proporción de la masa de éste, sea de agregados de tamaño intermedio, y que los mismos sean relativamente estables cuando se mojen.

De acuerdo con Fitzpatrick (1987), el grado y tipo de agregación determinan la aireación y la permeabilidad y, por lo tanto, la capacidad de infiltración y de movimiento del agua. Por otro lado determinan el espacio poroso y en consecuencia la capacidad de aireación. El aire del suelo tiene la siguiente composición: nitrógeno, 79-80%; oxígeno, 15-10%; y bióxido de carbono, 0.25-5.0%. La atmósfera arriba del suelo difiere en que sólo contiene un 0.03% de bióxido de carbono.

La estructura influye también en la erosión potencial debido a que la presencia de horizontes superficiales con una estructura masiva reduce la infiltración con, lo que hay mayores escurrimientos, y por consiguiente aumenta el riesgo de erosión. En la actualidad existen varios sistemas buenos para clasificar agregados, pero no existe un acuerdo en general, respecto a la clasificación de los poros. Sin embargo, el sistema presentado por Brewer, (1964), tiene algunos méritos. No obstante, en ciertos aspectos, parece superfluo tener dos sistemas de clasificación, uno para los agregados y otro para los poros, debido a que en gran parte son interdependientes o complementarios entre sí, excepto cuando dentro de los agregados se presentan poros, por lo que parece más apropiado tener un sistema basado en el tipo de agregados, debido a que la agregación es el tipo más común de disposición, y describir a los poros en términos de su tamaño y forma, es más complejo.

La mayoría de los sistemas de clasificación de estructura que se usan en pedología se basan de manera principal en características de campo y por tanto, son algo bastos. Para lograr una mayor comprensión de la estructura no disturbada se puede impregnar el suelo con una resina que contenga un colorante fluorescente. Por lo que el bloque impregnado es cortado de tal manera que se expone la parte central no disturbada, que se estudia o se fotografía empleando luz ultravioleta. Con esta técnica es posible obtener fotografías en las cuales las áreas negras corresponden al suelo, las claras a los espacios porosos; Más aún, es posible estudiar esas muestras con ampliaciones muy diversas, obteniéndose de esta forma una visión detallada de la estructura del suelo.

Con el método anteriormente descrito se ha encontrado que gran parte de la agregación que se observa en el campo en muestras de mano es causada por disturbio. Muchos de los suelos que parecen tener agregados, al ser examinados con luz UV muestran una agregación escasa. Por tanto, resulta necesario diferenciar entre los suelos que contienen agregados discretos y aquellos en que los agregados se encuentran mal formados o unidos entre sí en forma parcial. Por lo que cuando los agregados están separados, a la estructura, se le denomina completa; y cuando los agregados se encuentran parcialmente unidos, la estructura es denominada incompleta.

Fitzpatrick comenta, que es posible estudiar la estructura en secciones delgadas. Usando secciones delgadas grandes, en la mayoría de los suelos es posible observar el rango completo de estructuras, iniciándola a simple vista y continuando después con el examen microscópico con diversos aumentos. Las formas estructurales que se observan con el microscopio tienen forma similar a las que se ven a simple vista, y en algunos casos los macropeds son las únicas unidades estructurales presentes. Por tanto, los términos que se dan a continuación se pueden usar para las descripciones de secciones delgadas. Sin embargo, una característica adicional notable de los peds y suelos masivos es la

presencia de poros discretos que se describen en términos de su frecuencia, tamaño, forma, etc. En los poros discretos se presentan varias formas normales recurrentes, como poros circulares pequeños u ovoides, que se atribuyen a la formación de burbujas de gases.

En cierto número de casos, la estructura de un horizonte puede ser mixta o compuesta. La estructura compuesta, por lo general se presenta en suelos con estructura prismática o columnar, en la cual los agregados grandes están formados por agregados más pequeños incompletos. Las estructuras mixtas ocurren cuando en el mismo horizonte están operando en forma simultánea dos o más procesos contrastantes. Ello es común cuando el suelo tiene una fauna bastante vigorosa como de termitas y gusanos, que producen áreas de materia fecal granular que se ramifica a través de las áreas con otras formas de agregados.

Según Kemper (1986), se han propuesto varios procedimientos para mediar el tamaño y la estabilidad de los agregados del suelo. El método más comúnmente empleado, es colocar el suelo sobre una serie de cedazos, sumergiendo el conjunto en agua, y después de que el suelo se ha mojado bien, son agitados suavemente los cedazos hasta que los agregados y las partículas del suelo quedan en reposo sobre el cedazo que corresponde a su tamaño. El grado de estabilidad de la estructura, se mide comparando el porcentaje por peso de partículas mayores de 0.5 mm con el porcentaje dentro de los mismos límites de tamaño para el mismo suelo en el que todos los agregados se desintegran completamente.

5.4.4.2.1 Estabilidad de los agregados

De acuerdo con Fitzpatrick (1987), la agregación es el proceso por el cual cierto número de partículas son mantenidas o juntadas para formar unidades de formas variables pero características. En muchos casos se tiene poco conocimiento de los detalles del mecanismo, pero al parecer existen ciertas correlaciones entre el tipo y grado de agregación de los "agregados" y otras propiedades del suelo. Por tanto, en muchas situaciones, sólo es posible indicar la relación general que existe entre los agregados y otras características. Así es fácil comprender cómo las partículas cementantes mantienen juntas a las partículas, pero resulta difícil explicar cómo se producen las formas características y a menudo regulares. Por lo general, al tipo y grado de agregación se le denomina estructura. Los principales agentes que intervienen en la formación de agregados son:

- Arcilla y humus
- Sustancias cementantes
- Mesofauna
- Raíces de las plantas



- **Expansión y contracción**
 - **Congelación y deshielo**
 - **Microorganismos**
 - **Cationes intercambiables**
 - **Labranza**
-
- **Arcilla y humus**
La arcilla y el humus tienen capacidad para unir partículas y son los principales agentes a los que se deben gran parte de la agregación en los horizontes superiores del suelo.
 - **Sustancias cementantes**
Muchos productos de hidrólisis, en especial compuestos de hierro y aluminio, pueden cementar entre sí grupos pequeños de partículas. En algunos casos, la cementación progresiva forma horizontes muy duros y masivos. También el depósito continuo de carbonato de calcio puede llevar a la formación de horizontes masivos.
 - **Mesofauna**
Las lombrices, los gusanos enquistados y otros organismos que ingieren materias orgánicas y minerales producen grandes cantidades de materias fecales, en donde la actividad de cualquiera de ellos es en especial vigorosa, por lo que los horizontes enteros pueden estar formados de gránulos fecales, de sus formas granulares, ovoides o vermiformes características.
 - **Raíces de las plantas**
Las raíces delgadas de muchas plantas, en especial de las gramíneas, mantienen unidos grupos pequeños de partículas para formar una estructura migajonosa o granular.
 - **Expansión y contracción**
En ciertos suelos, en particular aquellos que tienen un contenido elevado de arcilla como la montmorillonita, se puede efectuar expansión y contracción en respuesta a la ganancia o pérdida de agua, lo cual da origen a grietas extensas y a la formación de prismas grandes o peds en forma de cuña con superficies laterales alisadas. Cuando sólo hay presente una cantidad pequeña de arcilla expansiva, el cambio de volumen que se registra con las variaciones de humedad es pequeño, pero por lo general es suficiente para dar origen a una estructura de forma prismática o de bloques.
 - **Congelación y deshielo**



Esos dos procesos pueden producir estructura masiva en forma de placas o subcuboides.

- **Microorganismos**
Los microorganismos pueden ayudar a la formación de estructura secretando diversos compuestos mucilaginosos o gomas. Estas sustancias unen entre sí las partículas para formar migajas o gránulos, que se originan con más frecuencia en presencia de materia orgánica y de una microflora activa.
- **Cationes intercambiables**
En ciertos casos, la naturaleza de los cationes intercambiables ejercen influencia; por ejemplo, la presencia de cantidades grandes de calcio producen floculación, y la formación de una estructura migajonosa o granular en los horizontes superiores del suelo, por otro lado el sodio ocasiona una dispersión del sistema y la formación de una estructura masiva o columnar.
- **Labranza**
La estructura es una propiedad un tanto efímera que puede ser alterada fácilmente con la labranza, y debido al mal manejo, el intercambio de una estructura por naturaleza buena, granular o migajonosa, se da a otra masiva o de bloques. un ejemplo de ello es la formación de un piso de arado a cierta profundidad, el cual debido a la labranza reiterada a una profundidad dada con implementos pesados, Puede cambiar la estructura, sin embargo, el barbecho y otras operaciones de labranza son efectuados para mejorar la estructura y aireación del suelo, de hecho, es probable afirmar que cualquier incremento de productividad en el futuro, será logrado mediante el mejoramiento y manejo de las estructuras, con técnicas mejoradas de fertilización, de cuyos principios ya se cuenta con una comprensión buena (Fitzpatrick, 1987).

5.4.4.3 Color

El color del suelo brinda información sobre el contenido de materia orgánica en el suelo, el tipo de drenaje de actividad biótica y de fertilidad.

Tabla 9 Tipos de suelo en relación al color que presentan

| Condición | Oscuro (gris oscuro, café al negro) | moderadamente oscuro (café a café amarillento) | ligero (café palido, amarillo) |
|-----------------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------|
| Materia orgánica | alto | medio | bajo |
| factor de erosión | bajo | medio | alto |
| aeración | alto | medio | bajo |
| Nitrógeno disponible | alto | medio | bajo |
| fertilidad | alto | medio | bajo |
| Condición | | Color Subfase del suelo | |
| Suelos anegados, aireación pobre, | | gris (En suelos con poca lluvia.) | |
| Suelos bien drenados | | amarillo, café rojizo, negro (suelos de bosque) | |
| Suelos pobremente drenados | | gris moteado (en suelos húmificados) | |

5.4.4.4 Densidad aparente

Se define como el cociente que resulta de dividir el peso del suelo seco entre el volumen total, incluyendo los poros, generalmente se expresa en g/cm^3 , conceptualmente, es lo mismo que la gravedad específica o peso volumétrico.

$$D_a = P_{ss} / V_t$$

Donde:

D_a = Densidad aparente, g / cm^3

P_{ss} = Peso del suelo seco, g

V_t = Volumen total, cm^3

Los suelos arenosos son relativamente bajos en el espacio vacío total y proporcionalmente presentan densidades aparentes altas. Los valores de la densidad aparente varían en función de las propiedades de los suelos



fundamentalmente con la textura y el contenido de materia orgánica (Ortiz, 1990).

Tabla 10 Valores promedios de densidad aparente para las diferentes fracciones minerales del suelo

| Fracciones minerales del suelo | Densidad aparente |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Arenas | 1.6 - 1.7 g / cm ³ |
| Francos | 1.3 - 1.4 g / cm ³ |
| Arcillas | 1.0 - 1.2 g / cm ³ |
| Suelos orgánicos | 0.7 - 1.0 g / cm ³ |

5.4.4.5 Densidad real

La densidad real de un suelo, es la relación que existe entre el peso de éste, en seco (Pss) y el volumen real o sea el volumen de sus partículas (Vp) generalmente expresado en g / cm³, como se puede observar en la siguiente relación matemática.

$$D_r = P_{ss} / V_p$$

Por lo que el tamaño y el arreglo de las partículas del suelo no afectan la densidad de las partículas. Sin embargo, la materia orgánica que pesa mucho menos de un volumen de sólidos minerales influirá en ésta.

5.4.4.6 Porosidad

El espacio poroso en los suelos es importante dado que estos se encuentran totalmente llenos de agua y aire, los cuales se mueven a través de los espacios porosos, de tal forma, que la cantidad de agua y oxígeno necesarios para el crecimiento de las plantas y la capacidad de conducir agua en el suelo, se encuentran relacionadas con la cantidad y tamaño de los poros del mismo. De acuerdo con Fitzpatrick (1987), los poros son la parte del suelo ocupada por el agua o por la atmósfera del mismo. Los poros pueden ser discretos, o formar una fase continua en que puede efectuarse el movimiento. En algunos casos se puede considerar que la formación de los poros es la primera etapa de la formación de pedos. Esto se observa en aquellos casos donde los poros se formaron por encogimiento y rajaduras. En este mecanismo de formación de poros, en el mismo punto, se inician una, dos, o tres grietas que irradian hacia fuera con un ángulo de 120° entre cada rama. Esos poros de tres ramas son comunes en suelos de zonas tropicales y subtropicales, por lo que cuando hay un encogimiento notable, cada rama se bifurca y se conecta con las ramas de otros poros de tres ramas, formando pedos completos o incompletos y poros continuos.

En otros casos, los poros son discretos, de forma esférica u ovalada, formados por las burbujas de gases liberadas de la solución de suelo con

el secamiento o la congelación, no obstante, los poros también se pueden formar por disolución del material o la desaparición del hielo.

5.4.4.7 Permeabilidad y conductividad hidráulica

Al aplicar los riegos, la permeabilidad del suelo se ve grandemente modificada. Sokolovsky, (1930), señaló que la destrucción de los agregados del suelo durante el riego, reduce su permeabilidad, y propicia la formación de las costras. Las costras de los suelos retardan la aireación, obstaculizan el brote de las plántulas, y trastornan las funciones normales de las raíces de las plantas.

Colé, (1957) expuso que en el estado de California, cuando se riega por el método de tablas, con el cual se inunda completamente la superficie del suelo, éste se hace lodo, con lo cual se ve favorecida la formación o se aumenta la formación de terrones en el suelo y se hace más difícil la labranza de la tierra.

La buena permeabilidad e infiltración de los suelos superficiales requiere de una textura arenosa, con un grado de estabilidad moderada en el agua. Su estado granular puede mantenerse principalmente, sembrado el cultivo adecuado, por la adición de materia orgánica, y por la labranza. La mala permeabilidad de los subsuelos es difícil de manejar, más sin embargo en algunos casos, el drenaje y secado ocasionales del subsuelo mejoran la permeabilidad. Cuando el porcentaje de sodio intercambiable es elevado, es benéfico el tratamiento con adición de yeso, en el caso de las capas duras cementadas que pueden romperse con un arado del subsuelo, y cultivándolo, se pueden obtener mejoras permanentes. Por otra parte los suelos arables densos, son mejorados con una labor de arado profunda de subsuelo, y cultivando en ellos plantas de raíces profundas. En cada caso, se debe determinar la causa de la mala permeabilidad, y las medidas para su control deberán basarse en la causa que se encuentre, no obstante siempre se encuentra una solución fácil, a los problemas de permeabilidad, por ejemplo, los subsuelos profundos de arcilla plástica pesada son solamente muy poco permeables, y en muchas zonas no se han inventado métodos para mejorarlos.

Por lo que la permeabilidad del suelo puede entenderse como la resistencia que opone éste al flujo del agua. De esto se obtienen los coeficientes de permeabilidad de acuerdo con lo contado por (Ortiz, 1990). Las clases propuestas para indicar la permeabilidad consideran las siguientes láminas de agua señaladas en la Tabla 11.

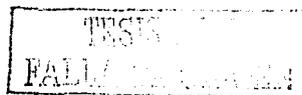


Tabla 11 Clasificación de velocidades para indicar permeabilidad

| Intervalo | cm/ hora | m / s |
|------------|---------------|--|
| Muy lenta | Menos de 0.15 | Menos de 4.16×10^{-7} |
| Lenta | De 0.15 a 0.5 | De 4.16×10^{-7} a 1.38×10^{-6} |
| Moderada | De 0.5 a 15 | De 1.38×10^{-6} a 4.16×10^{-5} |
| Rápida | De 15 a 25 | De 4.16×10^{-5} a 6.94×10^{-5} |
| Muy rápida | Mas de 25 | Mas de 6.94×10^{-5} |

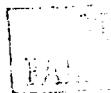
5.4.4.8 Contenido de materia orgánica

La materia orgánica del suelo se encuentra compuesta por una gran variedad de materiales, que van desde residuos frescos de plantas y animales hasta los grupos complejos de compuestos de descomposición lenta y de apariencia casi uniforme, denominado humus. La materia orgánica debe de considerarse como una parte transitoria del suelo, que se encuentra descomponiéndose continuamente y que debe reemplazarse con regularidad. Por otra parte la materia orgánica del suelo desempeña funciones importantes en el mejoramiento de los suelos para el desarrollo de las plantas. Quizá el hecho más considerable es que la materia orgánica es un importante almacén de nutrimentos para la planta, ya que casi todo el nitrógeno del suelo se almacena en ella. En los suelos agrícolas, del 20 al 80% del fósforo está formado por los compuestos orgánicos. La proporción de azufre en la materia orgánica es similarmente alta. Otros elementos minerales se encuentran asociados con la materia orgánica de los suelos en menores, pero más significantes proporciones. Estos elementos asociados se hacen asimilables por las plantas principalmente al irse descomponiendo la materia orgánica.

Una segunda función importante de la materia orgánica, es mejorar las propiedades físicas del suelo. Los materiales orgánicos gruesos mantienen separados los minerales del suelo, y forman poros o canales en la masa del suelo cuando se descomponen. La materia orgánica al descomponerse se convierte en parte, en compuestos gomosos que actúan como agentes aglutinantes, manteniendo juntas las partículas del suelo, contribuyéndose con ello a formarles una estructura granular (Fitzpatrick, 1987).

La fracción de humus de la materia orgánica, presenta una capacidad mucho mayor para intercambiar cationes que la arcilla (de tres a seis veces mayor), ayudando así a mantener los nutrientes en forma que las plantas los puedan aprovechar, por lo que los iones intercambiables en las partículas de humus pueden extraerse para su beneficio por reacciones idénticas a las que se dan para los iones retenidos por la arcilla (Ortiz, 1990).

La materia orgánica absorbe agua, da a los suelos un color más oscuro y sirve como energía para los microorganismos, por lo que sin la materia orgánica, los suelos que contienen proporciones elevadas de arcilla, se tornan físicamente inmanejables, por lo que a los suelos arenosos les



falta cuerpo y capacidad para retener los nutrimentos. De trascendental importancia es el hecho, de que el agricultor pueda cambiar el contenido orgánico de los suelos, mientras que no puede hacer mucho para cambiar su porción mineral (Ortiz, 1990).

El suelo se mueve continuamente en un ciclo natural por el oxígeno, el agua y la descomposición de materia orgánica de las plantas y animales. Estos elementos crean vida en el suelo, por lo que podemos hablar de un suelo saludable si éste funciona bien, y los nutrientes se encuentran disponibles en la planta. Se dice que un suelo en buen estado consiste en un 93% de minerales y un 7% de sustancias bio-orgánicas. La formación bio-orgánica, consiste en un 85% de humus, un 10% de raíces, y un 5% de edafón.

De acuerdo con Ortiz (1990), el edafón, es todo un ecosistema que consiste en microorganismos, hongos, bacterias, gusanos de tierra, fauna del micro espacio, y fauna del macro espacio como sigue:

| | |
|------------------------------|-----|
| a) Hongos / algas | 40% |
| b) Bacterias / actinomycetes | 40% |
| c) Gusanos de tierra | 12% |
| d) Macrofauna | 5% |
| e) Micro / meso fauna. | 3% |

Por lo que algunos de los nutrientes se pierden naturalmente a través de la lixiviación o a través de la desnitrificación. Por otra parte, las plantas cultivadas toman nutrientes del suelo.

Cuando se decide empezar un programa de mejoramiento del suelo biológicamente equilibrado, los análisis del suelo, muestran valores mínimos de reservas de nutrientes e indican que grandes cantidades de fertilizantes, pueden ser aplicadas para satisfacer las necesidades del suelo. Sin embargo, después de unos años de un programa biológico exitoso, los análisis pueden mostrar niveles residuales altos de nutrientes disponibles, aún cuando no se haya empleado fertilizante químico durante ese tiempo (Ortiz, 1990).



Propiedades químicas

Dentro de las propiedades químicas de los suelos se citan las siguientes:

5.4.4.9 Capacidad de intercambio de cationes

El intercambio catiónico de los suelos es una reacción química reversible, por lo que los cationes adsorbidos en la superficie de los minerales de algunos compuestos orgánicos, pueden ser remplazados reversiblemente por aquellos de las soluciones salinas y ácidas. La capacidad de intercambio catiónico (expresada generalmente en $[\text{cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}]$), se define como la suma de cationes intercambiables del suelo. (SARH, 1978). Los cationes Ca, Mg, K y Na de intercambio de los suelos se comportan como ácidos débiles y en estado de saturación, como bases en equilibrio con el aire, presentando un pH alcalino.

5.4.4.10 pH

Sorensen (1909), definió el pH como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno. El valor pH de la solución del suelo es influenciado por la actividad que tienen en los suelos la mayoría de los iones que intervienen en la nutrición vegetal en particular el ion hidrógeno. El valor del pH de la mayoría de los suelos se encuentra sometido a una variación periódica, siendo más bajo durante la estación cálida – seca y más alto durante la estación fría – húmeda.

En la FIG. 2 se aprecian los rangos utilizados comúnmente para clasificar el pH de los suelos, así como los valores usados para describir su reacción. En los suelos minerales los rangos extremos de pH se extienden desde 3.5 hasta valores de 10 o más; por otra parte los suelos sódicos pueden alcanzar valores de 11. (Miramontes F. B. *et al*, 1999).



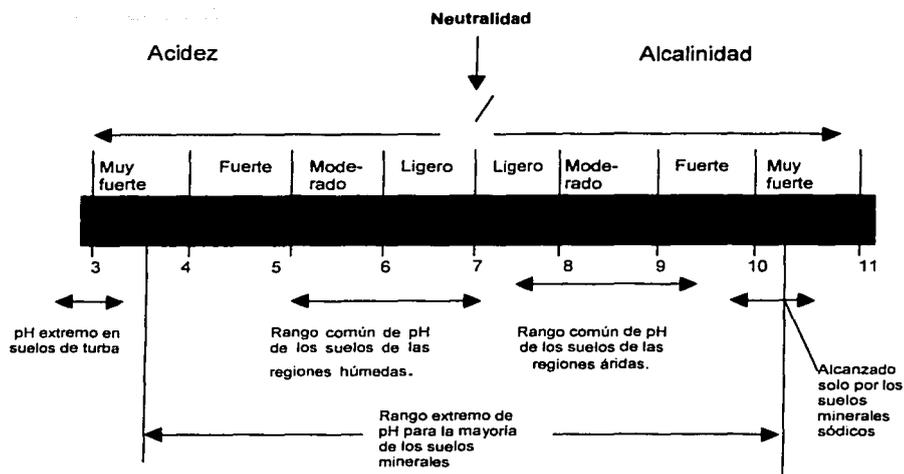


FIG. 2. Rangos de pH de la mayoría de los suelos minerales tanto de las regiones húmedas como áridas. Valor pH extremo de los suelos sólidos y suelos de turba muy ácidos

5.4.4.11 *Salinidad y sodicidad*

Las plantas que crecen en suelos afectados por las sales, responden a la concentración de ellas o dicho de otra manera, responden a la presión osmótica de la solución del suelo. La concentración del suelo varía inversamente con el contenido de agua de éste. Para conocer el nivel de salinidad de los suelos, es necesario medir la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada, la conductividad eléctrica, es una medida de la capacidad de un material para transportar corriente eléctrica. La conductividad de una solución electrolítica, depende de la concentración total de iones presentes en agua, así como de la movilidad de cada uno de los iones disueltos, su valencia y de la temperatura a la que se realiza la determinación. En la Tabla 12 se presentan los diferentes efectos en suelos respecto a la conductividad eléctrica (PROY NOM-021-RECNAT-2000, referencia **AS-18**).

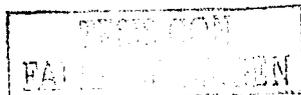


Tabla 12 Efectos provocados a los suelos en relación con la conductividad eléctrica

| CE dS m ⁻¹ a 25°C | Efectos |
|------------------------------|------------------------------------|
| ≤1.0 | Efectos despreciables de salinidad |
| 1.1 – 2.0 | Muy ligeramente salinos |
| 2.1 – 4.0 | Moderadamente salino |
| 4.1 – 8.0 | Suelo salino |
| 8.1 – 16 | Fuertemente Salino |
| ≥16 | Muy fuertemente salinos |

Cuando la concentración de sodio en la solución del suelo es elevada en relación con la de otros cationes disueltos, se provoca la dispersión de dicho suelo, y como consecuencia pierde su estructura; Para estimar este efecto, se han propuesto diferentes índices, entre ellos se encuentra la relación de adsorción de sodio (RAS), el cual es sencillo de calcular, y está relacionado con el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), ya que entre mayor sea el valor del RAS, es de esperarse un incremento del valor de PSI, y por lo tanto un peligro mayor de sodificación del suelo. El RAS se calcula mediante la siguiente relación matemática:

$$RAS = Na / \sqrt{Ca+Mg} / 2$$

En la que los valores de Na, Ca y Mg están dados en meq/l.

5.5 Control de las propiedades físicas del suelo

Como el suelo es el soporte de las raíces de las plantas, las características de estas dependerán mucho de las condiciones del suelo, por lo que para fomentar el desarrollo saludable de la raíz, el suelo debe encontrarse tibio, bien aireado, y ser poroso para que las raíces encuentren el espacio para crecer. Por otra parte, el suelo debe amoldarse a la labranza y debe resistir bien los efectos del viento y del agua (Aguilera, 1990).

5.5.1 Resistencia a la erosión

En los suelos regados, la erosión depende principalmente de la velocidad con la que el agua corre en su superficie, del tamaño y peso de las partículas individuales y de los agregados. La formación y mantenimiento en el suelo de agregados estables con el agua, que resistan la erosión y que sean permeables al agua y al aire, son de igual importancia para el control del agua y de esta forma la erosión en las condiciones del riego.



5.5.2 Labranza para el control de las propiedades físicas del suelo

Generalmente se reconoce que son necesarias algunas labores para la producción agrícola. En los suelos regados, los objetivos principales que persigue la labranza son los siguientes:

1. Enterrar las malezas, residuos de las cosechas y abonos, o simplemente incorporarlos dentro del suelo, donde puedan descomponerse. La materia orgánica así obtenida, añade fertilidad al suelo y no queda depositada sobre la superficie, ni cerca de ella, de manera que interfiera con el cultivo. Por lo que enterrando profundamente las semillas de las malezas se evita también que broten.
2. Preparar el semillero y mantenerlo bien labrado, lo que incluye los cultivos que se dan para evitar que se formen costras en la superficie, la labranza para mantener el suelo correctamente aireado, y las labores para aflojarlo debajo de la superficie para que puedan penetrar las raíces de las plantas. En algunos casos, podrá ser necesario compactar una semillera muy floja, con objeto de que las semillas pequeñas germinen y arraiguen.
3. Para ayudar en el control de las malezas de manera que no puedan competir con los cultivos por la humedad y los materiales nutritivos de la planta.
4. Para ayudar a destruir las plagas de insectos.
5. Para controlar la erosión. Aunque la labranza ha sido responsable de mucha de la erosión, se ha estudiado procedimientos especiales con el fin de controlarla.
6. Preparar la superficie de los terrenos para el riego.

Al hacer un programa de labranza para producir una estructura conveniente en el suelo, deben considerarse varios factores. Siendo el primero de ellos la humedad del suelo cuando se labra (Tabla 13).

Tabla 13 La estructura del suelo en relación con la labranza a diferentes niveles de humedad

| Porcentaje del peso del suelo en los agregados establecidos en el agua | | | | |
|--|---|-----|---|-----|
| Tamaño del agregado en mm | Suelo cultivado cerca del punto de marchitamiento | | Suelo cultivado cerca de capacidad de campo | |
| | 5 | 1/4 | 5 | 1/4 |
| Antes de la labranza | 48 | 22 | 13 | 40 |
| Después de dos pasadas de arado y 4 de rastra de discos. | 54 | 19 | 44 | 24 |
| Después de 2 pasadas de arado y 20 de rastra de discos. | 39 | 28 | 30 | 31 |

* Tsyganov, en Russell, (1938).



5.5.3 *La materia orgánica y el mejoramiento de las condiciones físicas de los suelos*

Desde algunos de los escritos más antiguos sobre agricultura, se ha reconocido la capacidad del estiércol de granja, de los abonos verdes, y de los residuos orgánicos, para mejorar la estructura del suelo, su aireación, y su capacidad de retención de humedad. Sin embargo, hasta hace poco se habían obtenido datos precisos que definen los resultados benéficos que se obtienen con los abonos orgánicos. Los experimentos se iniciaron en la estación experimental de New Jersey, y que se extendieron a otros lugares. Waksman y Martín (1932); Martín y Waksman 1941; y Peele 1940, demostraron que durante la descomposición de los materiales orgánicos, los microbios elaboran una variedad de gomas, que son cuando menos en parte de la naturaleza de los polisacáridos, y que cuando se secan a la par del suelo actúan como aglutinantes fuertes del mismo, formando una estructura estable en el agua. Aunque estas sustancias aglutinantes se producen en cantidades relativamente grandes durante las etapas de descomposición rápida de la materia orgánica, la goma a su vez puede descomponerse por actividades microbianas posteriores. En consecuencia, con objeto de obtener un efecto continuo, se debe añadir con frecuencia materia orgánica al suelo (Anaya, 1977).

La mayoría de las investigaciones sobre la estructura del suelo, indican que las mejoras positivas de la estructura del mismo, requieren la presencia de agentes aglutinantes que sean estables en el agua, y un agente moldeador para crear agregados de la forma y tamaños adecuados. Posiblemente existen muchos agentes aglutinantes en el suelo, los principales incluyen la arcilla, los hidróxidos de hierro y de aluminio, la sílice coloidal, el carbonato de calcio, y las sustancias orgánicas. De estas últimas se incluyen al humus, a los productos de descomposición orgánicas y a los materiales fibrosos, como son los micelios y las raíces finas. De estos materiales aglutinantes, sólo las sustancias orgánicas se controlan fácilmente. En la actualidad no se ha encontrado un procedimiento práctico para crear una mejor estructura utilizando la adherencia entre las partículas por medio de agentes aglutinantes inorgánicos naturales. H. Diné, y G.R. Mehuys (1991), observaron la importancia de los agregados y la estabilidad estructural en la producción agrícola, así mismo, analizaron como la materia orgánica funciona como aditivo de los agregados del suelo. Un punto de gran relevancia dentro de esta investigación es el hecho de que la estabilidad de los agregados, se encuentra asociada con el tiempo de incubación.

Por otra parte, el efecto moldeador para crear agregados de la forma y tamaño adecuados puede provenir de varias fuentes, entre los que destacan la congelación, la descongelación, el mojado y el secado. Las fuerzas biológicas, incluyendo las operaciones de los gusanos de tierra y animales excavadores, y los efectos de las raíces, se encuentran parcialmente bajo el control del hombre, Por lo que se ha demostrado que la labranza puede ser efectiva cuando se hace en condiciones adecuadas.



5.5.4 Tratamiento químico para el mejoramiento del suelo

En muchos casos, se recomienda añadir determinadas sustancias químicas a los suelos para mejorar varias de sus características físicas, como lo es la adición de yeso o de azufre para mejorar los suelos alcalinos, sin embargo, excepto para los suelos que contienen cantidades apreciables de sodio intercambiable, existen pocas pruebas de tratamientos químicos que hayan beneficiado en forma directa la estructura del suelo. En los suelos que presentan condiciones ácidas, parece que la cal produce efectos benéficos, estimulando la actividad de los microorganismos del suelo, en la Figura 3. se aprecia el tratamiento sucesivo del suelo para mejorar la estructura y la aereación.

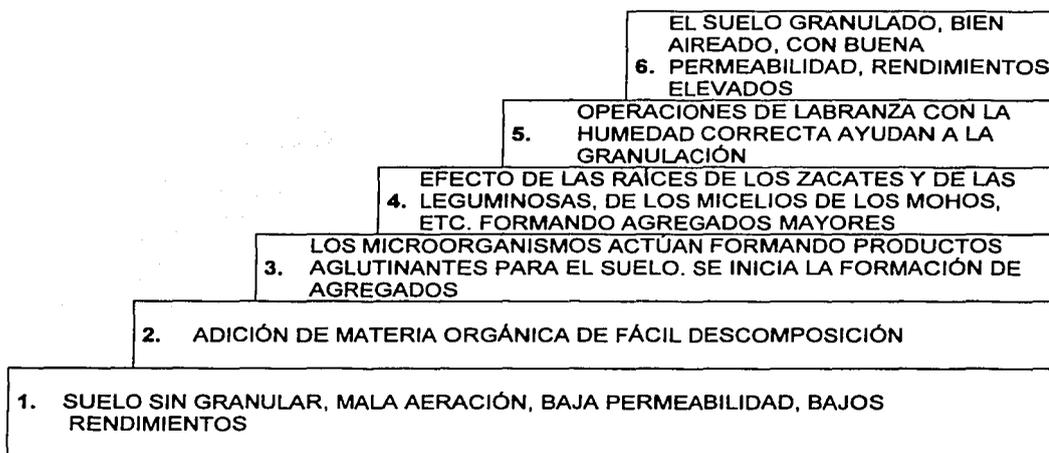
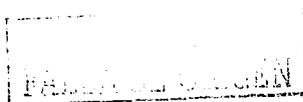


FIG. 3. Tratamiento sucesivos del suelo para mejorar la estructura y la aereación

5.5.5 Sustancias químicas para mejorar los suelos

En diciembre de 1951, la compañía Monsanto Chemical Company, informó que estaba produciendo sustancias sintéticas mejoradas para estabilizar los agregados del suelo. Estos mejoradores del suelo, son polímeros orgánicos de cadena larga de peso molecular bastante elevado, uno de ellos se dice que es un poliacrilonitrilo hidrolizado modificado conocido como (HPAN), otro es un compuesto de acetato de vinilo modificado con ácido maleico conocido como (VAMA); Estos compuestos y otros se venden bajo un gran número de nombres comerciales. El problema radica en que los suelos húmedos absorben rápidamente esas sustancias y tienden a estabilizar o fijar su estructura existente, son, por lo tanto, agentes aglutinantes sintéticos y deben añadirse a los suelos que ya se han llevado a la condición física conveniente.



Estos materiales, para ser eficientes, se deben añadir en las proporciones de 0.05 a 0.1% en peso al suelo, por lo que cuando el costo de las sustancias mejoradoras excede de 2.2 dls, su empleo se limita a situaciones especiales.

En la actualidad, el uso más difundido, ha sido para evitar la formación de costras en los suelos invernaderos, en los bancales de flores, y en las cosechas especiales de alto valor. Se han obtenido mejoras con tratamientos limitados, rociando fajas angostas de suelo precisamente sobre la semilla. Esto ha reducido la formación de costras, y ha aumentado el brote de algunos cultivos de granos pequeños. La contribución exacta de los mejoradores de suelo a la agricultura no se ha determinado todavía. Representa un definido paso hacia adelante en el control de la estructura del suelo. Los materiales no son igualmente efectivos en todos los suelos, y usándolos de manera incorrecta pueden resultar tan efectivos para estabilizar una mala condición física como para una buena (Muñoz, 1999).

Las observaciones presentadas indican que las propiedades físicas del suelo como la permeabilidad, aireación, labranza, y resistencia a la erosión, pueden controlarse por los métodos de manejo, principalmente por la alteración de la estructura del suelo. La estructura a su vez, puede mejorarse en la mayor parte de los casos manteniendo una buena proporción de materia orgánica que se pueda descomponer en el suelo, por el cultivo de pastos y legumbres en rotaciones que mejoran el suelo, por prácticas de labranza convenientes y, en casos especiales, por el tratamiento del suelo por sustancias químicas adecuadas como azufre, yeso, ácidos, y caliza (Muñoz, 1999).

5.6 Legislación mexicana sobre contaminación del suelo

5.6.1 Legislación mexicana sobre contaminación del suelo

El suelo es parte del patrimonio nacional, independientemente de su valor y de su uso. El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que: "La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro del territorio nacional, corresponden originalmente a la nación, por lo que se dictarán medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que pueda sufrir en perjuicio la sociedad" (Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 1995).

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, es el instrumento fundamental de referencia que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales. El título IV, capítulo III, lleva por nombre Prevención y Control de la Contaminación del Suelo, y consta de once artículos, del 134 al 144.

Dentro del título IV, los artículos que hacen mención al tema de la prevención de la contaminación y la rehabilitación de sitios contaminados son los siguientes



Artículo 134. Referido a la prevención y control de la contaminación del suelo, en donde se consideran los siguientes criterios:

- I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo:
- II. Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos.
- III. Es necesario racionalizar la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; e incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje; y
- IV. La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas.

Artículo 135. Referido a los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:

- I. La ordenación y regulación del desarrollo urbano.
- II. La operación de los sistemas de limpia y disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios.
- III. La autorización para la instalación y operación de confinamientos o depósitos de residuos.
- IV. El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

Artículo 136. Referido a los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos los cuales deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar.

- I. La contaminación del suelo.
- II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos.
- III. Las alteraciones en el suelo que modifiquen su aprovechamiento, uso o explotación.
- IV. Riesgo y problemas de salud.

A pesar que durante los años de 1995 y 1996 se llevó a cabo un proceso exhaustivo de revisión de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, con

miras a establecer importantes reformas a este cuerpo legal, hasta la fecha nuestro país no cuenta con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo (Carmona, 1995). El capítulo III, Prevención y control de la contaminación del suelo, únicamente analiza la generación del suelo, mientras que las instalaciones subterráneas que merecen mayor importancia dentro de la materia se relegan a un segundo plano. Tampoco se considera que en los tanques subterráneos o sobre tierra se pueden albergar combustibles o disolventes pueden tener el mismo grado de peligrosidad (Saval, 1995).

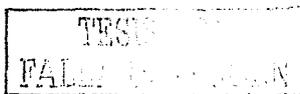
Por otro lado, la LGEEPA no ha instrumentado o especificado mediante reglamentos o normas oficiales mexicanas (NOM) los criterios para evaluar los suelos y aguas subterráneas contaminadas, ni mucho menos cuenta con una determinación de los niveles de limpieza para suelos y aguas subterráneas. Debido a ésto, las autoridades ambientales mexicanas han iniciado los trabajos para establecer los procedimientos y límites de limpieza con criterios y objetivos, para seleccionar la más adecuada a nuestro medio (Saval, 1995).

En aspectos relacionados con programas de financiamiento, México no cuenta con un programa central para el financiamiento gubernamental de la reparación de sitios contaminados. La SEMARNAP ha creado un programa para solicitar contribuciones voluntarias a las industrias, para realizar la limpieza de sitios abandonados con residuos peligrosos. Este programa establece que la SEMARNAP tendrá un papel de supervisión administrativa en acciones de limpieza, mientras que las industrias serán responsables de los contratistas y de llevar a cabo las actividades de reparación que fueran necesarias (Comisión para la Cooperación Ambiental Canadá – México – Estados Unidos, 1995).

Como producto de estos vacíos en la legislación, no se ha dado al suelo el valor que tiene como recurso natural y no se ha enfatizado la necesidad de limpiar las zonas dañadas.

5.7 Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales PEMEX

La planta de tratamiento de aguas residuales de tipo municipal, fue diseñada y construida para dar servicio, tanto al conjunto habitacional como al hospital para trabajadores petroleros, del tipo de lodos activados, originalmente con proceso convencional y recientemente convertida a la modalidad de aereación extendida, con un gasto medio de diseño de 26.04 L/s En la actualidad la planta opera con un gasto de 19 L/s con un 96% de eficiencia, con las siguientes características:



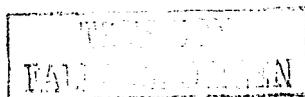
- Caja de llegada de aguas crudas
- Canales de rejillas para retención de sólidos
- Desarenador
- Cárcamo de agua cruda
- Sedimentador Primario
- Tanque de lodos activados en aereación extendida
- Sedimentador secundario
- Tanque de contacto de cloro
- Cárcamo de bombeo de agua tratada
- Cárcamo para recirculación y transferencia de lodos
- Digestor aerobio de lodos
- Lecho de secado de lodos.

La infraestructura de la planta se complementa con los siguientes elementos:

- Fontanería: Tubería, válvulas y piezas especiales.
- Turbo maquinaria: Bombas para agua, lodos y sopladores
- Grúa
- Dosificador de cloro
- Subestación eléctrica
- Centro de control de motores
- Instalaciones eléctricas: Fuerza, control, alumbrado y red de tierras
- Edificio principal: Oficinas, laboratorio, bodega, sala de control y núcleos sanitarios.
- Equipo y material operativo: Herramientas electromecánicas y accesorios de laboratorio.
- Obras adicionales: Pasillo, vialidades, muro perimetral y rejas de acceso
- Instalación primaria: Red interna de agua potable y alcantarillado

El predio donde se ubica la planta de tratamiento tiene una superficie de 2,836.91m², Petróleos Mexicanos (PEMEX) donó el terreno, construcción e instalaciones de la planta a el Departamento del Distrito Federal para su operación y mantenimiento, a través de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica DGCOH el 29 de julio de 1992.

La planta se encuentra ubicada en Periférico sur No. 4091, Picacho, colonia Fuentes del Pedregal.



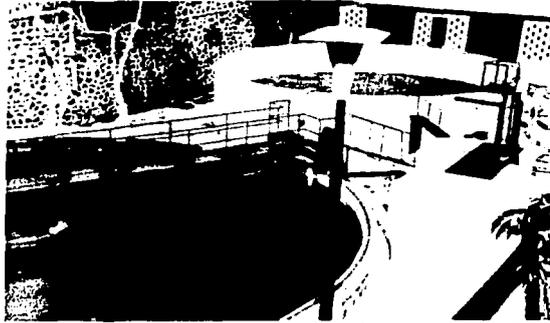
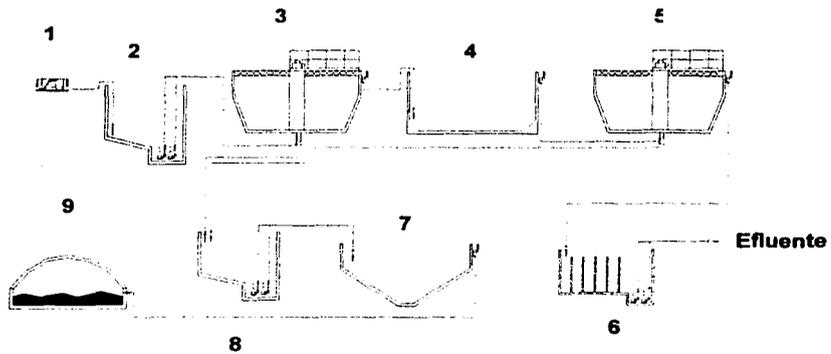


FIG. 4. Sedimentador secundario y digester de lodos planta PEMEX



- | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1.- Rejillas | 2.- Carcamo |
| 3.- Sedimentador primario | 4.- Tanque de aireación |
| 5.- Sedimentador secundario | 6.- Tanque de contacto de cloro |
| 7.- Digestor de lodos | 8.- Tanque de recirculación de lodos |
| 9.- Eras de secado de lodos | |

FIG. 5. Diagrama de flujo planta de tratamiento de aguas residuales PEMEX



6 METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los procedimientos que se siguieron para obtener el suelo que se analizó, la obtención de biosólidos a partir de lodos digeridos, los procedimientos para el análisis de las variables del experimento, así como el diseño del experimento empleado.

6.1 Obtención de biosólidos clase B

En este trabajo se emplearon lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales "PEMEX"; esta planta maneja un caudal de 19 litros por segundo de agua residual de tipo municipal y tiene una producción de lodos de 0.19 litros por segundo los cuales son tratados en un digestor aerobio.

Para poder considerar los lodos como biosólidos clase B es necesario darles un tratamiento que disminuya el riesgo por organismos patógenos y vectores en su aplicación. De los métodos recomendados por la USEPA se seleccionó la estabilización química utilizando cal. El proceso químico consiste en adicionar cal para aumentar el pH hasta 12 o más.

Los lodos fueron recolectados del digestor de lodos de la planta de tratamiento y posteriormente se estabilizaron en el laboratorio adicionando un gramo de hidróxido de calcio por litro de lodo. Esta cantidad de hidróxido se obtuvo después de realizar una prueba de jarras a los lodos digeridos. La temperatura después de adicionar el hidróxido, aumentó aproximadamente 3 grados centígrados y el pH se incrementó de 6.7 a 12 por un periodo aproximado de 3 horas.



FIG. 6. Incremento de pH de 6 a 12 en los lodos para obtener biosólidos

6.2 Obtención de los suelos para el experimento

Para poder verificar los efectos de los biosólidos como mejoradores de suelos se utilizaron 3 tipos de suelos:

Suelo 1.- De textura arenoso (**tepojar**), este suelo fue recolectado en el estado de Morelos en el municipio de Tetela del Volcán, se caracteriza por ser un suelo de baja productividad agrícola, es un suelo muy delgado con un espesor de

cerca de 10 cm. Descansa sobre roca, se encuentra bien drenado y habitualmente es pedregoso, su mayor limitante es la profundidad y la pendiente que presenta, lo cual le imparte características de resequeidad y erosionabilidad, de acuerdo con García (1976), se le clasifica como **Litosol**.



FIG. 7. Suelo de textura arenosa (tepojar)

Suelo 2.- De textura arcillosa (**tepetate**) suelo proveniente del estado de Morelos. De acuerdo con Soil Taxonomy (1988), es una estructura masiva, laminar o prismática, son de color amarillo a rojizo, son suelos generalmente localizados en lugares de clima semiárido, de origen residual y volcánico, generalmente se encuentran en pendientes mayores al 2%, de acuerdo con García (1976), se clasifican como **Luvisol**.

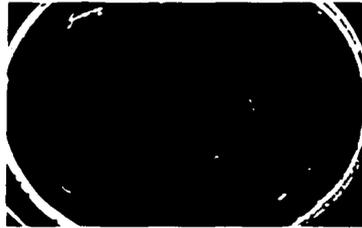


FIG. 8. Suelo de textura arcillosa (tepetate)

Suelo 3.- De textura franco limosa. Este suelo fue recolectado en la ciénega grande de Xochimilco en el Distrito Federal. De acuerdo con la clasificación de la FAO se clasifican como **Fluvisol**, los fluvisoles son suelos profundos formados sobre depositos aluviales que presentan un escaso grado de evolución. El principal problema que limita el uso de estos suelos es el exceso de humedad y el peligro de inundaciones. Si estos problemas se resuelven estos suelos se convierten en areas agrícolas de lo más productivas del mundo. (: www.cma.junta-andalucia.es).



FIG. 9. Suelo de textura (franco limoso)

6.3 Instalaciones

El desarrollo del experimento se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, con el propósito de mantener homogéneas la temperatura, la precipitación y la humedad relativa del ambiente, las determinaciones físico químicas se realizaron en el mismo laboratorio, así como en el Laboratorio de Análisis Químicos y Físicos del Suelo de la Universidad Autónoma Metropolitana plantel Xochimilco.

6.4 Unidades experimentales

Las unidades experimentales son porciones de suelo colocadas en macetas de dimensiones de 15 cm de diámetro por 15 cm de profundidad. Las unidades de tratamiento deben de tener las mismas condiciones. Por lo que se generaron repeticiones de estas unidades de tratamiento a las que se llamaron ensayos. Estos ensayos sirvieron para disminuir los efectos aleatorios de las variables no controlables. La conductividad hidráulica se realizó en columnas empacadas, como se muestra en la Figura 11, con los tres tipos de suelo con dos repeticiones por tratamiento.



FIG. 10. Maceta tipo utilizada durante el experimento

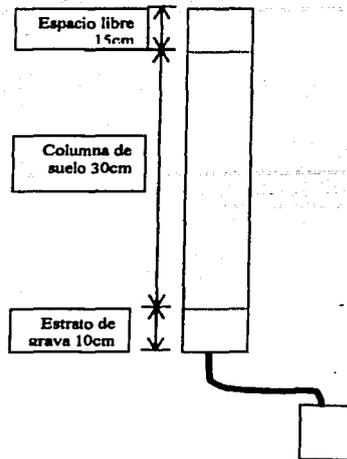


FIG. 11. Diagrama de columnas para conductividad hidráulica



FIG. 12. Columnas empacadas para conductividad hidráulica

6.5 Diseño del experimento

Para evaluar la capacidad de los biosólidos como mejorador de las características del suelo se realizó un diseño de bloques aleatorios al azar, así como, una prueba de comparación múltiple con las siguientes hipótesis:

Ho.- No existen diferencias significativas entre los tratamientos

Hi.- Existen diferencias significativas entre los tratamientos

Los datos que se analizaron fueron aquellos reportados de las determinaciones realizadas en el laboratorio sobre las características físicas del suelo, adicionalmente se evaluó la capacidad productiva de cada tratamiento. Por lo anterior, se seleccionó

un cultivo de ciclo corto, como lo es la avena. Se consideró conveniente obtener información bajo las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos. Esto es debido a las diferentes necesidades de nutrientes que fueron extraídos del suelo. Para el análisis de esta información, los resultados se correlacionaron con el desarrollo de las plantas o producción de las mismas, con respecto a las etapas de desarrollo, con lo cual, se obtuvo información adicional sobre el efecto de fertilidad del suelo.

Con base a las consideraciones anteriores se aplicó un diseño experimental bajo las siguientes características:

| | | | |
|---------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Tratamiento = | Aplicación de Biosólidos | | Aplicación Solución Nutritiva |
| | Suelo arenoso | Suelo Arcilloso | Suelo Franco Limoso |

Unidades de tratamiento = Macetas

Ensayos = Repeticiones

Variables de interés = características físicas, químicas y/o desarrollo de la biomasa

Variables no controladas = Temperatura, humedad ambiental

Variables Respuestas = Cambio en las características físicas y químicas del suelo

| Tratamiento 1 | Suelos |
|---------------|-------------------|
| Niveles | Arena (A) |
| | Arcilla (B) |
| | Franco limoso (C) |

| Tratamiento 2 | Aplicación Lodos |
|---------------|--------------------|
| Niveles | Biosólidos |
| | Solución nutritiva |

6.5.1 Dosis

La dosis que se empleó durante el desarrollo del experimento, estuvo directamente relacionada con la cantidad de agua necesaria para el desarrollo del cultivo; Incluso antes de sembrarse para preparar el suelo, los cereales de invierno requieren aproximadamente de 400 a 1300 mm de agua que deben dividirse a lo largo del desarrollo de la planta, dentro de un área de influencia de 314.1cm². Este criterio fue realizado debido a que los biosólidos se utilizaron en fase líquida para poderse

aprovechar como en condiciones similares al riego. Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, se utilizó la siguiente dosis por tratamiento:

1300 mm (40.83 L / año) de biosólidos por unidad de tratamiento, aplicados a razón de 20 mm (0.628 L) de biosólidos 3 veces por semana, durante el primer mes, los siguientes dos meses se aplicaran 25 mm (0.785 L) por semana, y por último durante la última etapa de desarrollo la dosis que se aplicó fue la de 45 mm (1.41L) durante 15 días por un mes.

De acuerdo con el Manual para Educación Agropecuaria (SEP, 1983), en la sección trigo, cebada y avena, la dosis recomendada de fertilizante el cual se aplicó como solución nutritiva consistió en 5 mg/L de nitrato de calcio, 7.5 mg/L de nitrato de amonio y 6.4 mg/L de nitrato de potasio, la aplicación de la solución se realizó de la misma manera que con los biosólidos, en las mismas cantidades.



FIG. 13. Aplicación de biosólidos a las unidades de tratamiento

6.5.2 Unidades de tratamiento

Para el desarrollo del experimento, se emplean macetas de plástico de 15 cm diámetro, las cuales tienen un volumen de suelo de 1666 cm³. Dentro de cada unidad de tratamiento se colocaron 20 plántulas de avena las cuales sirvieron para valorar las características de los nutrientes del suelo, evaluando el desarrollo de las plantas y cantidad de materia seca producida.

6.5.3 Ensayos

Durante el experimento se realizaron 3 repeticiones por tratamiento por etapa, con la finalidad de realizar muestreos aleatorios de cada tratamiento para poder evaluar si durante el experimento existieron mejoras y/o variaciones en los suelos.

Todos los tratamientos tuvieron un testigo con el mismo número de repeticiones, y a los testigos se les aplico como riego la misma proporción de solución nutritiva, descrita en el apartado 6.5.1.

Tabla 14 Descripción de los ensayos (Tratamiento con biosólidos)

| Nivel A | | | Nivel B | | | Nivel C | | |
|---------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|
| R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 |
| R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 |
| R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 |
| R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 |
| R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 |

Tabla 15 Descripción de los ensayos (Tratamiento con solución nutritiva)

| Nivel A | | | Nivel B | | | Nivel C | | |
|---------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|
| R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 |
| R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 |
| R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 |
| R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 |
| R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 |

6.5.4 Evaluación del experimento

Para poder evaluar los resultados del experimento fue necesario realizar varias tomas de muestras a lo largo del desarrollo de las plantas, esto fue con la finalidad de detectar las posibles variaciones en las unidades de tratamiento.

6.5.5 Toma de muestras

La toma de muestras se realizó al azar dentro de cada tratamiento. Ésto significa que se tomaron, una serie de ensayos por tratamiento en las principales etapas de desarrollo del experimento, de acuerdo con la Tabla 16. Cabe mencionar que se realizó un análisis del tipo de suelo y sus características previa incorporación de los

biosólidos para poderse llevar a cabo el cálculo estadístico de variación. La aplicación de los biosólidos inició un mes antes de la siembra.



Tabla 16 Calendario de muestreo respecto a las etapas de desarrollo

| ETAPA | NIVEL A | | | | | NIVEL B | | | | | NIVEL C | | | | |
|---------------------------------|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|
| Dos semanas antes de la siembra | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
| Cuando la plumula sea visible | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
| Cuando la última hoja se forme | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
| Floración | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
| Después de la cosecha | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |

6.6 Métodos de análisis para los suelos

Una vez tomadas las muestras de suelo correspondientes a cada etapa del experimento, se procedió a las determinaciones de las variables de interés (pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio de cationes, porcentaje de materia orgánica, porosidad, estabilidad de agregados y biomasa). La conductividad hidráulica y la relación de adsorción de sodio se determinaron al inicio y al término de la fase experimental.

6.6.1 Determinación del pH del suelo

Para obtener el pH del suelo se pesan 20 g de cada tipo de suelo y se añaden 50ml de agua destilada, midiéndose el pH del sobrenadante, con un potenciómetro analógico marca Corning modelo PH10, de acuerdo con lo mencionado por el método referido en el proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY NOM-021-RECNAT-2000, el cual establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis **AS-02**

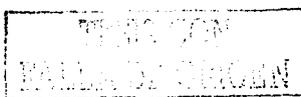




FIG. 14. Determinación del pH en el suelo

6.6.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, se obtiene en muestras de 300 g de suelo el cual se satura con agua destilada. Después de dejarse en reposo, por 24 horas, se filtra en un filtro del No 5. La conductividad se mide al líquido filtrado, de acuerdo con el proyecto de norma PROY NOM-021-RECNAT-2000 referencia **AS-18**



FIG. 15. Determinación de la conductividad eléctrica al suelo

6.6.3 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico total, se obtiene con 4g de suelo adicionando acetato de sodio. El principio del método consiste en sustituir los cationes que tiene el suelo y suplirlos con cationes de sodio. De esta manera es posible medir con el flamómetro los cationes de sodio que produce el suelo y por lo tanto tomar este valor, como los mili-equivalentes de cationes totales según mencionado en el proyecto de norma PROY NOM-021-RECNAT-2000 referencia **AS-12**





FIG. 16. Determinación de la CIC en flamómetro

6.6.4 Relación de adsorción de sodio

Los valores de este parámetro, fueron obtenidos del suelo original y durante el último muestreo, con la finalidad de determinarse la variación de la capacidad de adsorción en el suelo, para lo cual, fue necesario obtener el valor de los mili-equivalentes de sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg) contenidos en el suelo y de acuerdo con el Manual de técnicas selectas de análisis químicos y físicos de suelos, (1999).

6.6.5 Porcentaje de materia orgánica

La materia orgánica contenida en el suelo es uno de los principales parámetros que se observaron durante el desarrollo de la investigación debido a los cambios que se generan a nivel estructura del suelo, además de la incorporación de una fuente de nutrientes para las plantas. El porcentaje de materia orgánica en el suelo se obtiene realizando la técnica de Demanda Química de Oxígeno, (DBO) donde la materia orgánica se oxida en presencia de dicromato de potasio, para posteriormente poderse reducir la masa del suelo para entrar dentro del intervalo de medición del equipo. PROY NOM-021-RECNAT-2000 referencia AS-07.



FIG. 17. Lectura de materia orgánica

6.6.6 Conductividad hidráulica

Este parámetro se midió al iniciarse el experimento, y en la última etapa de muestreo, utilizando el método del permémetro de carga constante. Las mediciones se realizaron directamente en las columnas empacadas con los tres tipos diferentes de suelos, manteniéndose una carga constante de agua sobre la columna midiéndose el volumen de agua que fluía por el drenaje de las columnas, y el cual se encontraba en la parte inferior de las columnas. Por lo que una vez obtenido el gasto, los valores de conductividad hidráulica se obtuvieron de acuerdo a la ecuación de Darcy mencionada a continuación:

$$K = Q/Ai$$

Donde:

- K = Conductividad hidráulica en m/s
- Q = Gasto del escurrimiento en m³/s
- A = Área de la sección de la columna en m²
- i = Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico lo obtenemos de la relación

- i = h / L
- h = Altura de la columna de agua
- L = Longitud de la columna de suelo

Ver FIG. 11.

6.6.7 Estabilidad de agregados

En este parámetro se utilizó la técnica de Yoder (1936), de donde se obtuvo tanto el tamaño de agregados como la estabilidad de los mismos, los cuales son sometidos a la fuerza erosiva del agua. La técnica es simple, aunque de desarrollo muy lento. Se utilizaron 100g de muestra, los cuales se pasan a través de 5 tamices de diferentes diámetros colocados en orden descendente:

| | |
|--------------------|---------|
| ❖ Malla del No. 10 | 2.00 mm |
| ❖ Malla del No. 16 | 1.19 mm |
| ❖ Malla del No. 18 | 1.00 mm |
| ❖ Malla del No. 30 | 0.58 mm |
| ❖ Malla del No. 50 | 0.29 mm |

El material retenido en cada tamiz fue recuperado, pesado y secado durante 24 horas a 105°C una vez que este se encontraba seco se vuelve a pesar y para obtener la diferencia de pesos con este valor se obtuvo la cantidad de agregados por abertura del tamiz de la relación MWD (Mean Weight Diameter) de acuerdo a la siguiente relación matemática.



$$MWD = \sum (a_i) (w_i)$$

Donde:

| | | |
|----------------------|---|--|
| <i>MWD</i> | = | <i>Diámetro promedio de agregados</i> |
| <i>a_i</i> | = | <i>Tamaño de la abertura del tamiz</i> |
| <i>w_i</i> | = | <i>Peso parcial entre peso total de la muestra</i> |
| <i>Peso parcial</i> | = | <i>Peso de los agregados</i> |
| <i>Peso total</i> | = | <i>100 gramos</i> |



FIG. 18. Tamizado del suelo para evaluación del tamaño medio de agregados

6.6.8 Biomasa

Una vez que comenzaron a obtenerse las plántulas de avena durante el desarrollo de la investigación se procede al muestreo de la biomasa. Ésto sucedió durante el mes de febrero por lo que la técnica consistió en recolectar todas las plántulas en el estado en que se encontrasen de cada suelo analizado; una vez recolectadas fueron pesadas y secadas durante 24 horas a 105° C.

TESIS CON
FALLA DE CALLEN

7 RESULTADOS

7.1 Parámetros iniciales de biosólidos

En la Tabla 17 se presenta la caracterización de los lodos obtenidos del digestor de lodos de la planta PEMEX, el muestreo y caracterización se realizaron el 14 de mayo del 2002 en el laboratorio de la planta de tratamiento.

Tabla 17 Caracterización de los lodos de la planta PEMEX

| Parámetro | Lodo Digerido |
|--|---------------|
| Temperatura | 20°C. |
| pH | 6.71 |
| Conductividad eléctrica (mScm ⁻¹) | 0.55 |
| % Sólidos Totales | 20.3 |
| Mililitros de sólidos sedimentables a los 80 minutos | 280 |
| Huevos de helmintos viables (HH/g ST) | 16 |

La demanda química de oxígeno DQO del influente a la planta fue de 488.46 mg/L y la DQO en el efluente de la planta fue de 19.23 mg/L por lo que la eficiencia de operación en la planta fue del 96.06%.

7.2 Parámetros iniciales de los suelos

Con la finalidad de poder comparar el comportamiento de los suelos durante el experimento, fue necesario analizar en primer lugar, las características físico químicas de los tres diferentes suelos. Los resultados se aprecian en la Tabla 18.

Tabla 18 Parámetros iniciales en los suelos de estudio

| PARÁMETRO | SUELO | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Tepojar | Tepetate | Franco-Limoso |
| Valor pH | 7.83 | 7.45 | 5.4 |
| Conductividad Eléctrica (μScm ⁻¹) | 500 | 530 | 580 |
| Capacidad de intercambio catiónico (cmol*Kg ⁻¹) | 12 | 34.8 | 43.5 |
| Relación de adsorción de Sodio | 0.0596 | 0.0605 | 0.05969 |
| % de materia orgánica | 2.84 | 4.37 | 10.72 |
| Conductividad hidráulica (m/s) | 2.27 ⁻⁴ | 2.75 ⁻⁶ | 1.89 ⁻⁵ |
| Biomasa | 0 | 0 | 0 |

La textura se determino al tacto de acuerdo con Aguilera, 1990 y la clase determinada fue de acuerdo con la siguiente clasificación.



| Suelo | Clase | Nombre |
|---------------|-------|------------------------|
| Tepojar | A | Arena |
| Tepetate | CRA | Franco arcillo arenoso |
| Franco limoso | CL | Franco limoso |

La estabilidad de agregados fue determinada como ya se menciona antes utilizando el método de Yoder (1936), obteniendo los siguientes resultados presentados en las Tablas 19, 20 y 21.

Tabla 19 Porcentaje de agregados retenidos por tipo de suelo y por número de malla

| Malla | Suelo | | |
|-------|---------|----------|-----------------|
| | Tepojar | Tepetate | Franco - Limoso |
| 10 | 0.4 | 0.3 | 4.8 |
| 16 | 27.6 | 6.8 | 2.8 |
| 18 | 8 | 3.5 | 0.9 |
| 30 | 30.8 | 13.6 | 5.1 |
| 50 | 20.9 | 20.1 | 15.8 |
| Total | 87.7 | 44.3 | 29.4 |

Tabla 20 Diámetro de agregados por tipo de suelo

| Malla | Suelo | | |
|-------|----------|----------|-----------------|
| | Tepojar | Tepetate | Franco - Limoso |
| 10 | 0.008 | 0.006 | 0.096 |
| 16 | 0.32844 | 0.08092 | 0.03332 |
| 18 | 0.08 | 0.035 | 0.009 |
| 30 | 0.181412 | 0.080104 | 0.030039 |
| 50 | 0.062073 | 0.059697 | 0.046926 |

Tabla 21 Diámetro promedio de agregados por tipo de suelo

| Tepojar | Tepetate | Franco Limoso |
|----------|----------|---------------|
| 0.132 mm | 0.052 mm | 0.043 mm |

TESIS
FALLA DE URGEN

7.3 Análisis del experimento

Durante el desarrollo del experimento se evaluaron los parámetros de pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio de cationes, porcentaje de materia orgánica, porosidad, estabilidad de agregados y biomasa en diferentes etapas del experimento, como se mencionó en el apartado 6.6. La relación de adsorción de sodio y la conductividad hidráulica se determinaron al inicio y al final del experimento. El análisis estadístico fue del tipo de bloques aleatorios, se realizó un análisis de varianza de las medias, así como, la prueba de comparaciones múltiples, donde los tratamientos fueron (suelo testigo, suelo con biosólidos y suelo con solución nutritiva) los bloques fueron (Tepojar, Tepetate y suelo franco limoso) con los siguientes resultados.

7.3.1 Análisis de resultados del pH

Partiendo de la FIG. 2 presentada en el apartado 5.4.4.11, se menciona que tanto el suelo tepojar como el suelo tepetate, se encuentran dentro del rango ligeramente alcalino, el cual es el rango común de pH para suelos de regiones áridas, por otra parte, el suelo franco limoso inició dentro del rango de moderadamente ácidos, desplazándose rápidamente a ligeramente ácidos, rango común de suelos de regiones húmedas. Por lo que se puede suponer que estos ligeros incrementos en el pH de los suelos fueron ocasionados por la incorporación del hidróxido de calcio que se empleó para estabilizar los lodos (Ortiz, 1990).

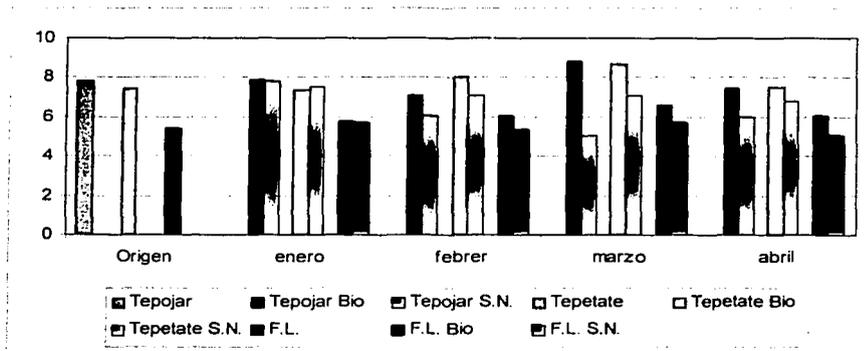


FIG. 19. Relación de pH entre suelos

| Fuente | | gl | sc | cm | F |
|-------------|---------------|----|-------|-------|--------|
| Tratamiento | $t-1$ | 2 | 2.172 | 1.086 | 6.375 |
| Bloque | $b-1$ | 2 | 5.649 | 2.824 | 16.577 |
| Error | $(b-1)*(t-1)$ | 4 | 0.682 | 0.170 | |
| Total | $bt-1$ | 8 | 8.502 | | |



Del análisis estadístico anterior se obtuvo una $F_{0.05}$ de Tablas de 6.94, comparando con la F calculada para los tratamientos, podemos decir, que no existen diferencias significativas para éstos, sin embargo, comparando la F de los bloques, sí existen diferencias significativas entre los suelos. Esto es debido principalmente a que en el suelo franco limoso se obtuvo el incremento mayor del pH. Por otro lado, este análisis muestra que la aplicación de biosólidos, no es un factor que puede afectar el pH del suelo, más bien lo mantiene. Se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Duncan (ver anexo 2 sección 10.2.1.) con el fin de determinar en donde se observaban estas diferencias significativas, con los siguientes resultados. La mayor diferencia por tratamientos esta en la solución nutritiva, que disminuyó el pH del suelo, las diferencias entre suelos con biosólidos y suelos originales resultaron poco significativas.

7.3.2 Análisis de resultados de la conductividad eléctrica

En relación con la conductividad eléctrica no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos y bloques ya que la F de Tablas fue de 6.94 la cual es mayor tanto para los tratamientos, como para los bloques.

| Fuente | gl | sc | cm | F | |
|-------------|-------------|----|----------|----------|------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 11666.67 | 5833.33 | 0.57 |
| Bloque | b-1 | 2 | 10066.67 | 5033.33 | 0.49 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 41266.67 | 10316.67 | |
| Total | bt-1 | 8 | 63000.00 | | |

De acuerdo con el análisis de varianza y observando la FIG. 20 es posible apreciar que para el caso de tratamientos donde se aplicaron biosólidos, los efectos de salinidad fueron despreciables, de la misma forma se aprecia que, respecto al suelo original y los tratamientos con biosólidos, la conductividad eléctrica decreció de forma irregular. Este efecto puede deberse al hecho de que en la aplicación de biosólidos en base húmeda, los lodos sedimentables van ocupando la capa superior del suelo, y el agua de estos biosólidos se infiltra de manera normal a través del suelo produciendo un lavado de sales del suelo como se aprecia en la FIG. 20, en cambio, para los tratamientos con solución nutritiva, se incorporaron sales como nitrato de amonio, nitrato de calcio y nitrato de potasio, de acuerdo con la Tabla 9, presentada en el apartado 5.4.4.12 es posible clasificar a estos suelos como muy ligeramente salinos. De tal forma, se menciona que los efectos provocados por la conductividad eléctrica en relación a la salinidad de los suelos, se encuentran directamente afectados por el tipo de agua que se emplea para su riego.

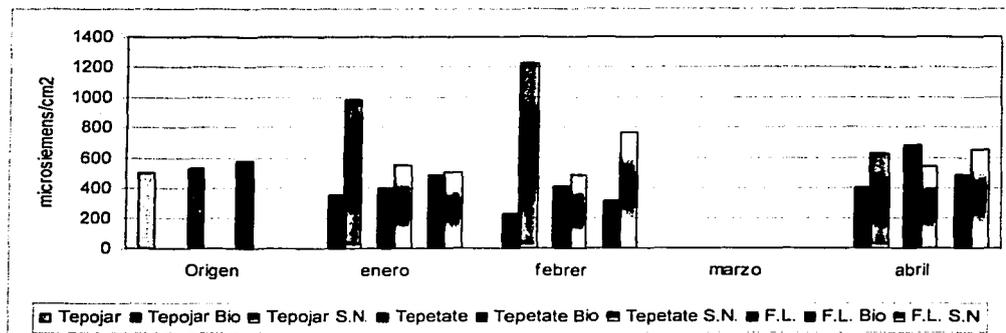


FIG. 20. Conductividad eléctrica entre suelos

Nota: Los valores del mes de marzo han sido eliminados debido a que el estado del equipo de medición provocó errores en las lecturas, los cuales generaron problemas en la evaluación.

7.3.3 Análisis de resultados de intercambio catiónico

Para el análisis de los resultados de intercambio catiónico (CIC), se partió de la relación existente entre el contenido de materia orgánica y humus en el suelo (Ortiz, 1990) quién hace mención que entre más alto sea el contenido de humus en un suelo mayor será su capacidad de intercambio catiónico. Es así que se puede decir que el incremento de la CIC se debió a que la fracción de humus de la materia orgánica tiene una capacidad mucho mayor para intercambiar cationes.

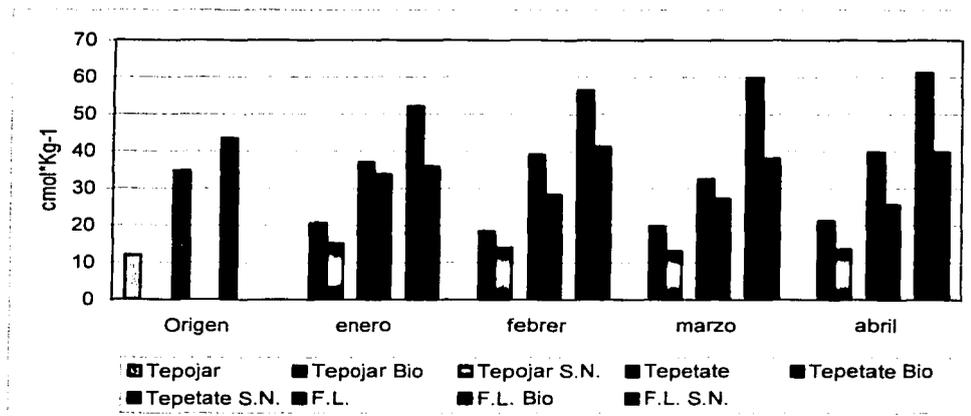


FIG. 21. Capacidad de intercambio catiónico entre suelos

Del análisis estadístico con una F de Tablas igual a 6.94, podemos observar que existen diferencias significativas tanto para los tratamientos como para los bloques, por lo que las mayores diferencias, son debidas al tipo de suelo, ya que el área superficial es mayor en suelos de textura fina como el suelo tepetate y el suelo franco

limoso, lo que da en forma natural una mayor CIC. Por otro lado, las diferencias de los tratamientos demostraron que al agregar biosólidos, se incremento la CIC en un 25% respecto al suelo original (testigo) con un 95% de confianza. De la prueba de comparaciones múltiples de Duncan (ver anexo 2 sección 10.2.3.) se observó que la mayor diferencia se encuentra entre los suelos con biosólidos comparados contra los suelos con solución nutritiva, y en menor grado los suelos con biosólidos comparados contra los suelos testigos. No se encontraron diferencia entre los suelos con solución nutritiva y los testigos.

| Fuente | | gl | sc | cm | F |
|-------------|--------------------|----|---------|--------|-------|
| Tratamiento | <i>t-1</i> | 2 | 334.62 | 167.31 | 8.48 |
| Bloque | <i>b-1</i> | 2 | 1591.93 | 795.96 | 40.32 |
| Error | <i>(b-1)*(t-1)</i> | 4 | 78.96 | 19.74 | |
| Total | <i>bt-1</i> | 8 | 2005.51 | | |

7.3.4 Análisis de resultados de materia orgánica

En el análisis de tendencia sobre el porcentaje de materia orgánica, se aprecia un comportamiento de la manera esperada durante el desarrollo del experimento, ya que al incorporarse los biosólidos, se está introduciendo una rica fuente de materia orgánica. Sin embargo, es posible apreciar en la FIG. 22 que existen diferencias significativas entre los tres tipos de suelos. Para el caso del suelo tepojar, con relación al suelo original, el porcentaje casi se triplicó, pero para el suelo tepetate éste apenas se incrementó en un 44% con respecto al suelo original. Esto puede ser ocasionado como efecto de la textura del suelo tepetate, el cual hace difícil la incorporación del total de materia orgánica, si no se realizan labores de volteo o labranza al suelo, adicionalmente, en el suelo franco limoso, se encontraron las diferencias más significativas, debido a las propiedades de textura del suelo, ya que como ocurrió con el suelo tepojar los biosólidos se infiltraban más fácilmente al suelo, permitiendo que las raíces de la avena los incorporaran en toda la masa de suelo.

En el caso de la comparación entre biosólidos y la solución nutritiva, podemos decir que sí hubo un incremento sobre el porcentaje de materia orgánica para los tres tipos de suelos con la solución nutritiva, sin embargo, este incremento pudo deberse principalmente al efecto de las raíces en el suelo.

TESIS CON
FAN DE ORIGEN

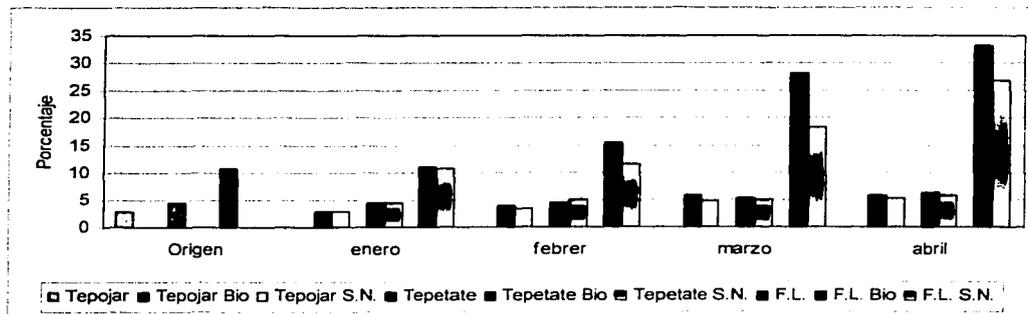


FIG. 22. Porcentaje de materia orgánica entre suelos

Del análisis estadístico, podemos mencionar que no existen diferencias significativas entre los tratamientos, pero sí entre los bloques, con una F de Tablas de 6.94. Sin embargo, analizando más profundamente esta información (ver anexo 2 "Análisis Estadístico sobre el porcentaje de materia orgánica último muestreo") se observó que en los promedios de los tratamientos existen diferencias con respecto al suelo original (testigo), no así en relación a los tratamientos con biosólidos y solución nutritiva, posiblemente como efecto de las raíces en el suelo.

Con el fin de ser más específicos en cuanto a estas diferencias se realizó la prueba de Duncan, sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos y los bloques.

| | gl | sc | cm | F | |
|-------------|-------------|----|--------|--------|------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 135.00 | 67.50 | 1.89 |
| Bloque | b-1 | 2 | 690.69 | 345.34 | 9.66 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 142.99 | 35.75 | |
| Total | bt-1 | 8 | 968.68 | | |

7.3.5 Análisis de resultados de biomasa

El análisis de biomasa no resultó como se esperaba, el experimento se realizó en invierno y las bajas temperaturas afectaron el desarrollo de las plántulas, además, las macetas seleccionadas para el experimento resultaron insuficientes en relación a la profundidad del suelo necesaria para el desarrollo de las raíces. Sin embargo, se notaron diferencias significativas entre los tres tratamientos esto fue debido a que la incorporación de la materia orgánica fue más eficiente en el suelo tepojar, de tal forma que los nutrientes se encontraban más accesibles para las plantas. Por otro lado, el suelo franco limoso es el que contenía un mayor porcentaje de materia orgánica, incluso antes de la aplicación de biosólidos, por lo que el contenido de nutrientes en este tipo de suelos siempre fue mayor.

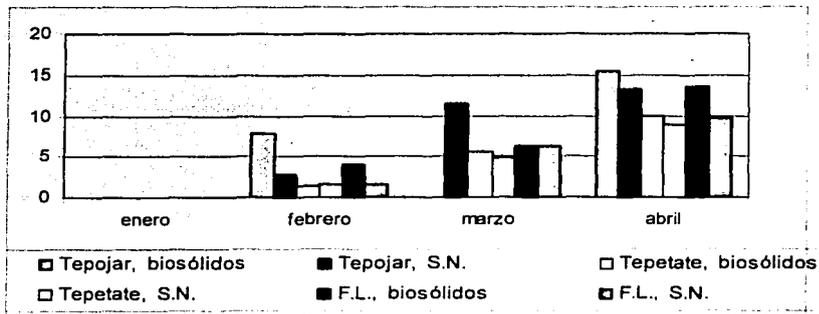


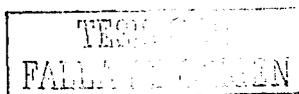
FIG. 23. Gramos de biomasa entre suelos

Referente al análisis estadístico de la biomasa podemos mencionar que no existe diferencia significativa entre los bloques, mas sin embargo se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, desafortunadamente, estos valores no reflejaron con exactitud lo ocurrido en el experimento debido a que el análisis contempló también al suelo original, el cual no contaba con biomasa al inicio del experimento, para una F de Tablas de 6.94. De acuerdo con la prueba de Duncan se establece que no existen diferencias significativas ni para el caso de los tratamientos ni para los bloques. (Ver anexo 2 "Análisis estadístico del contenido de biomasa del último muestreo").

7.3.6 Análisis de resultados de la relación de adsorción de sodio

Una de las principales dudas que se tuvieron al inicio del experimento, fue saber como se comportaría la relación adsorción de sodio, al aplicarse los biosólidos. De acuerdo con la FIG. 25 es posible observar, que el efecto entre los diferentes suelos fue muy aleatorio, sin embargo, analizando los valores presentados en el Anexo 1 ("Resultados de adsorción de sodio") los valores obtenidos durante el experimento fueron bajos, lo que garantizó que no existe riesgo de sodificación para los suelos. De similar forma en el análisis estadístico no se observaron diferencias entre los tratamientos, ni entre los bloques, con una F calculada de 6.94.

| | gl | sc | cm | F | |
|-------------|-------------|----|--------|--------|--------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 0.0004 | 0.0002 | 1.2107 |
| Bloque | b-1 | 2 | 0.0009 | 0.0004 | 2.8193 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 0.0006 | 0.0002 | |
| Total | bt-1 | 8 | 0.0018 | | |



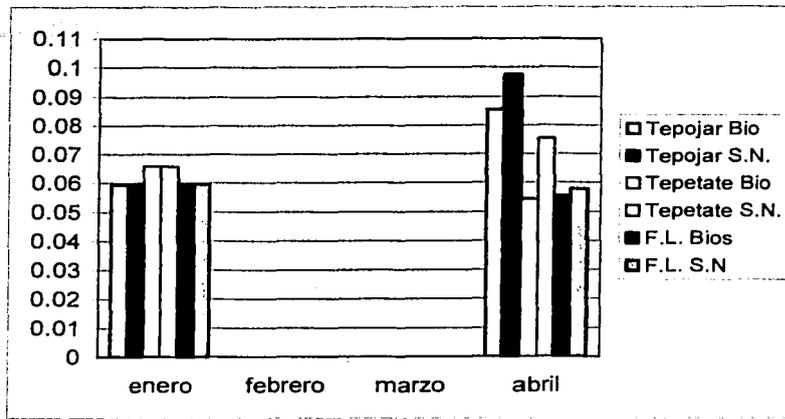


FIG. 24. Relación de adsorción de sodio entre suelos

7.3.7 Análisis de resultados de la conductividad hidráulica

De acuerdo con la gráfica de tendencia FIG. 26, se observa un efecto diferente en los suelos, como era de esperarse, para el suelo tepojar con biosólidos la materia orgánica redujo los espacios porosos del suelo, disminuyendo la velocidad de infiltración del agua, haciéndola más accesible para el cultivo. Sin embargo, esto no ocurrió en los otros suelos debido a la dificultad de incorporar esta materia orgánica en la masa del suelo. Por otra parte los tratamientos con solución nutritiva respondieron como se esperaba incrementando la velocidad de infiltración del agua, pero sin salir del intervalo de flujo "moderado" establecido en el punto 5.4.4.7., estos incrementos, pueden ser asociados con la formación de pequeñas grietas alrededor de las raíces, además del efecto de pared generado en las macetas. Por otro lado, en el análisis estadístico, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ni entre los bloques con una F de tablas igual a 6.94, con lo que podemos mencionar que, estadísticamente, no hubo efectos ni positivos, ni negativos como consecuencia de la aplicación de los biosólidos en relación a la permeabilidad del suelo.

| | | gl | sc | cm | F |
|-------------|-------------|----|-------------|-------------|-------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 0.000000024 | 0.000000012 | 1.501 |
| Bloque | b-1 | 2 | 0.000000045 | 0.000000023 | 2.821 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 0.000000032 | 0.000000008 | |
| Total | bt-1 | 8 | 0.000000101 | | |

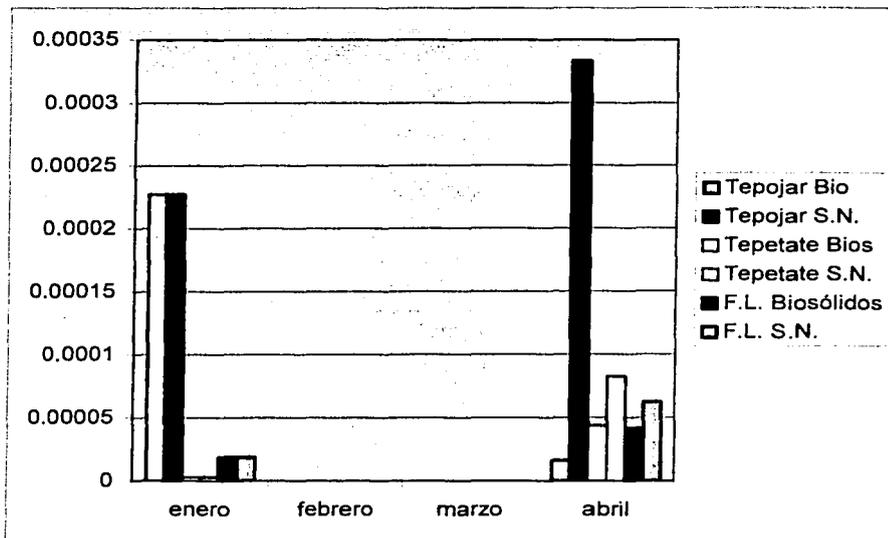


FIG. 25. Conductividad hidráulica entre suelos

7.3.8 Análisis de resultados del diámetro de agregados

Uno de los parámetros de mayor interés durante la investigación, fue el de conocer cómo se comportaría la estructura del suelo, ya que directamente, es muy difícil cuantificar el beneficio o las alteraciones que se puedan generar, sobre este parámetro, sin embargo, ésto se logró evaluando la estabilidad de los agregados a través del diámetro promedio de éstos últimos. El análisis estadístico muestra que existen diferencias significativas tanto entre los tratamientos como entre los bloques, con una F de Tablas de 6.94, encontrándose los incrementos mayores en el diámetro de los agregados para el suelo tepojar con biosólidos. La gráfica de tendencia FIG. 27, muestra los beneficios a los diferentes tipos de suelo con biosólidos, ésto se atribuye principalmente, al efecto de la materia orgánica sobre los agregados del suelo, lográndose un cambio en la estructura granular simple de los suelos hacia una granular de mayor diámetro.

| | | gl | sc | cm | F |
|-------------|---------------|----|-------|-------|--------|
| Tratamiento | <i>t-1</i> | 2 | 0.006 | 0.003 | 13.451 |
| Bloque | <i>b-1</i> | 2 | 0.006 | 0.003 | 13.739 |
| Error | $(b-1)*(t-1)$ | 4 | 0.001 | 0.000 | |
| Total | <i>bt-1</i> | 8 | 0.014 | | |

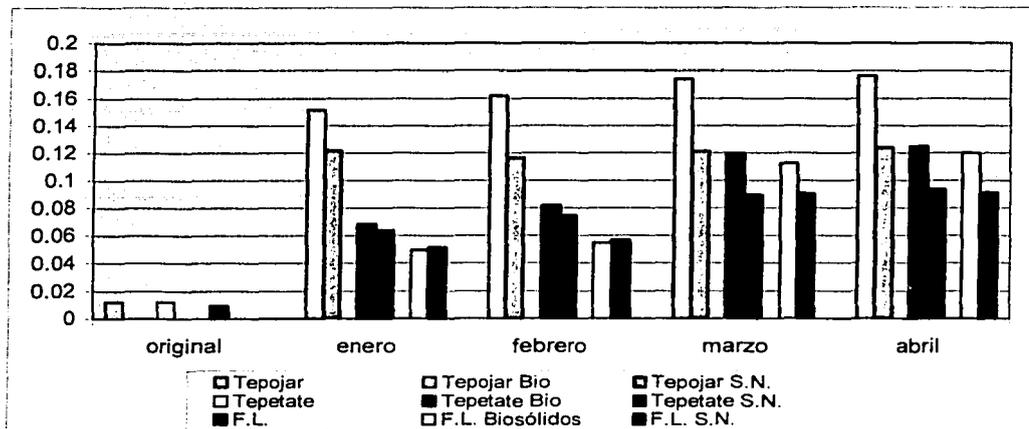


FIG. 26. Diámetro promedio de agregados entre suelos

7.3.9 Análisis de resultados del tamaño específico de agregados

El tamaño específico de agregados es otro parámetro asociado con la estructura del suelo, el objetivo no fue el de aumentar el tamaño de los agregados con respecto al suelo original, de acuerdo al análisis estadístico no se observaron diferencias entre los tratamientos y los bloques con una F de Tablas igual a 6.94, sin embargo, analizando los valores promedios presentados en el Anexo 2 ("Análisis estadístico del tamaño específico de agregados al 10% del último muestreo") fue posible apreciar que el suelo tepojar con biosólidos presentó un incremento del 42% con respecto al suelo original desafortunadamente, esto no ocurrió en los otros suelos, presentándose un incremento del 7% para el suelo tepetate y de un 20% para el suelo franco limoso, en relación al suelo original. De igual forma, en las gráficas de tendencia FIG. 28, 29 y 30, se puede apreciar con mayor claridad el efecto de los biosólidos en los diferentes suelos, donde como ya se mencionó, el suelo tepojar es el que mejor se comportó durante el experimento.

| | gl | sc | cm | F | |
|-------------|--------------------|----|-------|-------|-------|
| Tratamiento | <i>t-1</i> | 2 | 0.004 | 0.002 | 0.917 |
| Bloque | <i>b-1</i> | 2 | 0.006 | 0.003 | 1.590 |
| Error | <i>(b-1)*(t-1)</i> | 4 | 0.008 | 0.002 | |
| Total | <i>bt-1</i> | 8 | 0.017 | | |

TESIS CON
FALLA DE ORDEN

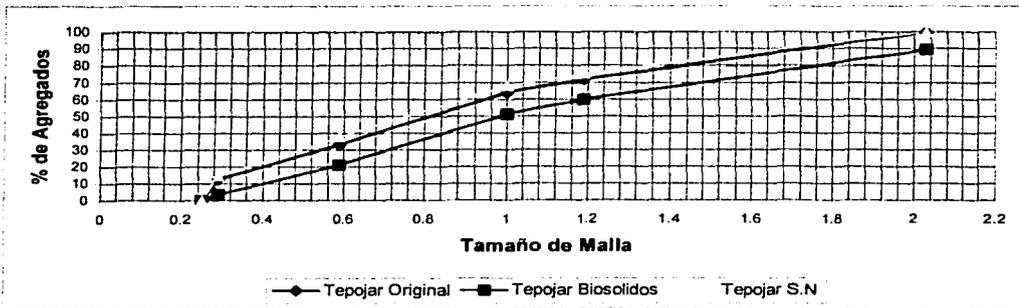


FIG. 27. Tamaño específico de agregados tepojar

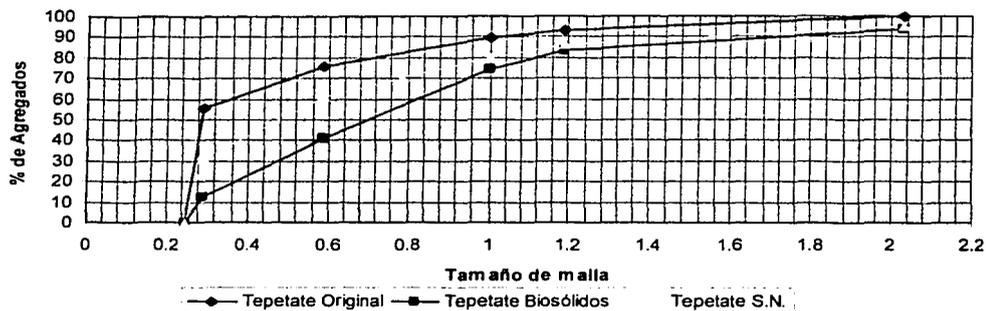


FIG. 28. Tamaño específico de agregados tepetate

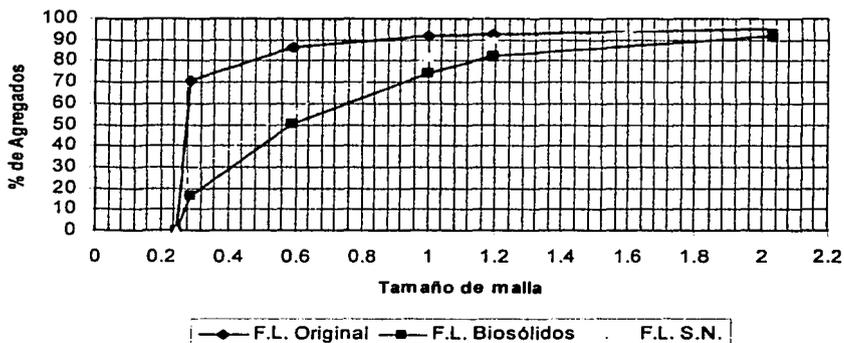


FIG. 29. Tamaño específico de agregados franco limoso

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

El mejoramiento de suelos es una actividad que va más allá de la incorporación de una rica fuente de nutrientes, desde el punto de vista agronómico, ya que es necesario considerar todos los factores que componen a la masa del suelo, debido a que cuando alguno de estos falla, o sufre alguna alteración, todas las características del suelo cambian.

De acuerdo con el objetivo de la tesis se evaluó la capacidad de los biosólidos como mejoradores de las características físicas y químicas del suelo y conforme a las hipótesis se encontró que:

8.1.1 Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica aumentó considerablemente en el suelo de tipo tepojar y en el suelo franco limoso, como efecto de las propiedades de textura de los mismos, tanto por la incorporación de biosólidos, como en el suelo testigo donde se usó solución nutritiva como efecto de las raíces, no obstante en el caso del suelo tepetate no ocurrió así, debido a que los problemas de textura tornaron más difícil la incorporación de la materia orgánica.

8.1.2 Estructura

La estructura se modificó de una estructura granular simple, a una de tipo granular, como efecto de la incorporación de materia orgánica como fue mencionado en capítulos anteriores, la materia orgánica al descomponerse, una fracción de ella se convierte en compuestos gomosos que actúan como agentes aglutinantes capaces de mantener juntas las partículas del suelo contribuyendo a la formación de una estructura granular. Este efecto se ve reflejado tanto en la prueba, del "Diámetro promedio de agregados" como en la del "Tamaño específico de agregados".

8.1.3 Permeabilidad

Los tres tipos de suelos se encontraron dentro del parámetro de permeabilidad clasificado como "moderada" entre 1.38×10^{-6} a 4.16×10^{-5} m/s, antes de empezar el experimento. Se mejoró la velocidad de infiltración del suelo tepojar manteniéndose este tipo de suelo junto con el de tipo tepetate, y el suelo franco limoso dentro de los parámetros antes mencionados.

8.1.4 Capacidad de intercambio de cationes

La capacidad de intercambio de cationes aumentó en los tres tipos de suelo, como se esperaba en la hipótesis d), encontrándose los mejores resultados en el suelo tepojar, con un incremento del 77% respecto al suelo original. Para el de tipo tepetate el incremento fue del 14%, y para el suelo franco limoso del 40% en los

cuatro meses que duró el experimento. Estos incrementos se debieron principalmente a que la incorporación de materia orgánica, presenta una capacidad mayor para intercambiar cationes.

8.1.5 Aumento de la salinidad del suelo

El incremento en la salinidad del suelo no fue causa de la aplicación de biosólidos al suelo, al contrario de lo esperado, el suelo tepojar mostró un decremento en la salinidad debido básicamente al lavado de las sales en cada riego, sin embargo, el incremento fue causa de la aplicación de la solución nutritiva. Por lo que de cualquier forma, los efectos de la salinidad fueron despreciables de acuerdo con el proyecto de norma PROY NOM-021-RECNAT-2000 referencia **AS-18**.

8.1.6 Relación de adsorción de sodio

En este estudio se esperaba una disminución de la relación de adsorción de sodio para los tres tipos de suelo, sin embargo, esto no ocurrió así, ya que el suelo tepojar aumentó, sin representar riesgos de sodificación para este tipo de suelos.

La aplicación de biosólidos mejoró las propiedades físicas y químicas del suelo, resaltando las mejoras en la estructura, el incremento de la capacidad de intercambio de cationes y el incremento en el contenido de materia orgánica. Por otro lado, cabe recalcar que no hubo efectos negativos en relación al pH del suelo por la incorporación de biosólidos al suelo, este parámetro fue incrementado sin afectarse considerablemente a los mismos.

8.2 Recomendaciones

Durante el desarrollo del experimento, se observaron una serie de factores que pudieron tener influencia en los resultados del trabajo, factores como la selección del tipo de maceta, temperatura del laboratorio, prácticas culturales y duración del experimento, los cuales de mejorarse es factible obtener mejores resultados, como se menciona a continuación:

- Tipo de suelo: se recomienda que la aplicación de biosólidos se realice en una mayor diversidad de tipos de suelos, con el fin de poder ser más claros en las conclusiones sobre los posibles usos de los biosólidos como mejoradores.
- Uso de biosólidos: se recomienda utilizar biosólidos con diferentes procesos de estabilización y desinfección bajo las normas actuales con el fin de poder establecer diferencias entre los diferentes procesos.
- Selección del tipo de maceta: La selección del tipo de maceta, no fue la adecuada, debido a que es necesario que esta selección se encuentre relacionada con el tipo de cultivo que se piensa establecer en ella, ya que el desarrollo de las plantas puede limitarse debido al tamaño de las macetas, por

lo que de preferencia, el establecimiento de este tipo de experimentos debería de desarrollarse directamente sobre un terreno cultivable.

- **Temperatura del laboratorio:** Este factor debe de cuidarse con mayor interés ya que el desarrollo de las plantas se encuentra relacionado directamente con la temperatura del ambiente que las rodea.
- **Prácticas culturales:** Si el tamaño de las macetas es el adecuado o mejor aún si el experimento es establecido directamente sobre un terreno cultivable, es posible realizar prácticas como labranza y volteo al suelo, las cuales pueden tener beneficios como la incorporación de materia orgánica y por ende, mejores resultados en el mejoramiento de la estructura de los mismos.
- **Duración del experimento:** Si el experimento se desarrolla durante un mayor intervalo de tiempo es posible observar el efecto de los biosólidos sin las alteraciones que las raíces de las plantas puedan generar sobre la estructura de los suelos

Es importante mencionar que es necesaria una investigación mayor en relación al efecto de los metales pesados y de los microorganismos que puedan estar contenidos en los biosólidos.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

9 REFERENCIAS

- Aguilera M, Martínez R. (1990). Relaciones agua suelo planta atmósfera Universidad Autónoma chapingo, México, D.F. México.
- Bidwel, R. (1979). Fisiología vegetal. AGT Editor S.A. Pp.75. México, D.F. México.
- Brewer, R. (1964). Fabric and Mineral Analysis of Soils. John Wiley & Sons Inc., Pp. 470, USA.
- Carmona, M. (1995). Aspectos Jurídicos de la Auditoria Ambiental en México, en: PEMEX: Ambiente y Energía. Los retos del futuro, UNAM, PEMEX, Pp.96, México, D.F. México.
- Colé, C.V. (1957). Hidrogen and Calcium Relationships of Calcareus Soils. Soil Sci. 83 Pp. 141 – 150.
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos (1995). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Ediciones Delma, 22ª ed, México, D.F. México.
- Davis, R.D. (1996). The Impact of EU and UK, Environmental Pressures on the Future of Sludge Treatment and Disposal. Water and Environmental Management. Volume 10, No.1, February London, England.
- Directiva 86/278/CEE, (1986). 10/02/02. De la red mundial:
http://www.europa.eu.int/eur-lex/es/lif/dat/1986/es_386L0278.html
- EPA, (1992). Control of Pathogens and Vector Atraction in Sewage Sludge, Pp. 176, USA.
- EPA, (1994ª). A Plain English Guide to the EPA Part 503, Biosolids Rule, Pp.152, USA.
- EPA, (1999). Bisolids Generation, Use, and Dsiposal in the United States, EPA, 530 – R – 99 – 009. Pp. 13, USA.
- EPA, (2000). Biosolids Technology Fact Sheet Land Application of Biosolids, EPA 832 – F- 00- 064, USA.
- Fitzpatrick, E.A. (1987). Suelos. Su formación, clasificación y distribución. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México, D.F. México.
- García L. R. (1976). "Uso potencial del suelo." Comisión del Plan Nacional Hidráulico documento 12. Secretaria de Recursos Hidráulicos. Pp 28-31, México, D.F. México.

- Iturbe Argüelles Rosario y Ana Elisa Silva Martínez. (1992). Agua subterránea y contaminación. Serie del Instituto de Ingeniería No. 539. UNAM México, D.F. México.
- Iturbe Argüelles Rosario, Castro R. A. Madrigal, M. I, (1998) Técnicas de Rehabilitación de suelos y acuíferos. Serie del Instituto de Ingeniería No 612. UNAM, México, D.F. México.
- Krogmann, Lisa S. C. J. M; Catherine A. M. (1997). Biosolids and Sludge Management. Water Environmentt Research. Vol. 69 No. 4, USA.
- Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, (1996), México, D.F. México.
- Mendenhall W., W. D (1994). Estadística matemática con aplicaciones, Grupo Editorial Iberoamerica, 2a edición. Pp. 570-583, México, D.F. México.
- Metcalf & Eddy (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tomo I. McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V., México, D.F. México.
- Miramontes F. B; Arroyo V. L; Perez S. D; Alva R. M (1999). Manual de técnicas selectas de análisis químicos y físicos de suelos. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Dpto. de Producción Agrícola y Animal. UAM, Xochimilco, México, D.F. México.
- Monterrey, Regional Water Pollution Control Agency (1987). "Monterey Wastewater Reclamation Study Agriculture. Final report april, 1987" Engineering-Science. Berkeley, California, USA.
- Muñoz G. Gómez P y Cervera G, (1999). Modificaciones de algunas propiedades físicas en el suelo del Valle del Guadalquivir enmendando con lodos de depuradora, en: Índice para estudios en la zona no saturada del suelo, editores: R. Muñoz Carpena, A. Ritter Rodríguez, C. Tascón Rodríguez. Actas de las IV Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo-ZNS'99, México, D.F. México.
- Muñoz Nava, Hipólito. (1997). Lixiviación de aluminio en lechos de disposición de lodos. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ambiental). División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. México.
- Ortiz V. B; Ortiz S. C. A. (1990). Edafología Universidad Autónoma de Chapingo. Pp. 199, México, D.F. México.

- Palacios, M. P., E. Del Nero y N. Pavón. (1999). Influencia del agua de riego con agua de depuradora municipal de diferentes calidades sobre los suelos del cultivo de platanera, en: Índice para estudios en la zona no saturada del suelo, editores: R. Muñoz Carpena, A. Ritter Rodríguez, C. Tascón Rodríguez. Actas de las IV Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo-ZNS'99.
- Ramahlo, R.S. (1983). Introduction to Wastewater Treatment Processes. 2a Edición. Academic Press, USA.
- Santos M.S. (1998). Estabilización Térmica Alcalina con Bajas Dosis de CaO para Lodos Provenientes de un tratamiento Primario Avanzado. Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. México.
- SARH, (1978). Métodos para el análisis físico y químico de suelos, agua y plantas, Publicación No. 10, 2a Edición, Subsecretaria de Planeación Dirección General de Estudios Subdirección de Agrología, México, D.F. México.
- Saval, S. Biorremediación de suelos contaminados, en PEMEX: Ambiente y energía. Los retos del futuro, UNAM, PEMEX, Pp.93-186. México, D.F. México.
- SEP, (1983) Manuales para educación agropecuaria, Trigo, Cebada, Avena. Área de producción vegetal, Pp. 35-38. México, D.F México.
- Soil Taxonomy (1988). " A Basic System of Soil Clasification for g and Interpreting Soil Surveys" Rober E. Krieger Publishg company Malabar, Pp. 754, Florida, USA.
- Sokolovsky, A.N. (1930). The Nomenclature of the Genetic Horizons of the Soil. Proc. 2nd Inter.Soc. Soil Sci.Leningrad – Moscow July 20-30, 153-4.
- Sorensen, S. P. L. (1909). Enzayme studies: 11 The Measurement and Importance of the Hydrogen Ion Concentration in Enzime Reaction. Compt. Rend trav. Lab. Carlsberg, 8:1
- USEPA, 40. CFR parte 503, (1993). EPA/625/R-92/013, 1999.
- Waksman, S.A. and Lyer, K.R.N., (1932). Contribution to Our Knowledge of the Chemical Nature and Origin of Humus, Soil Sci., Pp. 33,43-69.
- W. D. Kemper and R.C. Rosenau (1986). American Society of Agronomy – Soil Science Society of America, 677 *Methods of Soil Analysis. Part 1 Physical and Mineralogical Methods* – Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition) Pp. 425- 441.

- WPCF. (1988). "Beneficial Use of Waste Solids. Manual of practice FD-15. Water Pollution Control Federation. Virginia0, USA.
- Yoder R.E. (1936). A Direct Method of Aggregate Analysis of Soils and a Study of the Physical Nature of Erosion Losses. J. Am. Soc. Agron. 28: Pp. 337-351.

10 ANEXOS

10.1 Anexo 1. Resultados del experimento

10.1.1 Resultados del pH

Tabla 22 Comparación del pH entre suelos con biosólidos

| Periodo | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepetate Original | Tepetate Biosólidos | F.L. Original | F.L. Biosólidos |
|---------|------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| Enero | 7.83 | 7.85 | 7.45 | 7.4 | 5.4 | 5.8 |
| Febrero | | 7.11 | | 8.02 | | 6.06 |
| Marzo | | 8.8 | | 8.66 | | 6.55 |
| Abril | | 7.42 | | 7.53 | | 6.04 |

Tabla 23 Resultados del análisis del pH para tepojar

| Fecha | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepojar Solución Nutritiva |
|---------|------------------|--------------------|----------------------------|
| Enero | 7.83 | 7.85 | 7.83 |
| Febrero | 7.83 | 7.11 | 6.04 |
| Marzo | 7.83 | 8.8 | 5.01 |
| Abril | 7.83 | 7.42 | 5.95 |

Tabla 24 Resultados del análisis del pH para tepetate

| Fecha | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución Nutritiva |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Enero | 7.45 | 7.4 | 7.5 |
| Febrero | 7.45 | 8.02 | 7.1 |
| Marzo | 7.45 | 8.66 | 7.06 |
| Abril | 7.45 | 7.53 | 6.76 |

Tabla 25 Resultados del análisis del pH para suelo franco limoso

| Fecha | F.L. original | F.L. Biosólidos | F.L. Solución Nutritiva |
|---------|---------------|-----------------|-------------------------|
| Enero | 5.4 | 5.8 | 5.7 |
| Febrero | 5.4 | 6.06 | 5.32 |
| Marzo | 5.4 | 6.55 | 5.72 |
| Abril | 5.4 | 6.04 | 5.01 |

10.1.2 Resultados de conductividad eléctrica

Tabla 26 Conductividad eléctrica entre suelos con biosólidos

| Periodo | Tepojar Original | Tepojar Biosólidos | Tepetate Original | Tepetate Biosólidos | F.L. Original | F.L. Biosólidos |
|---------|------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| enero | 500 | 350 | 530 | 398 | 580 | 478 |
| febrero | | 231 | | 406.6 | | 311 |
| marzo | | 124 | | 202 | | 190 |
| abril | | 400 | | 680 | | 480 |

Tabla 27 Resultados del análisis de conductividad eléctrica para tepojar

| Fecha | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepojar Solución Nutritiva |
|---------|------------------|--------------------|----------------------------|
| Enero | 500 | 350 | 980 |
| Febrero | 500 | 231 | 1217 |
| Marzo | 500 | 124 | 440 |
| Abril | 500 | 400 | 620 |

Tabla 28 Resultados del análisis de conductividad eléctrica para tepetate

| Fecha | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución Nutritiva |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Enero | 530 | 398 | 550 |
| Febrero | 530 | 406.6 | 480.6 |
| Marzo | 530 | 202 | 244 |
| Abril | 530 | 680 | 540 |

Tabla 29 Resultados del análisis de conductividad eléctrica para Franco Limoso

| Fecha | F.L. original | F.L. Biosólidos | F.L. Solución Nutritiva |
|---------|---------------|-----------------|-------------------------|
| Enero | 580 | 478 | 498 |
| Febrero | 580 | 311 | 765.3 |
| Marzo | 580 | 190 | 315 |
| Abril | 580 | 480 | 650 |

10.1.3 Resultados de capacidad de intercambio cationico

Tabla 30 Capacidad de intercambio catiónico entre suelos con biosólidos

| Periodo | Tepojar Original | Tepojar Biosólidos | Tepetate Original | Tepetate Biosólidos | F.L. Original | F.L. Biosólidos |
|---------|------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| enero | 12 | 20.7 | 34.8 | 37 | 43.5 | 52.2 |
| febrero | | 18.5 | | 39.1 | | 56.5 |
| marzo | | 19.6 | | 32.6 | | 59.8 |
| abril | | 21.3 | | 39.7 | | 61.2 |

Tabla 31 Resultados del análisis de capacidad de intercambio catiónico para tepojar

| Fecha | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepojar Solución Nutritiva |
|---------|------------------|--------------------|----------------------------|
| Enero | 12 | 20.7 | 15.2 |
| Febrero | 12 | 18.5 | 14.1 |
| Marzo | 12 | 19.6 | 13 |
| Abril | 12 | 21.3 | 13.6 |

Tabla 32 Resultados del análisis de capacidad de intercambio catiónico para tepetate

| Fecha | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución Nutritiva |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Enero | 34.8 | 37 | 33.7 |
| Febrero | 34.8 | 39.1 | 28.3 |
| Marzo | 34.8 | 32.6 | 27.2 |
| Abril | 34.8 | 39.7 | 25.6 |

Tabla 33 Resultados del análisis de capacidad de intercambio catiónico para suelos Franco limosos

| Fecha | F.L. original | F.L. Biosólidos | F.L. Solución Nutritiva |
|---------|---------------|-----------------|-------------------------|
| Enero | 43.5 | 52.2 | 35.9 |
| Febrero | 43.5 | 56.5 | 41.3 |
| Marzo | 43.5 | 59.8 | 38 |
| Abril | 43.5 | 61.2 | 39.8 |

10.1.4 Resultados de porcentaje de materia orgánica

Tabla 34 Materia Orgánica entre suelos con Biosólidos

| Periodo | Tepojar Original | Tepojar Biosólidos | Tepetate Original | Tepetate Biosólidos | F.L. Original | F.L. Biosólidos |
|---------|------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| enero | 2.84 | 2.99 | 4.37 | 4.57 | 10.72 | 11.029 |
| febrero | | 3.87 | | 4.55 | | 15.34 |
| marzo | | 5.65 | | 5.25 | | 28.1 |
| abril | | 5.87 | | 6.31 | | 33.3 |

Tabla 35 Resultados del análisis de materia orgánica para tepojar

| Fecha | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepojar Solución Nutritiva |
|---------|------------------|--------------------|----------------------------|
| Enero | 2.84 | 2.99 | 2.847 |
| Febrero | 2.84 | 3.87 | 3.27 |
| Marzo | 2.84 | 5.65 | 4.76 |
| Abril | 2.84 | 5.87 | 5.34 |

Tabla 36 Resultados del análisis de materia orgánica para tepetate

| Fecha | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución Nutritiva |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Enero | 4.37 | 4.57 | 4.39 |
| Febrero | 4.37 | 4.55 | 4.84 |
| Marzo | 4.37 | 5.25 | 4.98 |
| Abril | 4.37 | 6.31 | 5.66 |

Tabla 37 Resultados del análisis de materia orgánica para Suelo Franco Limoso

| Fecha | F.L original | F.L Biosólidos | F.L. Solución Nutritiva |
|---------|--------------|----------------|-------------------------|
| Enero | 10.72 | 11.029 | 10.71 |
| Febrero | 10.72 | 15.34 | 11.41 |
| Marzo | 10.72 | 28.1 | 18.3 |
| Abril | 10.72 | 33.3 | 26.89 |

10.1.5 Resultados de biomasa

Tabla 38 Análisis de Biomasa entre Suelos

| Periodo | Tepojar Ori | Tepojar Bio | Tepetate Ori. | Tepetate Bio | F.L. Original | F.L. Bio |
|---------|-------------|-------------|---------------|--------------|---------------|----------|
| enero | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| febrero | | 7.8 | | 1.4 | | 4 |
| marzo | | 0 | | 5.63 | | 6.3 |
| abril | | 15.5 | | 9.87 | | 13.5 |

Tabla 39 Resultados del análisis de biomasa para tepojar

| Fecha | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepojar Solución Nutritiva |
|---------|------------------|--------------------|----------------------------|
| Enero | 0 | 0 | 0 |
| Febrero | 0 | 7.8 | 2.7 |
| Marzo | 0 | 7.7 | 11.5 |
| Abril | 0 | 15.5 | 13.3 |

Tabla 40 Resultados del análisis de biomasa para tepetate

| Fecha | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución Nutritiva |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Enero | 0 | 0 | 0 |
| Febrero | 0 | 1.4 | 1.5 |
| Marzo | 0 | 5.63 | 4.8 |
| Abril | 0 | 9.87 | 8.8 |

Tabla 41 Resultados del análisis de biomasa para suelos Franco Limosos

| Fecha | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución Nutritiva |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Enero | 0 | 0 | 0 |
| Febrero | 0 | 4 | 1.6 |
| Marzo | 0 | 6.3 | 6.3 |
| Abril | 0 | 13.5 | 9.77 |

10.1.6 Resultados de adsorción de sodio

Tabla 42 Relación de adsorción de sodio entre suelos

| Fecha | Tepojar ori | Tepojar bio | tepojar S.N. | Tepetate ori | Tepetate bio | Tepetate S.N. | F.L. Ori | F.L. bio | F.L. S.N. |
|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------|----------|-----------|
| enero | 0.05963 | 0.05963 | 0.05963 | 0.0657 | 0.0657 | 0.0657 | 0.05969 | 0.05969 | 0.05969 |
| abril | | 0.08543 | 0.09765 | | 0.05435 | 0.07534 | | 0.05537 | 0.05788 |

Tabla 43 Relación de adsorción de sodio para Tepojar (meq/l)

| Periodo | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepojar Solución nutritiva |
|---------|------------------|--------------------|----------------------------|
| Inicio | 0.059631086 | 0 | 0 |
| Final | 0.059631086 | 0.08543 | 0.09765 |

Tabla 44 Relación de adsorción de sodio para Tepetate (meq/l)

| Periodo | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución nutritiva |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Inicio | 0.060576 | 0 | 0 |
| Final | 0.060576 | 0.05435 | 0.07534 |

Tabla 45 Relación de adsorción de sodio para suelos Franco Limosos (meq/l)

| Periodo | F.L. original | F.L. Biosólidos | F.L. Solución nutritiva |
|---------|---------------|-----------------|-------------------------|
| Inicio | 0.05969 | 0 | 0 |
| Final | 0.05969 | 0.05537 | 0.05788 |

10.1.7 Resultados de conductividad hidráulica

Tabla 46 Conductividad hidráulica entre suelos

| Fecha | Tepojar original | Tepojar bio | tepojar S.N. | Tepetate ori | Tepetate bio | Tepetate S.N. | F.L. original | F.L. bio | F.L. S.N. |
|-------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| enero | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2.3 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | $1.9 \cdot 10^{-5}$ | $1.9 \cdot 10^{-5}$ | $1.9 \cdot 10^{-5}$ |
| abril | | $1.7 \cdot 10^{-5}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | | $4 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{-5}$ | | $4.1 \cdot 10^{-5}$ | $6.3 \cdot 10^{-5}$ |

Tabla 47 Conductividad hidráulica para Tepojar (m/s)

| Periodo | Tepojar original | Tepojar Biosólidos | Tepojar Solución nutritiva |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| Inicio | $2.27 \cdot 10^{-4}$ | 0 | 0 |
| Final | $2.27 \cdot 10^{-4}$ | $1.65 \cdot 10^{-5}$ | $3.33 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 48 Conductividad hidráulica para Tepetate (m/s)

| Periodo | Tepetate original | Tepetate Biosólidos | Tepetate Solución nutritiva |
|---------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| Inicio | $2.75 \cdot 10^{-6}$ | 0 | 0 |
| Final | $2.75 \cdot 10^{-6}$ | $4.36 \cdot 10^{-5}$ | $8.25 \cdot 10^{-5}$ |

Tabla 49 Conductividad hidráulica para suelos Franco Limosos (m/s)

| Periodo | F.L. original | F.L. Biosólidos | F.L. Solución nutritiva |
|---------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Inicio | $1.89 \cdot 10^{-5}$ | 0 | 0 |
| Final | $1.89 \cdot 10^{-5}$ | $4.13 \cdot 10^{-5}$ | $6.25 \cdot 10^{-5}$ |

10.1.8 Resultados del análisis del diámetro promedio de agregados

Tabla 50 Diámetro de agregados entre suelos

| Periodo | Tepojar ori | Tepojar Bio | tepojar S.N. | Tepetate ori | Tepetate Bio | Tepetate S.N. | F.L. Orig | F.L. Bio | F.L. S.N. |
|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------|----------|-----------|
| enero | 0.132 | 0.151 | 0.122 | 0.052 | 0.068 | 0.064 | 0.043 | 0.049 | 0.051 |
| febrero | 0.132 | 0.162 | 0.117 | 0.052 | 0.081 | 0.074 | 0.043 | 0.054 | 0.057 |
| marzo | 0.132 | 0.174 | 0.121 | 0.052 | 0.119 | 0.089 | 0.043 | 0.112 | 0.090 |
| abril | 0.132 | 0.176 | 0.124 | 0.052 | 0.125 | 0.093 | 0.043 | 0.120 | 0.091 |

10.1.9 Resultados del análisis del tamaño específico de agregados

Tabla 51 Tamaño específico de agregados Tepojar

| no. Malla | Tepojar Ori | acumulado | tamaño de malla | lo que pasa | Tepo Bio | acum Bio | Lo que pasa Bio | Tepojar S.N | Acum S.N. | Lo que pasa S.N. |
|-----------|-------------|-----------|-----------------|-------------|----------|----------|-----------------|-------------|-----------|------------------|
| 10 | 0.4 | 0.4 | 2.03 | 99.6 | 10.7 | 10.7 | 89.3 | 0.4 | 0.4 | 99.6 |
| 16 | 27.6 | 28 | 1.19 | 72 | 29.25 | 39.95 | 60.05 | 24.5 | 24.9 | 75.1 |
| 18 | 8 | 36 | 1 | 64 | 8.89 | 48.84 | 51.16 | 7.2 | 32.1 | 67.9 |
| 30 | 30.8 | 66.8 | 0.59 | 33.2 | 30.03 | 78.87 | 21.13 | 30.1 | 62.2 | 37.8 |
| 50 | 20.9 | 87.7 | 0.29 | 12.3 | 17.5 | 96.37 | 3.63 | 23.4 | 85.6 | 14.4 |
| 51 | 12.3 | 100 | 0.25 | 0 | 3.63 | 100 | 0 | 14.4 | 100 | 0 |

Coefficiente de Uniformidad (C.U.) = D60/D10

| | Diámetro 60 | Diámetro 10 | C.U. |
|--------------------|-------------|-------------|------|
| Tepojar Original | 0.94 | 0.28 | 3.36 |
| Tepojar Biosólidos | 1.19 | 0.4 | 2.98 |
| Tepojar S.N. | 0.9 | 0.28 | 3.21 |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 52 Tamaño específico de agregados Tepetate

| no. Malla | Tepetate Ori | acumulado | tamaño de malla | lo que pasa | Tepetate Bio | acum Bio | Lo que pasa Bio | Tepetate S.N | Acum S.N. | Lo que pasa S.N. |
|-----------|--------------|-----------|-----------------|-------------|--------------|----------|-----------------|--------------|-----------|------------------|
| 10 | 0.3 | 0.3 | 2.03 | 99.7 | 6.4 | 6.4 | 93.6 | 4.8 | 4.8 | 95.2 |
| 16 | 6.8 | 7.1 | 1.19 | 92.9 | 10.27 | 16.67 | 83.33 | 9.37 | 14.17 | 85.83 |
| 18 | 3.5 | 10.6 | 1 | 89.4 | 9.22 | 25.89 | 74.11 | 6.01 | 20.18 | 79.82 |
| 30 | 13.6 | 24.2 | 0.59 | 75.8 | 33.15 | 59.04 | 40.96 | 18.77 | 38.95 | 61.05 |
| 50 | 20.1 | 44.3 | 0.29 | 55.7 | 28.8 | 87.84 | 12.16 | 29.6 | 68.55 | 31.45 |
| 51 | 55.7 | 100 | 0.25 | 0 | 12.16 | 100 | 0 | 31.45 | 100 | 0 |

Coefficiente de Uniformidad = D60/D10

| | Diámetro 60 | Diámetro 10 | C.U. |
|---------------------|-------------|-------------|------|
| Tepetate Original | 0.36 | 0.26 | 1.38 |
| Tepetate Biosólidos | 0.82 | 0.28 | 2.93 |
| Tepetate S.N. | 0.58 | 0.26 | 2.23 |

Tabla 53 Tamaño específico de agregados franco limoso

| no. Malla | F.L. Original | acumulado | tamaño de malla | lo que pasa | F.L. Bio | acum Bio | Lo que pasa Bio | F.L. S.N. | Acum S.N. | Lo que pasa S.N. |
|-----------|---------------|-----------|-----------------|-------------|----------|----------|-----------------|-----------|-----------|------------------|
| 10 | 4.8 | 4.8 | 2.03 | 95.2 | 8.3 | 8.3 | 91.7 | 2.39 | 2.39 | 97.61 |
| 16 | 2.8 | 7.6 | 1.19 | 92.4 | 9.25 | 17.55 | 82.45 | 7.21 | 9.6 | 90.4 |
| 18 | 0.9 | 8.5 | 1 | 91.5 | 8.34 | 25.89 | 74.11 | 8.87 | 18.47 | 81.53 |
| 30 | 5.1 | 13.6 | 0.59 | 86.4 | 23.5 | 49.39 | 50.61 | 24.3 | 42.77 | 57.23 |
| 50 | 15.8 | 29.4 | 0.29 | 70.6 | 34.3 | 83.69 | 16.31 | 30.1 | 72.87 | 27.13 |
| 51 | 70.6 | 100 | 0.25 | 0 | 16.31 | 100 | 0 | 27.13 | 100 | 0 |

Coefficiente de Uniformidad = D60/D10

| | Diámetro 60 | Diámetro 10 | C.U. |
|-----------------|-------------|-------------|------|
| F.L. Original | 0.28 | 0.26 | 1.08 |
| F.L. Biosólidos | 0.76 | 0.28 | 2.71 |
| F.L. S.N. | 0.64 | 0.26 | 2.46 |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Anexo 2. Análisis estadístico

10.1.10 Análisis estadístico del pH del último muestreo

| Tratamientos | Bloques | | | | | |
|----------------|---------|----------|-------|-------|--------|---------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | yprom | yi | yi cuad |
| A Testigo | 7.830 | 7.450 | 5.400 | 6.893 | 20.680 | 427.662 |
| B Biosólidos | 7.420 | 7.530 | 6.040 | 6.997 | 20.990 | 440.580 |
| C Solución Nu. | 5.950 | 6.760 | 5.010 | 5.907 | 17.720 | 313.998 |

| | | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| yj promedio | 7.07 | 7.25 | 5.48 | | | |
| yj | 21.200 | 21.740 | 16.450 | 59.390 | 59.390 | 1182.241 |
| yj cuad | 449.440 | 472.628 | 270.603 | 1192.670 | 3527.172 | 394.080 |

| cuadrados de cada valor | | | suma de cada valor cuadrado |
|-------------------------|---------|----------|-----------------------------------|
| A | Tepojar | Tepetate | |
| B | 61.309 | 55.503 | 29.160 |
| C | 55.056 | 56.701 | 36.482 |
| | 35.403 | 45.698 | 25.100 |

bt(total/bt)² 391.908
total cuad/bt 391.908

| Fuente | gl | g.l | sc | cm | F |
|-------------|-------------|-----|-------|-------|--------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 2.172 | 1.086 | 6.375 |
| Bloque | b-1 | 2 | 5.649 | 2.824 | 16.577 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 0.682 | 0.170 | |
| Total | bt-1 | 8 | 8.502 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para v1 = 2 y v2 = 4 grados de libertad es:

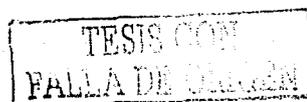
F_{0.05} = 6.94

SC Error = 0.682
MSE = 0.170377778

GI Error = 4
0.05679259

Error Estandar de una media de
tratamientos:

Syprom. = 0.238311965



| Tratamientos | Bloques | | F.L. | Y _i | Y _{prom} | Posición |
|--------------|---------|----------|-------|----------------|-------------------|----------|
| | Tepojar | Tepetate | | | | |
| Testigo | 7.830 | 7.450 | 5.400 | 20.68 | 6.89 | 2 |
| Biosólidos | 7.420 | 7.530 | 6.040 | 20.99 | 7.00 | 3 |
| Solución Nu. | 5.950 | 6.760 | 5.010 | 17.72 | 5.91 | 1 |

Rangos de intervalo significativo para la prueba de intervalos múltiples de Duncan ($r_{.05}$)

$$r_{.05}(2,4)=3.93 \quad r_{.05}(3,4)=4.01$$

Rangos significativos mínimos

$$R_2 \quad r_{.05}(2,4)S_{prom} = (3.93)(0.238) = 0.94$$

$$R_3 \quad r_{.05}(3,4)S_{prom} = (4.01)(0.238) = 0.96$$

| Comparaciones por pares | | |
|-------------------------|-------------------|------|
| Posición | | |
| 3vs1: | $(7.00)-(5.91) =$ | 1.09 |
| 3vs2: | $(7.00)-(6.89) =$ | 0.11 |
| 2vs1: | $(6.89)-(5.91) =$ | 0.98 |

>0.96

<0.94

>0.96

TESIS CON
FALLA DE ORDEN

10.1.11 Análisis estadístico sobre la conductividad eléctrica del último muestreo

| Tratamiento | Bloques | | | yprom | yi | yi cuad |
|---------------|---------|----------|--------|--------|---------|-----------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | | | |
| A Testigo | 500.00 | 530.00 | 580.00 | 536.67 | 1610.00 | 2592100.0 |
| B Biosólidos | 400.00 | 680.00 | 480.00 | 520.00 | 1560.00 | 2433600.0 |
| C Solución N. | 620.00 | 540.00 | 650.00 | 603.33 | 1810.00 | 3276100.0 |

| | | | | | | |
|-------------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|
| yj promedio | 506.67 | 583.33 | 570.00 | | | |
| yj | 1520.00 | 1750.00 | 1710.00 | 4980.00 | 4980.00 | 8301800.0 |
| yj cuad | 2310400.0 | 3062500.0 | 2924100.00 | 8297000.00 | 24800400.00 | 2767266.6 |

cuadrados de cada valor

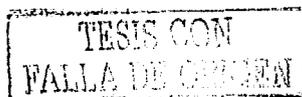
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | suma de |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|
| A | 250000.00 | 280900.00 | 336400.00 | cada valor |
| B | 160000.00 | 462400.00 | 230400.00 | cuadrado |
| C | 384400.00 | 291600.00 | 422500.00 | 2818600 |

bt(total/bt)² 2755600.00
total cuad/bt 2755600.00

| Tratamiento | gl | gl | sc | cm | F |
|-------------|-------------|----|----------|----------|------|
| Bloque | t-1 | 2 | 11666.67 | 5833.33 | 0.57 |
| Error | b-1 | 2 | 10066.67 | 5033.33 | 0.49 |
| | (b-1)*(t-1) | 4 | 41266.67 | 10316.67 | |
| Total | bt-1 | 8 | 63000.00 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para v1 = 2 y v2 = 4 grados de libertad es:

F0.05= 6.94



10.1.12 Análisis estadístico sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del último muestreo

| Tratamientos | Bloques | | F.L. | yprom | yi | yi cuad |
|---------------|---------|----------|-------|-------|--------|----------|
| | Tepojar | Tepetate | | | | |
| A Testigo | 12.00 | 34.80 | 43.50 | 30.10 | 90.30 | 8154.09 |
| B Biosólidos | 21.30 | 39.70 | 61.20 | 40.73 | 122.20 | 14932.84 |
| C Solución N. | 13.60 | 25.60 | 39.80 | 26.33 | 79.00 | 6241.00 |

| | | | | | | |
|-------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| yj promedio | 15.63 | 33.37 | 48.17 | | | |
| yj | 46.90 | 100.10 | 144.50 | 291.50 | 291.50 | 29327.93 |
| yj cuad | 2199.61 | 10020.01 | 20880.25 | 33099.87 | 84972.25 | 9775.98 |

| | cuadrados de cada valor | | | suma de cada valor cuadrado |
|---|-------------------------|----------|---------|-----------------------------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | |
| A | 144.00 | 1211.04 | 1892.25 | 11446.87 |
| B | 453.69 | 1576.09 | 3745.44 | |
| C | 184.96 | 655.36 | 1584.04 | |

bt(total/bt)² 9441.361
total
cuad/bt 9441.361

| | gl | gl | sc | cm | F |
|-------------|-------------|----|---------|--------|-------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 334.62 | 167.31 | 8.48 |
| Bloque | b-1 | 2 | 1591.93 | 795.96 | 40.32 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 78.96 | 19.74 | |
| Total | bt-1 | 8 | 2005.51 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para v1 = 2 y v2 = 4 grados de libertad es:
F_{0.05} = 6.94

SC Error = 78.960 GI Error = 4
MSE = 19.74 6.58
Error Estandar de una media de tratamientos:
Syrom. = 2.565151068

| Tratamientos | Bloques | | F.L. | Y _i | Yprom | Posición |
|--------------|---------|----------|-------|----------------|-------|----------|
| | Tepojar | Tepetate | | | | |
| Testigo | 12.00 | 34.80 | 43.50 | 90.30 | 30.10 | 2 |
| Biosólidos | 21.30 | 39.70 | 61.20 | 122.20 | 40.73 | 3 |
| Solución Nu. | 13.60 | 25.60 | 39.80 | 79.00 | 26.33 | 1 |



Rangos de intervalo significativo para la prueba de intervalos múltiples de Duncan ($r_{.05}$)

$r_{.05}(2,4)=3.93$ $r_{.05}(3,4)=4.01$
Rangos significativos mínimos
 R_2 $r_{.05}(2,4)S_{prom} = (3.93)(2.56) = 10.08$
 R_3 $r_{.05}(3,4)S_{prom} = (4.01)(2.56) = 10.29$

| Comparaciones por pares | | | |
|-------------------------|------------------|-------|--------------|
| Posición | | | r |
| 3vs1: | (40.73) (26.33)= | 14.40 | >10.29 r_3 |
| 3vs2: | (40.73)-(30.10)= | 10.63 | >10.08 r_2 |
| 2vs1: | (30.10)-(26.33)= | 3.77 | <10.08 r_2 |

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

10.1.13 Análisis estadístico sobre la relación de adsorción de sodio del último muestreo

| Tratamientos | Bloques | | | yprom | yi | yi cuad |
|---------------|---------|----------|-------|-------|-------|---------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | | | |
| A Testigo | 0.060 | 0.066 | 0.060 | 0.062 | 0.185 | 0.034 |
| B Biosólidos | 0.085 | 0.054 | 0.055 | 0.065 | 0.195 | 0.038 |
| C Solución N. | 0.098 | 0.075 | 0.057 | 0.077 | 0.230 | 0.053 |

| | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| yj promedio | 0.081 | 0.065 | 0.057 | | | |
| yj | 0.24 | 0.20 | 0.17 | 0.61 | 0.61 | 0.13 |
| yj cuad | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.13 | 0.37 | 0.04 |

cuadrados de cada valor

| | Tepojar | Tepetate | F.L. | suma de |
|---|---------|----------|-------|------------|
| A | 0.004 | 0.004 | 0.004 | cada valor |
| B | 0.007 | 0.003 | 0.003 | cuadrado |
| C | 0.010 | 0.006 | 0.003 | 0.04321381 |

$$\frac{bt(\text{total}/bt)^2}{\text{total cuad}/bt} = \frac{0.041}{0.041}$$

| | gl | g.l. | sc | cm | F |
|-------------|---------------|------|--------|--------|--------|
| Tratamiento | $t-1$ | 2 | 0.0004 | 0.0002 | 1.2107 |
| Bloque | $b-1$ | 2 | 0.0009 | 0.0004 | 2.8193 |
| Error | $(b-1)*(t-1)$ | 4 | 0.0006 | 0.0002 | |
| Total | $bt-1$ | 8 | 0.0018 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para $v_1 = 2$ y $v_2 = 4$ grados de libertad es:

$$F_{0.05} = 6.94$$

TECNICOM
FALLA DE ORIGEN

10.1.14 *Análisis estadístico sobre el porcentaje de materia orgánica del último muestreo*

| Tratamientos | Bloques | | | | | |
|---------------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | yprom | yi | yi cuad |
| A Testigo | 2.840 | 4.370 | 10.720 | 5.977 | 17.930 | 321.485 |
| B Biosólidos | 5.870 | 6.310 | 33.300 | 15.160 | 45.480 | 2068.430 |
| C Solución N. | 5.340 | 5.660 | 26.890 | 12.630 | 37.890 | 1435.652 |

| | | | | | | |
|-------------|--------|--------|---------|---------|----------|---------|
| yj promedio | 4.683 | 5.447 | 23.637 | | | |
| yj | 14.05 | 16.34 | 70.91 | 101.30 | 101.30 | 3825.57 |
| yj cuad | 197.40 | 267.00 | 5028.23 | 5492.63 | 10261.69 | 1275.19 |

| | cuadrados de cada valor | | | suma de cada valor cuadrado |
|---|-------------------------|----------|---------|-----------------------------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | |
| A | 8.07 | 19.10 | 114.92 | 2108.8672 |
| B | 34.46 | 39.82 | 1108.89 | |
| C | 28.52 | 32.04 | 723.07 | |

bt(total/bt)² 1140.188
total cuad/bt 1140.188

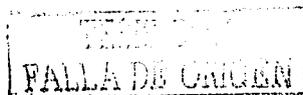
| | gl | g.l. | sc | cm | F |
|-------------|-------------|------|--------|--------|------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 135.00 | 67.50 | 1.89 |
| Bloque | b-1 | 2 | 690.69 | 345.34 | 9.66 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 142.99 | 35.75 | |
| Total | bt-1 | 8 | 968.68 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para v1 = 2 y v2 = 4 grados de libertad es:
F0.05= 6.94

SC Error= 142.990 Gl Error = 4
MSE = 35.7475 11.91583333

Error Estandar de una media de tratamientos:
Sypprom. = 3.451931826

| Tratamientos | Bloques | | | | | Posición |
|--------------|---------|----------|--------|----------------|-------|----------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | Y _i | Yprom | |
| Testigo | 2.840 | 4.370 | 10.720 | 17.93 | 5.98 | 1 |
| Biosólidos | 5.870 | 6.310 | 33.300 | 45.48 | 15.16 | 3 |
| Solución Nu. | 5.340 | 5.660 | 26.890 | 37.89 | 12.63 | 2 |



Rangos de intervalo significativo para la prueba de intervalos múltiples de Duncan ($r_{.05}$)

| Rangos significativos mínimos | | | | Comparaciones por pares | | | |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------|-------|-------------------------|-------------------------------------|------|-------------|
| | $r_{.05}(2,4)=3.93$ | $r_{.05}(3,4)=4.01$ | | Posición | | r | |
| R_2 | $r_{.05}(2,4)S_{prom} =$ | $(3.93)(3.45) =$ | 13.57 | 3vs1: | $(15.16)-(5.98)$ = $(15.16)-$ | 9.18 | $<13.84r_3$ |
| R_3 | $r_{.05}(3,4)S_{prom} =$ | $(4.01)(3.45) =$ | 13.84 | 3vs2: | $(12.63) =$ | 2.53 | $<13.57r_2$ |
| | | | | 2vs1: | $(12.63)-(5.98) =$ | 6.65 | $<13.57r_2$ |

TESIS DE
FALLA DE ORIGEN

10.1.15 Análisis estadístico de la biomasa del último muestreo

| Tratamientos | | Bloques | | | | | |
|--------------|-------------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|
| | | Tepojar | Tepetate | F.L. | yprom | yj | yi cuad |
| A | Testigo | 0 | 0 | 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B | Biosólidos | 15.500 | 9.870 | 13.500 | 12.957 | 38.870 | 1510.877 |
| C | Solución N. | 13.300 | 8.800 | 9.770 | 10.623 | 31.870 | 1015.697 |

| | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--|
| yj promedio | 9.60 | 6.22 | 7.76 | | | | |
| yj | 28.80 | 18.67 | 23.27 | 70.74 | 70.74 | 2526.57 | |
| yj cuad | 829.44 | 348.57 | 541.49 | 5004.15 | 1719.50 | 842.19 | |

| cuadrados de cada valor | | | | | |
|-------------------------|--|---------|----------|---------------------------|----------|
| | | Tepojar | Tepetate | F.L. | suma de |
| A | | 240.25 | 97.42 | 182.25 | cuadrado |
| B | | 176.89 | 77.44 | 95.45 | 869.70 |
| | | | | bt(total/bt) ² | 556.016 |
| | | | | total | |
| | | | | cuad/bt | 556.016 |

| Tratamiento | gl | g.l. | sc | cm | F |
|-------------|-------------|------|--------|-------|-------|
| Boque | t-1 | 1 | 286.17 | 95.39 | 18.42 |
| Error | b-1 | 2 | 17.15 | 5.72 | 1.10 |
| Total | (b-1)*(t-1) | 2 | 10.36 | 5.18 | |
| | bt-1 | 5 | 313.68 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para v1 = 2 y v2 = 4 grados de libertad es:

F_{0.05} = 6.94

| | | | |
|------------|--------|------------|-------------|
| SC Error = | 10.360 | GI Error = | 2 |
| MSE = | 5.18 | | 1.726666667 |

Error Estandar de una media de tratamientos:

Syprom. = 1.31402689

| Tratamientos | Bloques | | | | | Posición |
|--------------|---------|----------|--------|----------------|-------|----------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | Y _j | Yprom | |
| Testigo | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 | |
| Biosólidos | 15.500 | 9.870 | 13.500 | 38.87 | 12.96 | 2 |
| Solución Nu. | 13.300 | 8.800 | 9.770 | 31.87 | 10.62 | 1 |

Rangos de intervalo significativo para la prueba de intervalos múltiples de Duncan (r₀₅)

| | | | | | |
|-------------------------------|---|-------------------------|-------|------------------------|----------------|
| r ₀₅ (2,2) = 6.09 | r ₀₅ (3,2) = 6.09 | Comparaciones por pares | | | r |
| Rangos significativos mínimos | | Posición | | | < 8.0 |
| R ₂ | r ₀₅ (2,2)S _{prom} = (6.09)(1.314114) = | 8.00 | 2vs1: | (12.96)-(10.62) = 2.34 | r ₂ |



10.1.16 Análisis estadístico sobre la conductividad hidráulica del último muestreo

| Tratamientos | Bloques | | | | | |
|---------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | yprom | yi | yi cuad |
| A Testigo | 0.00022700 | 0.00000275 | 0.00001890 | 0.00008288 | 0.00024865 | 0.00000006 |
| B Biosólidos | 0.00001650 | 0.00004350 | 0.00004130 | 0.00003377 | 0.00010130 | 0.00000001 |
| C Solución N. | 0.00033300 | 0.00008250 | 0.00006250 | 0.00015933 | 0.00047800 | 0.00000023 |
| yj promedio | 0.000192167 | 0.00004292 | 0.0000409 | | | |
| yj | 0.00057650 | 0.00012875 | 0.00012270 | 0.00082795 | 0.00082795 | 0.00000030 |
| yj cuad | 0.00000033 | 0.00000002 | 0.00000002 | 0.00000069 | 0.00000036 | 0.00000010 |

cuadrados de cada valor

| | Tepojar | Tepetate | F.L. | suma de |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| A | 0.00000005153 | 0.00000000001 | 0.00000000036 | cada valor |
| B | 0.00000000027 | 0.00000000189 | 0.00000000171 | cuadrado |
| C | 0.00000011089 | 0.00000000681 | 0.00000000391 | 0.00000017737 |

bt(total/bt)² 0.000
total cuad/bt 0.000

| | gl | g.l. | sc | cm | F |
|-------------|-------------|------|-------------|-------------|-------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 0.000000024 | 0.000000012 | 1.501 |
| Bloque | b-1 | 2 | 0.000000045 | 0.000000023 | 2.821 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 0.000000032 | 0.000000008 | |
| Total | bt-1 | 8 | 0.000000101 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para v1 = 2 y v2 = 4 grados de libertad es:

F_{0.05} = 6.94

TESIS
FALLA DE ORIGEN

Rangos de intervalo significativo para la prueba de intervalos múltiples de Duncan ($r_{.05}$)

$r_{.05}(2,4)=3.93$ $r_{.05}(3,4)=4.01$
 Rangos significativos mínimos
 R₂ $r_{.05}(2,4)S_{prom} = (3.93)(0.0091) = 0.0359$
 R₃ $r_{.05}(3,4)S_{prom} = (4.01)(0.0091) = 0.0366$

| Comparaciones por pares | | | |
|-------------------------|-------------------|------|-------------|
| Posición | | | r |
| 3vs1: | $(0.14)-(0.08) =$ | 0.06 | $>0.035r_3$ |
| 3vs2: | $(0.14)-(0.10) =$ | 0.04 | $>0.036r_2$ |
| 2vs1: | $(0.10)-(0.08) =$ | 0.02 | $<0.036r_2$ |

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

10.1.18 *Análisis estadístico sobre el tamaño específico de agregados del último muestreo*

| Tratamientos | Bloques | | | yprom | yi | yi cuad |
|---------------|---------|----------|-------|-------|-------|---------|
| | Tepojar | Tepetate | F.L. | | | |
| A Testigo | 0.280 | 0.26 | 0.240 | 0.253 | 0.760 | 0.578 |
| B Biosólidos | 0.400 | 0.28 | 0.290 | 0.327 | 0.980 | 0.960 |
| C Solución N. | 0.280 | 0.26 | 0.260 | 0.267 | 0.800 | 0.640 |

| | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| yj promedio | 0.320 | 0.267 | 0.263 | | | |
| yj | 0.96 | 0.80 | 0.79 | 2.55 | 2.54 | 2.18 |
| yj cuad | 0.92 | 0.64 | 0.62 | 6.50 | 2.19 | 0.73 |

cuadrados de cada valor

| | Tepojar | Tepetate | F.L. | suma de |
|---|---------|----------|-------|------------|
| A | 0.078 | 0.068 | 0.058 | cada valor |
| B | 0.160 | 0.078 | 0.084 | cuadrado |
| C | 0.078 | 0.068 | 0.068 | 0.7397 |

bt(total/bt)² 0.717
total cuad/bt 0.723

| | gl | g.l. | sc | cm | F |
|-------------|-------------|------|-------|-------|-------|
| Tratamiento | t-1 | 2 | 0.004 | 0.002 | 0.917 |
| Bloque | b-1 | 2 | 0.006 | 0.003 | 1.590 |
| Error | (b-1)*(t-1) | 4 | 0.008 | 0.002 | |
| Total | bt-1 | 8 | 0.017 | | |

El valor crítico del estadístico F = 0.05 para v1 = 2 y v2 = 4 grados de libertad es:

F_{0.05} = 6.94

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN