



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEJORAMIENTO DE SUELO CON BIOSÓLIDOS  
PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DE LA UNAM

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL EN SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

P R E S E N T A :

NICOLÁS ENRIQUE CORDERO RIVERA

TUTOR:

M. EN ING. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ



AÑO

2010



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.

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dra. León Rodríguez Frida León

Secretario: M.C. Fuentes Gea Vicente

Vocal: M. I. Silva Martínez Ana Elisa

1er. Suplente: Dra. Iturbe Argüelles Rosario

2do. Suplente: M.I. Ramírez Camperos Mercedes Esperanza

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería de la UNAM

## **TUTORA DE LA TESIS:**

---

M. I. Silva Martínez Ana Elisa

## DEDICATORIAS

### **A Dios:**

Gracias por iluminar el camino hacia otra meta más que ahora se ha logrado y permitirme compartirla con todos mis seres queridos.

### **A mis Papás: Enrique y Tere**

Por que siempre han creído en mí desde antes de nacer, por su apoyo incondicional y su amor inmenso que nunca se los podre recompensar como yo quisiera.

### **A mis hermanos: Eduardo, Mariel y Carlos**

A ti Eduardo que me enseñaste la importancia de reír, a ti Mariel que me enseñaste la importancia de tener carácter y a ti Carlos que me enseñaste la importancia ser maduro. Gracias por ser mi compañía, por su apoyo otorgado y su amor, y sobre todo por estar al pendiente de mis papás cuando no pude estar con ellos.

### **A mis familiares**

Gracias a su cariño y su presencia, ayudaron a mis papás a criarme y ayudaron a mis hermanos a ser mejores personas, por estar presentes en los momentos importantes de nuestras vidas.

### **A mis Amigos**

Que siempre con su presencia, apoyo y amistad, me hicieron la persona que soy, que estuvieron conmigo tanto en los buenos como en los malos momentos y ahora tiene un lugar especial en mi vida.

*“Un hombre exitoso no es el que es perfecto,  
si no el que busca la mejora continua”*

*Ing. Nicolás Enrique Cordero Rivera*

## AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado de Ingeniería de la UNAM, por darme la oportunidad de continuar superándome y la gran experiencia que obtuve en estos 2 años en la universidad más importante del país y de Latinoamérica la UNAM.

A la M. I. Silva Martínez Ana Elisa por su dirección y apoyo durante la elaboración de este proyecto muchas gracias.

A CONACYT y el Sistema de Becas de Posgrados de Excelencia por el financiamiento que me otorgaron durante toda la maestría.

A mi jurado Dra. León Rodríguez Frida León (Presidente), M.C. Fuentes Gea Vicente (Secretario), M. I. Silva Martínez Ana Elisa (Vocal), Dra. Iturbe Argüelles Rosario (1er. Suplente) y M.I. Ramírez Camperos Mercedes Esperanza (2do. Suplente), por su tiempo y valiosa aportación a mi proyecto de tesis.

A mi papá Enrique Cordero y mi mamá Tere Rivera, que me enseñó siempre a ser responsable y perseverante, a mis hermanos Eduardo, Mariel y Carlos, por hacerme reír y apoyo.

A mis familiares de Puebla y de México que siempre estuvieron pendientes de mí y me apoyaron a cada momento.

A la Bióloga Livia Sánchez y el Sr. Miguel Chávez, que me apoyaron y aconsejaron siempre durante el trabajo de laboratorio para realizar este proyecto, a la Sra. Antonieta y el Sr. Rafael que siempre fueron muy amables y atentos conmigo.

A la Dra. Pilar Tello que siempre me animo a seguir, que me apoyo en los momentos más difíciles, y siempre me aconsejo de la mejor manera posible.

A mis hermanos los CENCHISTAS: Bere, David, Fer, Héctor, Jaime, Karen, Luz, Manuel, Mariana, Marisol, Martha, Miguel, Michi y Wicho, por estar siempre conmigo.

A mis nuevos amigos de la Maestría: Adrian, Auris, Beti, Diana, Iris, Flor, Thania, Magaly, Marcos, Moni y Judith por que sin su compañía nunca hubiera sido lo mismo.

A mis amigas de Puebla: Anita, Judith, Maribel, May, Naye, Roció y Yojana por siempre su apoyo y su motivación a terminar este proyecto.

Y a todas las personas que directa o indirectamente estuvieron involucrados.

Y a ti por leer esta tesis.

**MIL GRACIAS.**

# ÍNDICE

TABLAS .....	viii
FIGURAS .....	ix
ECUACIONES.....	ix
ABREVIATURAS.....	xi
RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
1.3 ALCANCES y LIMITACIONES.....	5
2. MANEJO DE LOS LODOS .....	7
2.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE DESECHO DE LAS PTAR .....	7
2.1.1 Metales presentes en los lodos.....	9
2.1.2 Patógenos presentes en los lodos.....	10
2.2 ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES .....	11
2.2.1 Digestión aerobia .....	12
2.2.2 Estabilización con cal.....	15
2.2.3 Tratamiento térmico .....	17
3. PROBLEMA DE LOS SUELOS DEFORESTADOS EN MÉXICO .....	19
3.1 INDICADORES FORESTALES .....	21
3.1.1 Superficies Forestales.....	21
3.2 LOS PROGRAMAS DE REFORESTACIÓN NO HAN DADO RESULTADO .....	22
4. APLICACIÓN DE BIOSÓLIDO COMO MEJORADORES DE SUELOS.....	24
4.1 PRINCIPALES PROPIEDADES QUE SE MEJORAN CON LOS BIOSÓLIDOS .....	33
4.1.1 Permeabilidad y Conductividad Hidráulica .....	33
4.1.2 Capacidad de Intercambio Catiónico .....	34
4.1.3 Contenido de Agua.....	34
4.1.4 pH .....	35
4.1.5 Contenido de Materia Orgánica.....	35
4.1.6 Fósforo Total .....	36
4.1.7 Nitrógeno Inorgánico .....	37

5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
5.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS.....	39
5.2	ESTABILIZACIÓN DEL LODO .....	39
5.2.1	Proceso Experimental de Digestión Aerobia de Lodos .....	39
5.2.2	Estabilización con cal.....	40
5.2.3	Aumento de temperatura .....	40
5.3	APLICACIÓN DE LODO EN EL SUELO.....	40
5.4	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO .....	40
5.5	DISEÑO DE EXPERIMENTO .....	41
5.6	DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL .....	41
5.5	PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.....	42
5.6	PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CALIDAD .....	42
5.7	DURACIÓN DEL EXPERIMENTO .....	42
5.8	TÉCNICAS PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS .....	42
5.9	DESARROLLO VEGETAL.....	43
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
6.1	TRATAMIENTO DE LOS LODOS. ....	44
6.2	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.....	46
6.2.1	Propiedades Físicas .....	46
6.2.2	Propiedades Químicas.....	54
6.3	CONDENSADO DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO .....	57
6.4	CRECIMIENTO DE CEDRO BLANCO (Cupressus Lindley).....	60
6.4.1	Alturas .....	60
6.4.2	Ramas .....	62
6.4.3	Nuevos brotes .....	64
6.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LOS SUJETOS EXPERIMENTALES.....	66
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
7.1	CONCLUSIONES .....	68
7.2	RECOMENDACIONES .....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXO A.....	76
	PROPIEDADES FÍSICAS.....	76

1. Estructura .....	76
2. Porosidad.....	79
3. Permeabilidad y conductividad hidráulica .....	82
4. Contenido de Agua.....	89
PROPIEDADES QUIMICAS .....	90
1. Determinación de pH .....	90
2. Contenido de materia orgánica.....	91
3. Fósforo Total .....	94
4. Nitrógeno Inorgánico .....	96
ANEXO B .....	98
1. Calendario de Actividades del Reactor .....	98
2. Calendario de Actividades de Aplicación de Tratamientos.....	99
ANEXO C.....	101
Resultados en Suelo .....	101
TEXTURA.....	101
POROSIDAD .....	102
DENSIDAD APARENTE.....	102
DENSIDAD REAL.....	103
PERMEABILIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA .....	104
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y SALES .....	104
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO .....	105
PORCENTAJE DE CONTENIDO DE AGUA.....	107
PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA.....	108
PORCENTAJE DE FÓSFORO .....	109
PORCENTAJE DE NITRÓGENO INORGÁNICO .....	110

# TABLAS

<i>Tabla 2-1 Metales de importancia en las aguas residuales y biosólidos</i> .....	9
<i>Tabla 2-2 Principales grupos de organismos patógenos y parásitos contenidos en los lodos residuales</i> .....	11
<i>Tabla 2-3 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos</i> .....	11
<i>Tabla 2-4 Cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> necesaria para mantener el pH por encima de 12 durante 30 minutos</i> .....	17
<i>Tabla 4-1 Condensado de artículos</i> .....	25
<i>Tabla 4-2 Aprovechamiento de biosólidos</i> .....	33
<i>Tabla 5-1 Diseño de experimento</i> .....	41
<i>Tabla 5-2 Técnicas para determinar parámetros</i> .....	42
<i>Tabla 6-1 Datos de lodos obtenido en el digestor aerobio</i> .....	44
<i>Tabla 6-2 Contenido de N y P en el lodo estabilizado</i> .....	45
<i>Tabla 6-3 Datos de biosólidos 1 y 2</i> .....	45
<i>Tabla 6-4 Metales pesados en el biosólido</i> .....	46
<i>Tabla 6-5 Textura en suelo</i> .....	47
<i>Tabla 6-6 Porcentaje de porosidad</i> .....	48
<i>Tabla 6-7 Resultados de densidad aparente</i> .....	48
<i>Tabla 6-8 Resultados de densidad real</i> .....	49
<i>Tabla 6-9 Resultados de la conductividad hidráulica, velocidad de infiltración y caudal</i> .....	49
<i>Tabla 6-10 Resultados de conductividad eléctrica</i> .....	50
<i>Tabla 6-11 Resultados de salinidad (NaCl)</i> .....	51
<i>Tabla 6-12 Resultados de salinidad (KCl)</i> .....	52
<i>Tabla 6-13 Resultados de la CIC</i> .....	52
<i>Tabla 6-14 Resultados de Ca, Mg y K</i> .....	52
<i>Tabla 6-15 Resultados de porcentaje de humedad</i> .....	53
<i>Tabla 6-16 Resultados de pH</i> .....	54
<i>Tabla 6-17 Resultados de porcentaje de MO</i> .....	55
<i>Tabla 6-18 Resultados del porcentaje de fósforo</i> .....	56
<i>Tabla 6-19 Resultados del PPM de nitrógeno</i> .....	56
<i>Tabla 6-20 Resultados físicos y químicos del suelo</i> .....	59
<i>Tabla 6-21 Resultados de altura</i> .....	60
<i>Tabla 6-22 Resultados de número de ramas</i> .....	63
<i>Tabla 6-23 Resultados de brotes</i> .....	65
<i>Tabla A-1 Límites de porosidad</i> .....	80
<i>Tabla A-2 Interpretación de resultados de densidad aparente</i> .....	81
<i>Tabla A-3 Coeficientes de permeabilidad</i> .....	82
<i>Tabla A-4 Criterios para evaluar la salinidad de un suelo, con base en su conductividad</i> .....	85
<i>Tabla A-5 Textura de suelo y CIC</i> .....	86
<i>Tabla A-6 Tipo de arcilla &amp; CIC</i> .....	88
<i>Tabla A-7 Interpretación de CIC</i> .....	88
<i>Tabla A-8 Niveles de Ca, Mg y K</i> .....	89
<i>Tabla A-9 Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH</i> .....	91
<i>Tabla A-10 Porcentajes de flora y fauna en suelo</i> .....	93
<i>Tabla A-11 Interpretación del contenido de materia orgánica en suelo</i> .....	94
<i>Tabla A-12 Criterios para determinar el fósforo</i> .....	96
<i>Tabla A-13 Interpretación de Resultados de Nitrógeno</i> .....	97

## FIGURAS

Figura 2-1 Reducción de sólidos volátiles – temperatura X edad de lodo. (WEF, 1995).....	15
Figura 4-1 Diagrama de flujo del biosólido.....	32
Figura 4-2 Ciclo del fósforo en el suelo.....	36
Figura 4-3 Ciclo del nitrógeno en el suelo.....	38
Figura 5-1 Reactor aerobio.....	39
Figura 6-1 Terrón de blanco.....	51
Figura 6-2 Terrón de biosólido 1.....	51
Figura 6-3 Terrón de biosólido 2.....	51
Figura 6-4 Flor presente en plantas invasoras.....	53
Figura 6-5 Plantas presentes en biosólido 1.....	53
Figura 6-6 Crecimiento de los cedros del día cero al día 270.....	54
Figura 6-7 Gráfica de alturas.....	61
Figura 6-8 Altura del cedro blanco.....	62
Figura 6-9 Gráfica de número de ramas.....	64
Figura 6-10 Gráfica de número de brotes.....	66
Figura A-1 Triángulo de textura del sistema de clasificación de la USDA.....	78

## ECUACIONES

Ecuación 2-1 Digestión aerobia.....	12
Ecuación 2-2 Tiempo de retención hidráulico.....	13
Ecuación 2-3 Sólidos volátiles biodegradables.....	13
Ecuación A-1 Porcentaje de Arena.....	77
Ecuación A-2 Porcentaje de Arcilla.....	78
Ecuación A-3 Porcentaje de Limo.....	78
Ecuación A-4 Porosidad.....	79
Ecuación A-5 Porosidad por medio de densidades.....	79
Ecuación A-6 Volumen de agua desplazada por el terrón.....	80
Ecuación A-7 Peso de la parafina (Pp).....	80
Ecuación A-8 Volumen de la parafina (Vp).....	80
Ecuación A-9 Densidad aparente.....	81
Ecuación A-10 Peso de las partículas del suelo (ps).....	81
Ecuación A-11 Volumen de las partículas del suelo (VS).....	81
Ecuación A-12 Densidad real.....	82
Ecuación A-13 Ecuación de Darcy.....	83
Ecuación A-14 Equivalencia de ms/m a $\mu$ mhos/cm.....	84
Ecuación A-15 Salinidad.....	85
Ecuación A-16 Capacidad de intercambio catiónico.....	86
Ecuación A-17 Determinación de F.....	87
Ecuación A-18 Determinación de Ca.....	87
Ecuación A-19 Determinación de Mg.....	87
Ecuación A-20 Determinación de Na.....	87
Ecuación A-21 Determinación de K.....	87

<i>Ecuación A-22 Porcentaje de contenido de agua.....</i>	<i>90</i>
<i>Ecuación A-23 Porcentaje de materia orgánica.....</i>	<i>93</i>
<i>Ecuación A-24 Factor derivado para materia orgánica.....</i>	<i>94</i>
<i>Ecuación A-25 Determinación de P.....</i>	<i>95</i>
<i>Ecuación A-26 Determinación de N.....</i>	<i>97</i>

## **ABREVIATURAS**

**CIC:** Capacidad de intercambio catiónico.

**cmol:** Centímol

**DBO:** Demanda biológica de oxígeno.

**EPA:** Environmental Protection Agency (Agencia de Protección al Ambiente)

**FAO:** Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).

**g:** gramo.

**hr:** Hora.

**Kg:** Kilogramo.

**L:** Litro.

**mg:** Miligramo.

**min:** Minuto.

**ml:** Mililitro.

**m:** Metro.

**MO:** Materia orgánica.

**N:** Normalidad.

**NOM:** Norma oficial mexicana.

**OD:** Oxígeno disuelto.

**PTAR:** Planta de tratamiento de aguas residuales.

**ppm:** Partes por millón

**Q:** Caudal.

**RAS:** Relación de absorción de sodio.

**REC NAT:** Recursos Naturales.

**RPM:** Revoluciones por minuto.

**SEMARNAT:** Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**ST:** Sólidos totales.

**STT:** Sólidos totales totales

**SVT:** sólidos volátiles totales

**UFC:** Unidad formadora de colonias

**USDA:** United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de Estados Unidos)

**VF:** Velocidad de infiltración

**WEF:** Water Environment Federation (Federación Ambiental del Agua)

## RESUMEN

En este trabajo se demuestra que los lodos obtenidos en el tanque de recirculación de lodos activados en la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, pueden ser sometidos a una estabilización por medio de una digestión aerobia, una estabilización alcalina y un tratamiento térmico, para obtener un biosólido capaz de ser utilizado como fertilizante en suelos degradados y ser capaz de sostén vida vegetal y animal.

Durante un periodo de doce meses se trabajó estabilizando lodos por medio de dos técnicas que dieron como resultado dos biosólidos, a los cuales se les determinó su contenido de patógenos (coliformes fecales, salmonella spp y huevos de helminto) y de metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc) para asegurar que estuvieran dentro de los límites establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002, antes de ser aplicados como abono y regenerar suelo degradado.

La aplicación de los biosólidos 1 y 2 se realizó en un período de siete meses en dos tinajas que fueron acondicionadas para tal propósito, además de ser regadas con agua y una tercera tina la cual sirvió como blanco a la cual solo se le hizo riego y no se le dio ningún otro tratamiento. En éstas se sembró una especie de cedro blanco (*Cupressus lindley*) el cual sirvió como indicador para ver la aceptación de esta especie a los tratamientos de fertilización.

Durante los siete meses de trabajo se tomaron los valores de altura, número de ramas y número de brotes para poder medir el desarrollo mensual de los cedros blancos y su respuesta a los biosólidos como fertilizantes.

Al finalizar este tiempo se realizaron las determinaciones en suelo de sus propiedades físicas (estructura, porosidad, permeabilidad, conductividad y contenido de agua) y sus propiedades químicas (pH, contenido de materia orgánica, fósforo total y nitrógeno inorgánico), y con estos parámetros se concluyó la efectividad del biosólido como abono y se determinó que técnica de estabilización tiene mejores resultados durante el trabajo.

Las conclusiones a las que se llegó fue que el biosólido 2 es el más efectivo, dando una respuesta favorable la aplicación en suelo y un mayor crecimiento en el cedro blanco, como también se observaron otras propiedades resultado de su aplicación como el ser repelente de plagas y disminuir el crecimiento de plantas invasoras en el suelo, que solo compiten por los nutrientes necesarios para el desarrollo de los cedros blancos.

## **ABSTRACT**

This paper shows that the sludge obtained in the recirculation tank activated sludge treatment plant in Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autonomy de Mexico, can be subjected to a stabilization through aerobic digestion, alkaline stabilization heat treatment for a bio solids can be used as fertilizer on soil chemical and be able to support plant and animal life.

During a period of twelve months, worked to stabilize sludge by means of two techniques that resulted in two bio solids, to which content was determined pathogens (fecal coliform, salmonella spp and helminth eggs) and heavy metals (arsenic, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel and zinc) to ensure that they are within the limits established by the NOM-004-SEMARNAT-2002, before being applied as fertilizer and regenerate degraded soil.

The application of bio solids 1 and 2 was performed over a period of seven months in two tubs that were adapted for this purpose, besides being irrigated with water and a third bath which served as a target to which only made him and irrigation not given any other treatment. These were planted in a kind of white cedar (*Cupressus lindley*) which served as an indicator for the acceptance of this species to fertilization treatments.

During the seven months of work were taken the values of height, number of branches and number of outbreaks in order to measure the monthly development of white cedar and its response to bio solids as fertilizer.

At the end of this time were determined in soil physical properties (structure, porosity, permeability, conductivity and water content) and chemical properties (pH, organic matter, total phosphorus and inorganic nitrogen), and these parameters concluded the effectiveness of bio solids as fertilizer and found that stabilization technique has better results at work.

The conclusion reached was that the biosolid 2 is the most effective, giving a favorable response of soil application and further growth in the white cedar, and other properties were also observed in applying it as being pest repeller and slow the growth of invasive plants on the ground that only compete for the nutrients needed for the development of white cedar.

# 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se desarrolló como trabajo de tesis para cumplir con el Programa de Maestría en Ingeniería Ambiental de la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El trabajo se enmarca dentro del campo disciplinario de control de la contaminación del suelo, en él se hizo un seguimiento a la formación de biosólidos, provenientes de los lodos de desecho de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de la Ciudad Universitaria y su capacidad de regenerar el suelo degradado. La importancia de realizar este trabajo está basada en su aplicación del rescate de las zonas boscosas del país, dentro de los programas de reforestación.

En México se tienen registradas hasta el año 2007, un número de 1 710 plantas en operación en el país que trataron  $79.3 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas municipales (negras), es decir el 38.3% de los  $207 \text{ m}^3/\text{s}$ , recolectados en los sistemas de alcantarillado. La mayoría de estas plantas no cuentan con un sistema de tratamiento de lodos. En México existen 417 plantas que usan lodos activados que equivale al 44.32% del total de las plantas de tratamiento en México, estas tratan  $35.14 \text{ m}^3/\text{seg}$ , y llegan a producir  $874.36 \text{ Ton}/\text{día}$  de lodo seco en México solo con este tipo de tratamiento. Esto quiere decir que se genera una gran cantidad de lodos de estas instalaciones, a los cuales no se les está dando un uso o disposición adecuada. (CONAGUA, 2008) (Crites & Tchobanoglous, 2000) (Metcalf & Eddy, 2003).

En la mayoría de los procesos de tratamiento primario, así como secundario, en las PTARM, se producen lodos. Los procedentes del tratamiento primario consisten en partículas sólidas, de mayor densidad. Los lodos del tratamiento secundario son fundamentalmente biomasa en exceso producida en los procesos biológicos. De los subproductos removidos en las PTARM, los lodos son, por mucho, los de mayor volumen, su procesamiento y disposición es quizá el problema más complejo a afrontar, porque una fracción importante de las sustancias contaminantes que se separan se encuentran finalmente en estos lodos.

Existe una diferencia técnica entre los términos “lodos residuales” y “biosólidos”. Como las aguas residuales municipales son tratadas física y biológicamente, los compuestos orgánicos e inorgánicos son removidos. El subproducto formado a través de estos procesos es llamado “lodo residual”, y puede estar constituido por materia orgánica, nutrientes, minerales disueltos, patógenos y contaminantes tóxicos. A los lodos residuales que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles

de aprovechamiento sin afectación a la salud ni toxicidad al ambiente, se les llama “biosólidos” (NOM-004-SEMARNAT, 2002).

Una de las formas en que se han utilizado los Biosólidos, es la aplicación en terrenos en donde la fauna microbiana los descompone gradualmente hasta su mineralización completa. Los tipos de terrenos en los que se aplican pueden ubicarse dentro de cuatro grupos: terrenos agrícolas, terrenos forestales, terrenos con suelos degradados o erosionados y los rellenos sanitarios destinados a recibir lodos de desecho.

En los biosólidos se encuentran elementos como Nitrógeno, Fósforo y Potasio, además de micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como Zinc, Hierro y Magnesio. Los valores de macronutrientes en los biosólidos encontrados comúnmente son, para el N entre 2.4 y 5.0 % de ST, para el P (como  $P_2O_5$ ) entre 2.8 y 11.0 % de ST y para el K (como  $K_2O$ ) entre 0.5 y 0.7 % de ST (Metcalf & Eddy, 2003).

Los biosólidos son ricos en materia orgánica que puede mejorar la calidad del suelo, aumentando la capacidad de retención de agua; también acondicionan su estructura para un mejor transporte del aire y del agua a través de él. Finalmente el uso apropiado de los biosólidos puede disminuir la erosión del suelo (Sullivan, 1998) (Krogmann U., 1997) (Switzenbaum, 1997).

En las áreas urbanas y suburbanas los suelos sufren fuertes procesos de degradación y en muchos casos de destrucción. Los perfiles edáficos son sometidos a procesos de extracción de horizontes, mezclas muy drásticas, ingreso de materiales foráneos o simplemente procesos de enterramiento. Este tipo de problemas y otros semejantes, han contribuido a desarrollar en los últimos años tecnologías adecuadas para reconstruir los medios edáficos alterados (Adriano, *et al*, 1999). Uno de los principales objetivos de la reconstrucción de suelos es la reinstalación del estrato superficial (horizonte A) y, casi simultáneamente, la implantación de una vegetación en equilibrio con las condiciones ambientales.

El presente trabajo simula las condiciones que se dan en un suelo que presenta la exposición de los horizontes A y B, y son tratados con una aplicación de biosólidos como abono. Observando que se regeneren las características del mismo para poder sostener cubierta vegetal.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, mediante la aplicación de lodos estabilizados de aguas residuales de origen urbano (“biosólidos”), cuantificando los cambios en las características del suelo y su efecto en el desarrollo del cedro blanco (*Cupressus lindleyi*)

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estabilizar los lodos provenientes de la PTAR de CU de la UNAM por medio de dos tratamientos para obtener el biosólido 1 y 2.
- Caracterizar los biosólidos obtenidos.
- Revisar y comparar según la normatividad establecida por la SEMARNAT, los resultados obtenidos a partir de la caracterización, estableciendo la calidad del biosólido obtenido y que restricciones puede llegar a tener.
- Evaluar los cambios en las propiedades fisicoquímicas de un suelo por la aplicación de biosólidos, cuantificando los cambios en las características de permeabilidad, capacidad de intercambio catiónico, humedad, materia orgánica, salinidad, pH, nitrógeno y fósforo presentes en el suelo, así como el desarrollo del cedro blanco (*Cupressus lindleyi*) especie vegetal seleccionada como indicador.
- Determinar los cambios en el crecimiento y desarrollo en los cedros blancos (*Cupressus lindleyi*), asociados a la aplicación de biosólidos.

## **1.3 ALCANCES y LIMITACIONES**

Para realizar la parte experimental se utilizaron tinas acondicionadas de 0.85 m de largo, 0.55 m de ancho y 0.68 m de profundidad; con suelo del horizonte A obtenido de la zona de CU de la UNAM, para poder simular las condiciones de suelos forestales degradados.

Se emplearon lodos de recirculación de la planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activado de CU de la UNAM, que fue estabilizado por medio de digestión aerobia, estabilización con cal y un aumento en la temperatura para formar biosólidos, y emplearlo en el mejoramiento del suelo.

Se utilizó como indicador biótico el cedro blanco (*Cupressus lindleyi*), originario del vivero de FLOR DEL BOSQUE, administrado y dirigido por la SEMARNAT en Puebla, ubicado en Carretera Federal No. 150 Puebla-Tehuacán a la altura del kilómetro 10.5 al oriente de la Ciudad de Puebla, pertenece al Municipio de Amozoc y que suministra árboles de reforestación en la zona de los volcanes Iztlacíhuatl y Popocatépetl.

Se tuvo un periodo de siete meses para determinar la asimilación de nutrientes contenidos en el biosólido como abono, la adaptación de los cedros blancos (*Cupressus lindleyi*) y otras formas vegetales que se presentaron.

Las condiciones climáticas, corresponden a las estaciones de invierno-primavera 2010, específicamente de CU de la UNAM en la Ciudad de México.

No se formaron lixiviados porque se regó a niveles inferiores de la capacidad de campo del suelo experimental.

Se determinaron macro nutrientes (N, P y K), micro nutrientes (Ca, Mg) y Na, materia orgánica, humedad, salinidad, estructura del suelo y crecimiento vegetal, obtenidos después del periodo de experimentación.

## **2. MANEJO DE LOS LODOS**

En las aguas residuales los constituyentes eliminados de las plantas de tratamiento incluyen residuos sólidos, arena, espumas y lodos. La generación de lodo depende de las operaciones y procesos de tratamiento, al salir los lodos suelen ser líquidos o semisólidos; el contenido de sólidos varía entre el 0.25 y el 12 % en peso. El tratamiento de los lodos es, por mucho, el de mayor volumen; su evaluación y solución es, quizás, el problema más complejo al que se enfrenta el ingeniero ambiental. (Metcalf & Eddy, 2003) (Ramalho, 1991)

Los problemas derivados del manejo de los lodos son:

- Que está formado, principalmente, por la materia orgánica, que también está sujeta a procesos de descomposición que la pueden hacer indeseable, como también por las sustancias responsables que ocasionan el no poder reutilizar las aguas residuales no tratadas.
- Sólo una pequeña parte del lodo está compuesta por materia sólida, que se divide en sólidos suspendidos (patógenos, materia orgánica coloidal, arenas y arcillas) y sólidos disueltos (DBO soluble, sales y iones), el resto está constituido por agua.

El elevado contenido de materia orgánica presente, tanto en lodos primarios como secundarios, hace que sean materiales putrescibles; por otro lado, su alto contenido de agua (entre el 70 y el 94 %) los hace voluminosos y pesados. El tratamiento de los lodos está enfocado a reducir en lo posible estas características, transformándolos en materiales biológicamente estables, con volúmenes menores al que tenían al salir de la sedimentación, y con menor masa al reducirse el contenido de agua y la masa de microorganismos.

De esta manera se facilita su manejo, ya sea para su uso como mejorador de suelo, como combustible, u otros usos alternos, o bien para su disposición final en rellenos sanitarios u otro tipo de confinamiento.

Los principales objetivos en el tratamiento de los lodos son: 1) disminución de olores ofensivos; 2) reducción del volumen de agua, 3) reducción de la masa de sólidos para facilitar su manejo; y 4) reducción del número de microorganismos patógenos. (Ramalho, 1991).

### ***2.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE DESECHO DE LAS PTAR***

Una PTARM es una instalación en la que mediante una serie de procesos físicos, fisicoquímicos y/o biológicos, los contaminantes suspendidos y disueltos se

separan de la mezcla, produciendo finalmente un efluente limpio por un lado (dentro de los límites permisibles de la tecnología utilizada y la normatividad), y un lodo de desecho que puede estar en estado líquido o sólido (después de ser secado) que contiene tanto los materiales suspendidos (patógenos, materia orgánica coloidal, arena, arcilla) y disueltos (DBO soluble, sales y iones), difíciles de eliminar que generalmente permanecen, como los que se hayan agregado durante el proceso (o los productos resultantes de las reacciones efectuadas).

El influente es el término que se refiere al agua residual que ingresa a la PTARM para su limpieza. El efluente es el agua que sale de la PTARM y que contiene una cantidad mucho menor de contaminantes que la inicial, conforme a lo que indica la normatividad, 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 de lavado en los procesos de sedimentación y filtración durante el tratamiento de aguas residuales municipales. Este material se compone por sólidos sedimentables suspendidos en aguas en el primer caso, y por sólidos suspendidos más ligeros retenidos por el lecho filtrante en el segundo caso. En las PTARM se generan 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 han salido del reactor biológico.

El lodo primario está 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 reactor biológico y que se separa en la sedimentación secundaria, también se le conoce como lodo activado.

Los lodos primarios contienen entre 30 % y 50 % de la DBO influente total; de la que es removida en el reactor biológico, dos terceras partes las emplean 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 lodos. (Ramalho, 1991)

Los lodos al no tener una estabilización o tratamiento adecuado son fuente de diseminación de patógenos y sustancias tóxicas, que ocasionan contaminación al ambiente y riesgo a la salud del hombre, es importante tener un control sobre estos parámetros para poder tener una mejor disposición final.

### 2.1.1 Metales presentes en los lodos

Los metales, como el cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pd), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni) y zinc (Zn) son componentes importantes de la mayoría de las aguas y los lodos. Muchos de estos metales también se clasifican como contaminantes prioritarios. Sin embargo, la mayoría de estos metales son necesarios para el crecimiento de la vida biológica, y la ausencia de cantidades suficientes de ellos podría limitar el crecimiento de algas, por ejemplo. Pero la presencia de cualquiera de estos metales en cantidades excesivas puede ser tóxica, por lo que con frecuencia es conveniente medir y controlar las concentraciones de estas sustancias.

Los metales de importancia en el tratamiento, reutilización y disposición de efluentes y biosólidos se resumen en la tabla 2-1.

Tabla 2-1 Metales de importancia en las aguas residuales y biosólidos

Metal	Símbolo	Nutrientes necesarios para el crecimiento biológico		Umbral de concentración de efecto inhibitor sobre los organismos heterótrofos (mg / L)	Se utiliza para determinar el RAS para la aplicación al suelo de los efluentes	Se utiliza para determinar si los biosólidos son convenientes para el uso de la tierra
		Macro	Micro <sup>b</sup>			
Arsénico	As			0.05		✓
Cadmio	Cd			1.0		✓
Calcio	Ca	✓			✓	
Cromo	Cr		✓	10 <sup>c</sup> , 1 <sup>d</sup>		
Cobalto	Co		✓			
Cobre	Cu		✓	1.0		✓
Hierro	Fe	✓				
Magnesio	Mg	✓	✓			
Manganeso	Mn		✓		✓	
Mercurio	Hg			0.1		✓
Molibdeno	Mo		✓			✓
Níquel	Ni		✓	1.0		✓
Plomo	Pb		✓	0.1		✓
Potasio	K	✓				
Selenio	Se		✓			✓
Sodio	Na	✓			✓	
Tungsteno	W		✓			
Vanadio	V		✓			
Zinc	Zn		✓	1.0		✓

<sup>a</sup> (Metcalf & Eddy, 2003)

<sup>b</sup> A menudo identificado como oligoelementos necesarios para el crecimiento biológico.

<sup>c</sup> Cromo total

<sup>d</sup> Cromo hexavalente

A medida que más se hace uso de efluente de aguas residuales tratadas para el riego y biosólidos como abono, la variedad de metales debe ser determinada para evaluar los efectos adversos que pueden ocurrir. El calcio, el magnesio y el sodio son de importancia en la determinación de la relación de absorción de sodio (RAS), que es usada para evaluar la calidad de las aguas residuales tratadas para uso en riego. La contaminación de metales en los lodos o biosólidos que se apliquen al suelo deben controlarse para evitar la contaminación y la bioacumulación.

En la tabla 2-2 se presentan los límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos después de su estabilización, y se pueden clasificar en excelentes y buenos según se ve en la tabla.

**Tabla 2-2 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos**

<b>CONTAMINANTE (determinados en forma total)</b>	<b>EXCELENTES mg/kg en base seca</b>	<b>BUENOS mg/kg en base seca</b>
<b>Arsénico</b>	41	75
<b>Cadmio</b>	39	85
<b>Cromo</b>	1 200	3 000
<b>Cobre</b>	1 500	4 300
<b>Plomo</b>	300	840
<b>Mercurio</b>	17	57
<b>Níquel</b>	420	420
<b>Zinc</b>	2 800	7 500

(NOM-004-SEMARNAT, 2002)

### **2.1.2 Patógenos presentes en los lodos**

Se ha demostrado que los patógenos que son removidos de las aguas residuales, se concentran en su mayoría en los lodos residuales, por lo que el lodo debe ser estabilizado apropiadamente hasta lograr una reducción razonable en la densidad de patógenos y considerarlo como un producto con un riesgo mínimo para la salud humana y su aplicación en suelo. (Metcalf & Eddy, 2003)

(Dickerson, 2004), señala la potencialidad de los lodos residuales como abonos orgánicos, debido a la gran carga de organismos patógenos y parásitos para el hombre. Algunos de los organismos patógenos y parásitos que se encuentran presentes en los lodos residuales se mencionan en la tabla 2-3. (N.Flores, 2001). En la tabla 2-4 se muestran los límites máximos permisibles de patógenos para los biosólidos en la norma.

Tabla 2-2 Principales grupos de organismos patógenos y parásitos contenidos en los lodos residuales

GRUPO	AGENTES	EFECTO EN LA SALUD
<b>Bacterias</b>	<i>Salmonella Typhi</i> <i>Salmonella paratyphi A y B</i> <i>Shigella sp</i> <i>Vibrio cholerae</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Salmonella sp.</i>	Fiebre tifoidea, paratifoidea Disentería bacilar Cólera Gastroenteritis agudas diarreas Diarreicas
<b>Virus</b>	<i>Virus hepatitis A y E</i> <i>Virus de la Polio</i> <i>Virus de Norwalk</i> <i>Rotavirus</i> <i>Enterovirus</i> <i>Adenovirus</i>	Hepatitis Poliomelitis Gastroenteritis aguda y crónica Meningitis Enteritis Infecciones respiratorias
<b>Protozoa</b>	<i>Entamoeba histolytica</i> <i>Giardia lamblia intestinales</i>	Disentería amebiana Gastroenteritis.
<b>Helmintos</b>	<i>Taenia saginata</i> <i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Tricheuris trichiuria</i> <i>Toxocara spp</i>	Cisticercosis Ascariasis Tricocefalosis o tricuriasis Toxoplasmosis

Tabla 2-3 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
<b>A</b>	Menores de 1000	Menor a 3	Menor de 1 (a)
<b>B</b>	Menores de 1000	Menor a 3	Menor de 10
<b>C</b>	Menores de 2000 000	Menor a 300	Menor de 35

(a) Huevos de Helmintos viables  
(NOM-004-SEMARNAT, 2002)

La reducción en el número de patógenos puede lograrse tecnológicamente con un tratamiento adecuado previo a su uso o disposición final. La digestión aerobia, la estabilización alcalina y el aumento de temperatura son una serie de procesos usados para la estabilización del lodo donde los patógenos disminuyen.

## 2.2 ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES

La normatividad define estabilización como los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final y así evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente. (NOM-004-SEMARNAT, 2002)

La estabilización de lodo se lleva a cabo principalmente para: reducir la presencia de patógenos, eliminar los olores desagradables y reducir o eliminar su potencial de putrefacción. La supervivencia de microorganismos patógenos y la proliferación de olores en el lodo se producen cuando se permite que los microorganismos se desarrollen sobre la fracción del mismo.

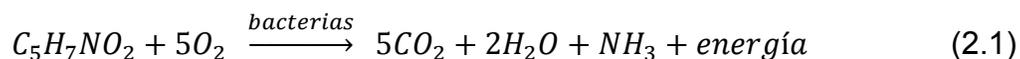
Los medios de estabilización más eficaces para eliminar el desarrollo de estas condiciones son: la reducción biológica del contenido de materia volátil; la oxidación química de la materia volátil; la adición de agentes químicos para hacer el lodo inadecuado para la supervivencia de microorganismos y la aplicación de calor con el objetivo de desinfectar o esterilizar el lodo.

Las técnicas de estabilización de lodos más recurridas son: la digestión aerobia, la digestión anaerobia, la estabilización con cal, el tratamiento térmico y el compostaje. (Ramalho, 1991) A continuación se analiza las técnicas utilizadas en este trabajo, la digestión aerobia, la estabilización con cal y el tratamiento térmico.

### **2.2.1 Digestión aerobia**

Consiste en la degradación biológica de la materia orgánica presente en el lodo residual gracias a la actividad microbiológica en condiciones aerobias. Los lodos en el reactor deben mantenerse en concentraciones cercanas a 25 g/l y la reducción de la materia volátil debe ser como mínimo del 40%. (Miliarium Aureum, 2004)

La digestión aerobia es similar al proceso de lodos activados. Conforme se agota el suministro de sustrato disponible (alimento), los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma (respiración endógena) para obtener la energía necesaria para las reacciones de mantenimiento celular.



El tejido celular se oxida a dióxido de carbono, amoníaco y agua por vía aerobia. En la práctica sólo se puede oxidar entre el 75 y 80% del tejido celular, puesto que el resto está formado por componentes inertes y compuestos orgánicos no biodegradables.

#### 2.2.1.1 Factores que influyen en el proceso

##### A) Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Es el tiempo promedio que tarda un fluido en pasar un volumen determinado, es uno de los parámetros más importantes en todo sistema de tratamiento de aguas residuales. En el caso de lodos, donde la presencia de sólidos en suspensión es

considerable, existe un tiempo de retención óptimo que permite una máxima remoción de sólidos y materia orgánica expresada como DQO. Se calcula según la fórmula 2.2

$$T(\text{días}) = \frac{\text{volumen reactor (m}^3\text{)}}{\text{caudal de entrada (}\frac{\text{m}^3}{\text{d a}}\text{)}} \quad (2.2)$$

Las recomendaciones en este sentido establecen tiempos de retención hidráulico iguales o mayores a 15 días para lodos mixtos a temperaturas superiores a 15 ° C y para lodos activos más de 12 días. La carga de sólidos volátiles por m<sup>3</sup> de digester se denomina carga de trabajo y según aumenta ésta, disminuye la reducción de sólidos volátiles. Se observan mejores resultados con cargas iguales o inferiores a 3 kg de sólidos volátiles por m<sup>3</sup> de digester para lodos mixtos y de 2 kg de sólidos volátiles por m<sup>3</sup> de digester para lodos activos. (Metcalf & Eddy, 2003) (Ramalho, 1991)

En este tipo de digestión hay que tener en cuenta la cantidad de oxígeno necesaria para suministrar al digester, ya que la cantidad de oxígeno consumido determina la cantidad de sólidos volátiles removidos. Se estima que se necesitan 2 kg de oxígeno por kg de materia volátil destruida más 1,8 kg de oxígeno por cada kg de DBO<sub>5</sub> del lodo primario. (Metcalf & Eddy, 2003)

#### 2.2.1.2 Relación tiempo de retención-reducción de volátiles

Una digestión aeróbica tiene como objetivo reducir lo más posible los sólidos disponibles. Esta reducción se llevará a cabo sólo con el contenido biodegradable de los lodos, si bien puede haber algo de destrucción de la material no orgánica también. La reducción de los sólidos volátiles del 35 % al 50 %, son alcanzables por la digestión aeróbica. Los criterios opcionales para satisfacer los requisitos de atracción de vectores de 40 CFR Parte 503, es un mínimo de reducción del 38 por ciento de sólidos volátiles durante el tratamiento de biosólidos o menos de una tasa específica de consumo de oxígeno del (1,5 mg O<sub>2</sub> / h) / g de sólidos totales de lodos a 20 ° C. (EPA530, 2009)

El cambio en los sólidos volátiles biodegradables en un digester de mezcla completa se puede representar por una reacción bioquímica de primer orden en condiciones de volumen constante.

$$\frac{dM}{dt} = -k_d M \quad (2.3)$$

Donde

$\frac{dM}{dt}$  = el rango de cambio en los sólidos volátiles biodegradables por unidad de tiempo ( $\Delta$  masa/tiempo),  $MT^{-1}$

$k_d$  = constante de velocidad de reacción,  $T^{-1}$

M = masa de sólidos volátiles biodegradables restantes en tiempo t en el digestor aeróbico, M

Dependiendo de cómo el digestor aeróbico esté operando, el tiempo t puede ser igual o mayor al tiempo teórico de residencia hidráulico (t). El uso de la porción biodegradable de los sólidos volátiles en la ecuación 2.3 reconoce que aproximadamente 20 a 35 por ciento de los lodos activados residuales de las plantas de tratamiento de aguas con tratamiento primario no es biodegradable. (WEF, 1998)

La constante de velocidad de reacción  $k_d$ , está en función del tipo de lodo, la temperatura y la concentración de sólidos. Los valores representativos de  $k_d$  pueden variar de  $0.05 d^{-1}$  a  $15^\circ C$  a  $0,14 d^{-1}$  a  $25^\circ C$  para los lodos residuales activados. Debido a que la velocidad de reacción está influenciada por varios factores, puede ser necesario para confirmar los valores del coeficiente de decaimiento realizar estudios a escala piloto o a nivel real. (Metcalf & Eddy, 2003)

La destrucción de los sólidos es principalmente una función directa de la temperatura del líquido como del tiempo de retención (a veces se refiere a la edad de lodos), como se indica en la figura 2-1. El trazo en la figura se refiere a la reducción de sólidos volátiles en función de la temperatura y de la edad del lodo ( $^\circ C$ -día). Inicialmente, con el aumento de la ordenada, la tasa de reducción de sólidos volátiles aumenta con rapidez. Para producir biosólidos bien estabilizados, se recomienda tener 550 grados-día para el sistema de digestión aerobia (WEF, 1995) (Metcalf & Eddy, 2003)

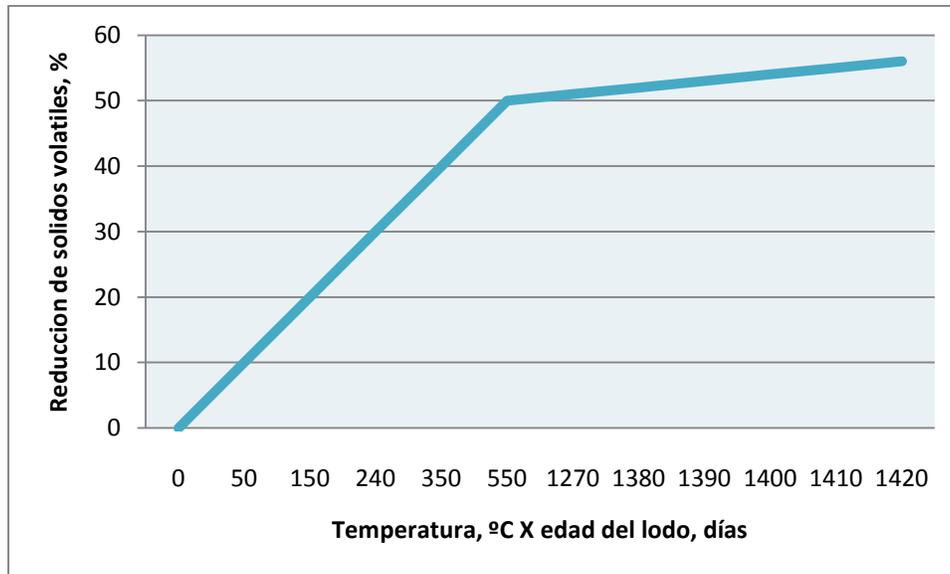


Figura 2-1 Reducción de sólidos volátiles – temperatura X edad de lodo. (WEF, 1995)

### 2.2.1.3 Temperatura

La mayoría de los digestores aeróbicos son tanques abiertos, las temperaturas del líquido dependen de las condiciones meteorológicas y pueden fluctuar ampliamente. Al igual que como todos los sistemas biológicos, las temperaturas más bajas retardan el proceso, mientras que las temperaturas más altas lo aceleran. El rendimiento en la reducción de los sólidos volátiles disminuye con las bajas temperaturas. Para minimizar estos efectos se puede aumentar la cantidad de sólidos, aumentando así también el tiempo de retención y mejorando el rendimiento del sistema. (Metcalf & Eddy, 2003)

### 2.2.1.4 Necesidades de oxígeno y de mezcla

La cantidad de oxígeno que se requiere suministrar se determina en función de los sólidos volátiles destruidos. Se estima que la transformación de la materia carbonatada a agua y amoníaco requiere 1,42 kg de oxígeno y la nitrificación necesita un aporte adicional de 0,56 kg de oxígeno, resultando un total de 2 kg de oxígeno por kg de materia volátil destruida. (Metcalf & Eddy, 2003)

### **2.2.2 Estabilización con cal**

La estabilización química de los lodos es una técnica muy usada y económica. El cloro y la cal son los principales reactivos estudiados para la estabilización, siendo el primero poco empleado en la práctica; en cambio, la cal es el álcali más barato, usado en el tratamiento del agua residual. La estabilización con cal tiene por objeto eliminar patógenos, reducir olores y reduce la cantidad de agua, aun cuando durante el proceso se incrementa el contenido de sólidos. También es

importante mencionar que este método no reduce el contenido de materia orgánica (sólidos volátiles), por lo que el término estabilización es relativo. Tradicionalmente la cal ha sido empleada para tratar lodos en instalaciones privadas pequeñas, acondicionar el lodo antes de su deshidratación, incrementar el pH en digestores con problemas y remover el fósforo en el tratamiento terciario.

Este tipo de estabilización se suele usar:

1. Como sistema complementario de estabilización, durante los periodos en que las instalaciones de otros sistemas (como la digestión o la incineración) están fuera de servicio.
2. Como sistema complementario a los procesos de digestión, cuando hay una cantidad de lodos mayor a la cantidad prevista en el diseño de las instalaciones.
3. En plantas de pequeño tamaño, donde una inversión y la consiguiente explotación de las instalaciones de otro sistema de estabilización no resulten rentables.

Al añadir cal a los lodos residuales, y mantener el pH a 12.4 por un mínimo de dos horas se disminuye la concentración de microorganismos patógenos, disminuye la humedad del lodo y elimina el mal olor propio de estos residuos. Una dosis común implica agregar de 226.8 a 272.16 kg de cal viva por tonelada de lodos, este proceso es tan efectivo como la digestión aeróbica y anaeróbica, pero a un costo mucho menor. Con este método en conjunto, con un tratamiento de digestión, se obtienen biosólidos tipo A y B, cuya utilización como acondicionador de suelos agrícolas está regulado y aceptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, de acuerdo al Código de Regulaciones Federales. (EPA530, 2009)

#### 2.2.2.1 Principios y criterios para la estabilización con cal

El principio es muy sencillo: el incremento del pH ocasiona la desnaturalización de proteínas y ácidos nucleicos que inactiva a los patógenos y además modifica las características físicas y químicas de los lodos. (Hernandez Fernandez, 1998)

El control de olor se produce como resultado de la inhibición de los procesos biológicos que generan subproductos de este tipo. De hecho, la elevación del pH provoca la desorción de algunos gases (a pH > 10.5 se libera amoníaco).

Los criterios por definir son el pH, tiempo de contacto y dosis de cal. La cantidad de cal debe ser suficiente para suministrar una alcalinidad residual y mantener un pH elevado por varios días. En general, se recomienda tener un pH de 12 durante mínimo 2 horas, y se requiere elevar el pH por arriba de 12 en los lodos para

lograrlo. No es necesario mantener los lodos las dos horas en el tanque de contacto siempre y cuando se monitore el pH. El decaimiento del pH ocurre por la disolución del CO<sub>2</sub> de la atmósfera generando un ácido débil (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) que en forma lenta consume la alcalinidad. Llegado cierto punto, la actividad biológica se reinicia y en caso de ocurrir reacciones anaerobias, la producción de ácidos orgánicos disminuirá aún más el pH.

La dosis de cal depende de varios factores como son: el tipo de lodo (primario, secundario, etc.), la composición química (contenido orgánico) tanto en el lodo como en el líquido y la concentración de sólidos (tabla 2-4). (Hernández Fernández, 1998)

Tabla 2-4 Cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> necesaria para mantener el pH por encima de 12 durante 30 minutos

Tipo de Lodo	Concentración de sólidos (%)		Dosis de cal, Kg Ca(OH) <sub>2</sub> /ton sólidos secos	
	Intervalo	Valor medio	Intervalo	Valor medio
Primario	3-6	4,3	60-170	120
Lodo activado	1-1,5	1,3	210-430	300
Mezcla digerida por vía aerobia	6-7	6,5	140-250	190
Líquido de fosas sépticas	1-4,5	2,7	90-510	200

(Hernández Fernández, 1998) (Miliarium Aureum, 2004)

El factor que más influye en la cantidad de reactivo es la concentración de sólidos. Generalmente, a medida que la cantidad de sólidos se incrementa, la dosis requerida aumenta aunque, al igual que para el tratamiento del agua, la dosis requerida por unidad de volumen es mayor conforme los lodos están más diluidos. Sin embargo, la dosis por unidad de masa de lodos es un valor relativamente constante. Por ello la cantidad usada en plantas de tratamiento es del mismo orden (0.5 a 4.5 % de la masa total del lodo producido para obtener un pH de 12).

### 2.2.3 Tratamiento térmico

El tratamiento con térmico consiste en la aplicación de calor para evaporar el agua y reducir el contenido de humedad de los biosólidos que se consigue por los métodos convencionales de deshidratación. Las ventajas del secado por calor incluyen la reducción de los costos de transporte de productos, reducción de patógenos, mejorando la capacidad de almacenamiento y la comercialización.

Los métodos de transferencia de calor se basan en los métodos predominantes para la transferencia de calor a los sólidos húmedos. Estos métodos son la convección, conducción, radiación o una combinación de ambos.

En los sistemas por convección (el secado directo) los lodos húmedos están en contacto directo con el mecanismo de transferencia de calor, por lo general gases calientes. En condiciones de equilibrio la tasa de secado es constante, y la transferencia de masa es proporcional a: (1) el área de la superficie de contacto con el medio expuesto, (2) la diferencia entre el contenido de agua del aire de secado y la humedad de saturación a la temperatura de bulbo húmedo de la interface lodos-aire y (3) otros factores, tales como la velocidad y turbulencia del aire de secado expresado como coeficiente de transferencia.

La conducción (el secado indirecto), es la transferencia de calor a través de una superficie que separa el lodo húmedo, del fluido que se utiliza para secar por medio de transferencia de calor, por lo general se usa vapor u otro fluido caliente.

La radiación (rayos infrarrojos), se genera por medio de lámparas de rayos infrarrojos, o elementos de resistencia eléctrica, o refractarios de gas incandescente que suministran energía radiante, y la transfieren a los lodos húmedos y disminuyendo la humedad.

Para estabilizar y acondicionar los lodos se calientan por arriba de una temperatura y un tiempo predeterminado (70 °C y 30 min. respectivamente).

Con este método se reducen las bacterias, virus y huevos de helmintos por debajo de niveles establecidos en la normatividad. Es más recomendable el uso de vapor por ser más efectivo en mantener la temperatura en todo el contenedor, asimismo es preferible el tratamiento por lotes ya que se evitan las contaminaciones que se pueden presentar en un proceso continuo. (Metcalf & Eddy, 2003)

### 3. PROBLEMA DE LOS SUELOS DEFORESTADOS EN MÉXICO

Cuando se elimina un bosque y el terreno es destinado, por ejemplo, a la explotación agrícola o ganadera, disminuye en gran medida la capacidad de la superficie terrestre para controlar su propio clima y composición química.

Una de las mayores amenazas para la vida del hombre en la Tierra es la deforestación. Desnudar el planeta de sus bosques y de otros ecosistemas como de su suelo, tiene un efecto similar al de quemar la piel de un ser humano. Los bosques ayudan a mantener el equilibrio ecológico y la biodiversidad, limitan la erosión en las cuencas hidrográficas e influyen en las variaciones del tiempo y en el clima. Asimismo, abastecen a las comunidades rurales de diversos productos, como la madera, alimentos, combustible, forrajes, fibras o fertilizantes orgánicos.

La deforestación no es un proceso reciente, desde hace tiempo nuestros ecosistemas forestales comenzaron a recibir la presión humana debido a la extracción de madera para distintos usos. Esta tendencia se ha profundizado en los últimos años debido al avance de la frontera agrícola. (SEMARNAT, 2008)

México vive una situación de emergencia ante la acelerada y dramática desaparición de sus bosques y selvas. A pesar de que en las últimas cinco décadas la superficie forestal se redujo a la mitad, lo cual pone en riesgo a muchos otros recursos como la captación de agua, el gobierno mexicano permanece indiferente. La falta de políticas públicas claras y coherentes en este sector ocasionan que cada año, según estadísticas oficiales, México pierda 785 mil hectáreas de bosques y selvas. (GREENPEACE, 2004) (SEMARNAT, 2008)

Lo anterior significa que cada minuto desaparece una superficie boscosa del tamaño de dos canchas de fútbol. Según la FAO, esta es la quinta tasa de deforestación más grave del planeta, sólo superada por las de Brasil, Indonesia, Sudán y Zambia. (GREENPEACE, 2004).

Las causas de la deforestación se pueden dividir en dos; las causas directas y las causas indirectas.

Entre las principales causas directas están:

**1) La explotación maderera de los bosques.** El madereo, cuando se lleva a cabo con fines industriales, se realiza a gran escala, convirtiéndose en una de las principales causas de la deforestación a nivel mundial.

**2) La sustitución de los bosques para la agricultura y la ganadería.** El suelo de los bosques es un suelo pobre para dichas prácticas, por lo que a los pocos años se convierte en una tierra totalmente degradada.

**3) La urbanización.**

**4) La minería y la actividad petrolera.**

**5) La construcción de infraestructuras, represas hidroeléctricas donde se inundan áreas boscosas, carreteras, entre otras.**

**6) Los incendios forestales.**

**7) La lluvia ácida.**

Las causas indirectas son aquellas que hacen que las causas directas existan. Algunas de ellas son:

A) Los modelos de producción y consumo, que originan una gran demanda de madera, principalmente en los países desarrollados.

B) Malas políticas económicas y sociales, algunas de las cuales fomentan la sustitución de los bosques por la agricultura y ganadería a gran escala con el fin de abastecer el mercado internacional, y otras en cambio fuerzan a muchos campesinos pobres a destruir el bosque para poder cultivar la tierra y sobrevivir.

C) La industrialización incontrolada que provoca contaminación y ocasiona las lluvias ácidas.

Las consecuencias de la deforestación son completamente negativas desde cualquier punto de vista. La deforestación implica la desaparición de especies animales y vegetales, debido a la pérdida de su hábitat. Incide negativamente en la conservación del agua, originando inundaciones o sequías. Provoca la erosión del suelo, así como también el aumento de su temperatura. Como consecuencia se rompe el equilibrio ecológico. Todo esto perjudica a las poblaciones cercanas y a actividades como la agricultura, la ganadería y la pesca. (GREENPEACE, 2004) (SEMARNAT, 2008)

También ocasiona un desequilibrio en el ciclo hidrológico y en el clima global. El efecto invernadero aumenta con la deforestación, ya que por un lado, disminuye la cantidad de árboles disponibles para captar el dióxido de carbono de la atmósfera, y por otro, los bosques al ser incendiados o cortados liberan el carbono que ya tienen acumulado en forma de dióxido de carbono, así, la concentración en la atmósfera de este compuesto aumenta, siendo el que más contribuye al efecto invernadero.

Se estima que la deforestación constituye un tercio de todo el dióxido de carbono que la actividad humana libera a la atmósfera. Deforestación y cambios climáticos están, pues, íntimamente relacionados.

Desde el punto de vista social y cultural, para los pueblos y comunidades indígenas que habitan y dependen de los bosques, la deforestación significa la pérdida de su fuente de supervivencia, y trae consigo la desnutrición, el aumento de enfermedades, la emigración y hasta la posible desaparición de la propia comunidad.

Los programas forestales de cada país deben hacer partícipes a todos los interesados e integrar la conservación y el uso sostenible de los recursos biológicos. Asimismo, las capacidades nacionales de investigación forestal deben mejorarse y crear una red para facilitar el intercambio de información, fomentar la investigación y dar a conocer los resultados de las distintas disciplinas.

Es necesario llevar a cabo estudios que analicen las causas de la deforestación y degradación ambiental en cada país, y debe fomentarse la cooperación en temas de transferencia de tecnología relacionada con los bosques, mediante inversiones públicas y privadas, empresas mixtas, entre otras.

### ***3.1 INDICADORES FORESTALES***

El último informe disponible para el país, es el Informe de la situación del medio ambiente en México 2005 y los Indicadores básicos del desempeño ambiental de México 2005. Sin embargo, muchos indicadores se basan en el Inventario Nacional Forestal de 1994 y en los anexos se indica que “los datos de los diferentes inventarios no son comparables entre sí ya que fueron elaborados con propósitos, materiales y técnicas diferentes”.

#### **3.1.1 Superficies Forestales**

Actualmente, existen tres entidades que producen datos primarios sobre inventarios forestales en el país:

- El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).
- La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) con el apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) desde 2001.

Algunos inventarios de la SEMARNAT se basan en mapas elaborados por el INEGI pero cada uno dispone de herramientas y metodologías propias para la producción de sus datos. (SEMARNAT, 2008)

En 2004 se inició un nuevo programa de Inventario Forestal Nacional, la CONAFOR trabaja actualmente en su primera etapa, basándose en la información de los inventarios anteriores. La integración completa de este inventario concluyó

en el 2009, de acuerdo con estimaciones de la Gerencia de Geomática de la institución.

Para la integración actual del Inventario Nacional Forestal se cuenta con la información de las cartas de vegetación y uso actual del suelo Serie I, II y III de INEGI, la carta de vegetación del Inventario Nacional Forestal 2000 elaborada por la UNAM – SEMARNAT e imágenes de satélite, de cobertura nacional, que CONAFOR y SEMARNAT han obtenido desde el año 2001 (SEMARNAT, 2008) (Velásquez, *et al*, 2002)

### **3.2 LOS PROGRAMAS DE REFORESTACIÓN NO HAN DADO RESULTADO**

Los programas de reforestación en el país, no han dado los resultados esperados porque desafortunadamente se han limitado a “la siembra, foto y abandono”, la restauración de las zonas forestales se tiene que ver como un cultivo más, para acelerar este proceso en ocasiones se siembran especies no nativas de la zona.

Desafortunadamente en términos económicos la siembra de especies no nativas suele ser más barato, pero no es una verdadera alternativa, dado que la hectárea en algunos casos se vende a precios muy bajos y se malgastan los recursos.

Se pide que se destine más presupuesto a este tipo de programa, porque la conservación y restauración de los bosques se tiene que ver como un programa de obra pública, de lo contrario se seguirá tirando dinero en forma de arbolitos a través de campañas que no dan los resultados esperados. Este es un asunto que debe verse con mucha preocupación y tomarse como una advertencia para todo el país, dentro de poco en México se estarán sufriendo las consecuencias de la deforestación.

Un ejemplo en la cuenca que abastece a la capital del estado de Veracruz son 22 mil hectáreas de bosque que pertenecen al estado vecino de Puebla, y hay que ver cuánto de esto se necesita conservar, proteger o reforestar para evitar que el suministro dependa de otro estado, porque el 60 % del agua viene de esa zona.

A casi una década de su creación, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) no ha reportado lo esperado. Pese a contar anualmente con un presupuesto creciente –pasó de 400 millones de pesos en 2000 a unos 5 mil millones en 2010–, el saldo es el fracaso de los programas de reforestación; la caída en la producción maderable; la reducción en al menos 2 millones de hectáreas de la superficie bajo manejo y el deterioro del tejido social en zonas forestales, señalan organizaciones y expertos en el sector.

Se considera que hay un fuerte retroceso no sólo porque se abandona el aprovechamiento forestal, la relación gobierno- sociedad se deteriora, caen

ingresos de la población y todo esto favorece que haya lugares donde surjan actividades como el narcotráfico, porque aquellos predios que no están bajo manejo formal es probable que se exploten ilegalmente. (Enciso, 2010)

Desde que la CONAFOR se puso en marcha, comenzaron a revertirse acciones que se habían impulsado en el sexenio de Julia Carabias al frente de la Secretaría de Medio Ambiente, cuando el rubro estaba dentro de la Subsecretaría de Recursos Naturales. Se impulsó una nueva ley forestal y se le restaron apoyos a programas destinados a las comunidades, a pesar de que 9 mil comunidades poseen 80 por ciento (45.5 millones de hectáreas) de los bosques.

Además, se buscó corporativizar el sector con la creación, promovida por la CONAFOR, de 250 asociaciones regionales de silvicultores, a las cuales se les ha dado prioridad en el otorgamiento de apoyos, indica Sánchez. Cárdenas Jiménez quien fue designado en 2003 titular de la Secretaría de Medio Ambiente, pero mantenía el control de la CONAFOR, con Manuel Reed como director.

Entre las fallas está el énfasis en la reforestación, descuidando áreas como el fortalecimiento de las capacidades. Romper récord Guinness en un sector donde hay pobreza y degradación del bosque, son medidas insuficientes. Expertos han señalado que la sobrevivencia de las plantas es de entre 20 y 30 por ciento y la Auditoría Superior de la Federación detectó que se plantaron 60 mil hectáreas menos de las 400 mil hectáreas del 2007. (Enciso, 2010)

Por estas razones se propone el uso de los biosólidos como una alternativa más para los programas de reforestación, y también para el mejoramiento de los suelos en las zonas donde ya es casi imposible sembrar alguna especie vegetal por el estado de degradación o erosión que existe.

El uso de los biosólidos ha tomado una tendencia muy importante en los últimos años. No solo por demostrar su respuesta favorable como abono, sino también como una opción de disposición final de lodos de planta de tratamiento muy viable, que genera tanto un beneficio ambiental y económico.

## **4. APLICACIÓN DE BIOSÓLIDO COMO MEJORADORES DE SUELOS.**

Quizás la opción de disposición final de lodos más interesante para nuestro país, sea el aprovechamiento de los biosólidos como mejoradores de suelos, ya que, además de proporcionar nutrientes, incrementan la retención de agua, mejoran el suelo cultivable y restauran suelos erosionados.

Por tanto, al uso estrictamente agrícola hay que sumar la posibilidad de que se les pueda utilizar para regenerar suelos estériles o bien tratar suelos deforestados, lo que permitiría mejorar la cubierta vegetal, redundando en una menor escorrentía –permitiría controlar inundaciones como consecuencia de lluvias torrenciales– y una mayor capacidad de infiltración de esos suelos –mejorando, por tanto, la recarga de los acuíferos.

En suma, las partículas finas y orgánicas de los biosólidos pueden incrementar características tales como humedad y disponibilidad de nutrientes. A largo plazo los biosólidos entregan una continua y lenta liberación de nutrientes al sustrato, da un valor añadido, suponiendo a su vez un ahorro en fertilizantes, factor que debe ser tomado en cuenta.

El biosólido enriquece y mejora las características texturales del suelo a través de una variedad de nutrientes, especialmente nitrógeno (N) y fósforo (P) los que con frecuencia se encuentran en forma limitada. En un corto plazo la adición de biosólido puede mejorar la productividad del suelo ya que éste entrega virtualmente un suministro inmediato y necesario para el desarrollo de la planta.

Se ha observado en estudios que después de aplicar el biosólido al suelo se logró un decremento de coliformes fecales y una reducción de huevos de helminto. Se obtienen cambios en las características físicas y químicas del suelo, como la neutralización del pH, el incremento en la conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nutrimentos, porosidad, etc. Los riesgos potenciales del uso del lodo que se deberán considerar para la agricultura son: la presencia de patógenos en los lodos tratados y el incremento de la conductividad eléctrica. (Cardoso, 2002)

En la tabla 4-1 se presentan un condensado de los artículos que fueron consultados, en los que se demuestra la utilidad de los biosólidos como abono y regeneradores de suelos en distintos casos y estudios en diferentes partes del mundo.

Tabla 4-1 Condensado de artículos

Artículo	Autor	Año	Tema o aplicación	Institución y país
<b>TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES MUNICIPALES CON UN PROCESO AEROBIO-TERMOFÍLICO</b>	Socorro López Armenta Esperanza Ramírez Camperos Lina Cardoso Vigueros Petia Mijaylova Nacheva Gabriela Moeller Chávez	1994	Los tratamientos de lodos que combinan la biodegradación y altas temperaturas, como es el composteo, son los más adecuados para la remoción de patógenos. El objetivo del trabajo fue obtener un producto estable, con calidad agrosanitaria para poder ser utilizado como mejorador de suelos agrícolas.	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México
<b>ESTABILIZACIÓN ALCALINA DE LODOS GENERADOS EN UN TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO.</b>	Blanca Jiménez José Antonio Barrios Catalina Maya	1998	Se realizaron pruebas de estabilización alcalina para reducir la concentración de bacterias y huevos de parásitos en lodos fisicoquímicos. Los lodos crudos provenían de sistemas piloto de tratamiento primario avanzado (TPA) empleando tres diferentes procesos ubicados en la salida del drenaje profundo de la Ciudad de México.	Instituto de Ingeniería UNAM, México, D.F.
<b>CONCENTRACIÓN E INACTIVACIÓN DE PATÓGENOS EN LOS LODOS DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN MÉXICO</b>	Kara L. Nelson Blanca Jiménez Cisneros	2000	En este trabajo se estudiaron tres lagunas de estabilización (dos facultativas y una anaerobia) ubicadas en los estados de México y Tlaxcala. En cada laguna se determinó la profundidad y la distribución de lodos estimando la tasa anual de acumulación.  Además, se extrajeron varias columnas de lodo estratificándolas en cuatro submuestras (con base en la profundidad).	Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, U.C. Davis, Davis, CA, Estados Unidos  Instituto de Ingeniería. Grupo: Tratamiento y Reúso. UNAM. Ciudad Universitaria, México, D. F.
<b>APLICACIÓN EN UN SUELO AGRÍCOLA DE LODOS RESIDUALES TRATADOS</b>	Lina Cardoso Vigueros Esperanza Ramírez Camperos	2002	El propósito del trabajo fue probar que el lodo tratado puede ser usado para mejorar las características físico químicas del suelo, además de proporcionar algunos nutrimentos para el crecimiento de vegetales, sin riesgo de interferir negativamente en la cadena alimenticia.	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México

<p><b>EFFECTO DEL AMONIACO EN LA ESTABILIZACIÓN ALCALINA DE LODOS RESIDUALES</b></p>	<p>Juan Manuel Méndez Contreras Blanca Elena Jiménez Cisneros Germán Salgado Velázquez</p>	<p>2002</p>	<p>El objetivo de este estudio fue demostrar que el amoniaco producido en la estabilización alcalina puede incrementar la eficiencia del proceso. Se utilizaron lodos generados a partir de agua residual municipal de la ciudad de México tratada mediante un proceso fisicoquímico.</p>	<p>Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F.</p>
<p><b>DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES POR EL APOORTE DE TRES TIPOS DE LODO DE ESTACIONES DEPURADORAS</b></p>	<p>Rosario Miralles de Imperial Eulalia Ma. Beltrán Miguel Ángel Porcel Ma. Luisa Beringola José Valero Martín Rosa Calvo Ma. del Mar Delgado</p>	<p>2003</p>	<p>Evaluar el aporte de nutrientes al suelo por la aplicación de tres tipos de lodos de depuradora, se condujo un ensayo en invernadero en condiciones controladas de temperatura y de humedad con estaquillas enraizadas de olivo <i>Olea europaea</i> L.</p>	<p>INIA. Departamento de Medio Ambiente y Servicio de Biometría. Madrid, España.</p>
<p><b>APLICACIÓN DE LODOS RESIDUALES, ESTIÉRCOL BOVINO Y FERTILIZANTE QUÍMICO EN EL CULTIVO DE SORGO FORRAJERO (<i>Sorghum vulgare</i> Per s.)</b></p>	<p>José María Hernández Herrera Emilio Olivares Sáenz Ignacio Villanueva Fierro Humberto Rodríguez Fuentes Rigoberto Vázquez Alvarado Juan Francisco Pissani-Zúñiga</p>	<p>2004</p>	<p>En este estudio se aplicó lodo residual, fertilizante químico y estiércol de bovino en un suelo típico del suroeste de la ciudad de Durango, México, para estimar y comparar la posible mejora en la producción de sorgo forrajero (<i>Sorghum vulgare</i> Pers.).</p>	<p>Instituto Tecnológico Agropecuario Durango, México  Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, N.L., México  CIIDIRIPN Dgo., México</p>
<p><b>METALES PESADOS EN MAÍZ (<i>Zea mays</i> L.) CULTIVADO EN UN SUELO ENMENDADO CON DIFERENTES DOSIS DE COMPOST DE LODO RESIDUAL</b></p>	<p>Gabriela Cuevas Ingrid Walter</p>	<p>2004</p>	<p>Se realizó una experiencia de campo de dos años de duración para estudiar la absorción y la distribución de metales pesados (Cu, Zn, Ni, Cd, Pb y Cr) en plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) cultivadas en un suelo calcáreo que fue enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual.</p>	<p>Departamento de Medio Ambiente. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Agroalimentaria, INIA, Madrid. España.</p>

<p><b>APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS COMO ABONOS ORGÁNICOS EN PASTIZALES ÁRIDOS Y SEMIÁRIDOS</b></p>	<p>Pedro Jurado Guerra Miguel Luna Luna Rodolfo Barretero Hernández</p>	<p>2004</p>	<p>Se describe los tipos de biosólidos y se presenta datos sobre su contenido de nutrientes para las plantas y otros elementos potencialmente tóxicos y su variabilidad. Se presentan los efectos de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y el agua, la producción y la calidad del forraje de algunas plantas y la calidad del aire de zonas áridas y semiáridas.</p>	<p>INIFAP Chihuahua, Chih. México</p>
<p><b>INFLUENCIA DE LA FERTILIZACIÓN CON LODOS DE DEPURADORA COMPOSTADOS EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO DE DOS OLIVARES</b></p>	<p>Eulalia Ma. Beltrán Rosario Miralles de Imperial Miguel Ángel Porcel José Valero Martín Ma. Luisa Beringola Rosa Calvo Ma. del Mar Delgado</p>	<p>2005</p>	<p>Debido al interés creciente en el cultivo del olivo y a la necesidad de reutilizar los lodos residuales procedentes de estaciones depuradoras de la zona centro de España se ha determinado el efecto que tiene el lodo de depuradora compostado (LDC) en las propiedades químicas (materia orgánica, nitrógeno, fósforo, pH y conductividad eléctrica del suelo de dos olivares de la variedad cornicabra.</p>	<p>INIA, Departamento de Medio Ambiente. Madrid. España</p>
<p><b>UTILIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA. PARTE 8. EVOLUCIÓN DE ALGUNOS CONSTITUYENTES DE LA MEZCLA DE BIOSÓLIDOS-BAGAZO DE AGAVE DURANTE EL COMPOSTAJE</b></p>	<p>Gilberto Íñiguez Javier Parra Patricia A. Velasco</p>	<p>2006</p>	<p>Se estudio el proceso de compostaje de una mezcla de biosólidos y bagazo de agave, la reducción de la materia orgánica y el volumen, tomando en cuenta la densidad y el contenido de cenizas.</p>	<p>Universidad de Guadalajara. Jalisco, México</p>
<p><b>CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE Y DE LOS ÁCIDOS HÚMICOS EN SUELO ACONDICIONADO CON LODO RESIDUAL FRESCO O COMPOSTADO</b></p>	<p>Rocío Vaca Paulín Jorge Lugo de la Fuente María Vicenta Esteller Alberich</p>	<p>2006</p>	<p>Se utilizaron lodos residuales de origen municipal y su composta, el lodo residual se mezcló con rastrojo de maíz (<i>Zea mays</i> L.) y se hizo una composta a 55 °C por 35 días, de muestras de suelo agrícola bajo condiciones de laboratorio en dosis equivalentes a 0 y 200 Mg ha<sup>-1</sup>, para determinar los cambios en la materia orgánica soluble y en los ácidos húmicos del suelo por medio de espectrofotometría visible y espectroscopia de infrarrojo; asimismo se evaluaron la mineralización y la cinética del carbono a través de la respiración microbiana.</p>	<p>Laboratorio de Edafología y Ambiente, Facultad de Ciencias, UAM, Edo. de México, México  CIRA, UAM, Edo. de México, México</p>

<p><b>CONTAMINACIÓN POR COLIFORMES Y HELMINTOS EN LOS RÍOS TEXCOCO, CHAPINGO Y SAN BERNARDINO TRIBUTARIOS DE LA PARTE ORIENTAL DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO</b></p>	<p>Ricardo Rivera Vázquez Óscar Palacios Vélez Jesús Chávez Morales Marco A. Belmont Iouri Nikolski Gavrilov Ma. de Lourdes de la Isla de Bauer Arturo Guzmán Quintero Liliana Terrazas Onofre Rogelio Carrillo González</p>	<p>2007</p>	<p>El objetivo de esta investigación fue identificar las descargas a los ríos y determinar su grado de contaminación. Se hicieron 10 muestreos en 28 descargas de mayo de 2004 a abril de 2005 y se cuantificaron algunos contaminantes químicos (sustancias activas al azul de metileno, elementos traza, N, P y conductividad eléctrica) y biológicos (bacterias coliformes totales (CT), fecales (CF) y huevos de helmintos).</p>	<p>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, México.  Postdoctoral Researcher, Wetland Biogeochemistry Institute, Oceanography &amp; Coastal Sciences, Ontario University, Canadá</p>
<p><b>CONCENTRACIÓN TOTAL Y ESPECIACIÓN DE METALES PESADOS EN BIOSÓLIDOS DE ORIGEN URBANO</b></p>	<p>Eduardo González Flores Mario Alberto Tornero Campante Yolanda Ángeles Cruz Noemí Bonilla y Fernández</p>	<p>2008</p>	<p>El objetivo fue determinar las concentraciones en las fracciones biodisponibles. Se obtuvieron las concentraciones totales de metales pesados por medio de una digestión ácida en sistema cerrado y fueron determinadas por espectrofotometría de absorción atómica.</p>	<p>Laboratorio de Ingeniería Ambiental - Instituto Tecnológico de Puebla. Puebla, México  Colegio de Postgraduados - Campus Puebla. Pue., México  Departamento de Agroecología y Ambiente, Instituto de Ciencias - BUAP, Pue. México.</p>

<p><b>BENEFICIAL REUSE OF PRECAST CONCRETE INDUSTRY SLUDGE TO PRODUCE ALKALINE STABILIZED BIOSOLIDS.</b></p>	<p>Gowda, C. Seth, R. Biswas, N.</p>	<p>2008</p>	<p>Este estudio examinó la estabilización de los lodos de aguas residuales municipales mediante lodos de hormigón como un agente alcalino. Los lodos de aguas residuales fueron modificados con un 10 a un 40% de los lodos de hormigón en peso húmedo, y 10 y el 20% de cal en peso seco de la mezcla de lodos. Mezclas que contengan el 30 y el 40% de los lodos de hormigón con 20% de cal cumplido los requisitos principales de las categorías 1 y 2 (Canadá) biosólidos de mantener un pH de 12 durante al menos 72 horas. Los metales pesados por debajo de la categoría 1 los límites reglamentarios. La mezcla de 40% de lodos de hormigón se incubó a 52 ° C durante 12 de las 72 horas para alcanzar la categoría 1 y 2 reglamentos de menos de 1000 coliformes fecales / g sólidos. El contenido de nutrientes de los biosólidos fue de 8,2, 10 y 0,6 g / kg de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente. Puede ser utilizado como una capa superior del suelo o aumentada de potasio para su uso como fertilizante</p>	<p>Lower Thames Valley Conservation Authority, Ontario, Canada</p> <p>Department of Civil &amp; Environmental Engineering, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada</p>
<p><b>POTENTIAL FOR ENHANCED PHYTOREMEDIATION OF LANDFILLS USING BIOSOLIDS</b></p>	<p>Kwon-Rae Kim Gary Owens</p>	<p>2009</p>	<p>Los residuos a los vertederos sigue siendo el método más común de gestión de residuos, ya que es sencillo y relativamente barato. En el tratamiento en particular, inadecuado posterior a la clausura de los vertederos o el deterioro de la capa de arcillas en la clausura tradicional del relleno, se mostró a dar lugar a degradación de las tierras que requerían soluciones. La fitorremediación es una tecnología atractiva para la remediación de los vertederos, ya que puede estabilizar el suelo y, simultáneamente, los lixiviados del vertedero remediar. Sin embargo, para la aplicación exitosa de cualquier sistema de fitorremediación, la creación efectiva de su caso, la vegetación deseada es fundamental. Por lo tanto, las propiedades físico-químicas de los suelos de rellenos sanitarios a menudo necesitan ser mejoradas mediante la incorporación de enmiendas del suelo. Los biosólidos son un regenerador de suelos comunes ya que contienen una variedad de nutrientes como el nitrógeno, fosfato, potasio, así como una gran proporción de materia orgánica. Esta modificación también mejorar las propiedades físicas de los suelos tapado por la porosidad</p>	<p>Climate Change &amp; Agroecology Division, Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Science Republic of Korea</p> <p>Centre for Environmental Risk Assessment and Remediation, University of South Australia, Australia</p>

			aumenta, el contenido de humedad, y la agregación del suelo.	
<b>APPLICATION OF HELMINTH OVA INFECTION DOSE CURVE TO ESTIMATE THE RISKS ASSOCIATED WITH <i>BIOSÓLIDO</i> APPLICATION ON SOIL</b>	Navarro, I. Jiménez, B. Cifuentes, E. Lucario, S.	2009	Los objetivos de este trabajo son: construir un modelo basado en el riesgo diseñados para la exposición de aguas residuales sin tratar (es decir, el riego de tierras) con huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i> como indicadores de Huevos de helmintoy aplicar los resultados para evaluar el riesgo para la salud (es decir, <i>Ascaris lumbricoides</i> infección) asociadas con el consumo de productos cultivados en suelo enriquecido con biosólidos. Los datos mostraron que puede ser factible para actualizar Huevos de helminto umbral en los biosólidos procedentes de países en desarrollo sin aumentar significativamente los riesgos.	Institute of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF, México  National Institute of Public Health, Cuernavaca, Morelos, México
<b>RECYCLING <i>BIOSOLIDS</i> AND LAKE-DREDGED MATERIALS TO PASTURE-BASED ANIMAL AGRICULTURE: ALTERNATIVE NUTRIENT SOURCES FOR FORAGE PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY. A REVIEW.</b>	Sigua, Gilbert C	2009	Este artículo examina las siguientes dos preguntas clave. ¿El uso de estos materiales en un entorno agrícola inofensivo y sensato? ¿El uso de biosólidos segura en todos los climas, en todos los suelos y es sostenible a largo plazo? biosólidos y reciclaje de los materiales de dragado del lago a la producción animal basada en los pastos es muy productiva como alternativa fuentes de nutrientes para la producción de forraje, hierba perenne puede ser una buena opción para la aplicación repetida de biosólidos y materiales de dragado del lago	Research Soil Scientist, United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service Subtropical Agricultural Research Station, Brooksville, USA
<b>EFEECTO DEL COMPOST DE BIOSÓLIDOS EN LA PRODUCCIÓN DE PLANTINES DE <i>Austrocedrus chilensis</i> (CIPRÉS DE LA CORDILLERA)</b>	Basil, Gustavo Mazzarino, María Julia Roselli, Lucía Letourneau, Federico	2009	En el presente trabajo se estudió el efecto de 0, 30 y 50% de compost de biosólidos en el crecimiento inicial (primer año) de ciprés de la cordillera, y el efecto durante los dos años siguientes de un tratamiento único con 50% de compost en el crecimiento posterior y el estado nutricional de los plantines. Se determinó diámetro y altura a 18, 25 y 37 meses, biomasa aérea y radicular a 25 y 37 meses, y concentración foliar de C, N, P, K, Ca y Mg a 37 meses. A pesar de que los tres tratamientos iniciales fueron homogeneizados al año en un único tratamiento con 50% de compost, se encontraron diferencias significativas de diámetro, altura y biomasa aérea y radicular entre los tratamientos originales en todas las fechas analizadas, correspondiendo los mayores valores a	Campo Forestal Gral. San Martín, RN, Argentina  CONICET  CRUB-Universidad Nacional del Comahue, RN, Argentina

los tratamientos con compost. Al finalizar el ensayo, las concentraciones foliares de nutrientes fueron muy similares en todos los plantines, excepto Mg que fue mayor en el tratamiento original con 50% de compost. Los resultados muestran la importancia de los primeros meses de crecimiento en el desarrollo posterior de los plantines de ciprés y el valor potencial de los compost de biosólidos como sustrato para la producción de esta especie en contenedores.

**LAND APPLICATION OF SEWAGE SLUDGE (BIOSOLIDS) IN AUSTRALIA: RISKS TO THE ENVIRONMENT AND FOOD CROPS.**

Pritchard, D. L.  
Penney, N.  
McLaughlin, M. J.  
Rigby, H.  
Schwarz, K.

2010

Este artículo resume los principales problemas y limitaciones relacionados con el uso de biosólidos en Australia con ejemplos concretos de casos de Australia Occidental, un miembro de la Australian NBRP, y pone de relieve varios proyectos de investigación llevado a cabo durante la última década para asegurar que los biosólidos se utilizan provechosamente y con seguridad en el medio ambiente. Se presta atención a la investigación relativa a la planta la absorción de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo (entre ellos el de reducir la absorción de fósforo en el lodo de alumbre-suelo enmendado), el riesgo de absorción de metales pesados por las plantas, especialmente de cadmio, cobre y zinc, el riesgo de patógenos contaminación de los productos del suelo y el grano, el cambio de pH del suelo (en particular después de biosólidos con cal modificada), y el control de la contaminación fecal de los biosólidos en las masas de agua mediante técnicas de ADN.

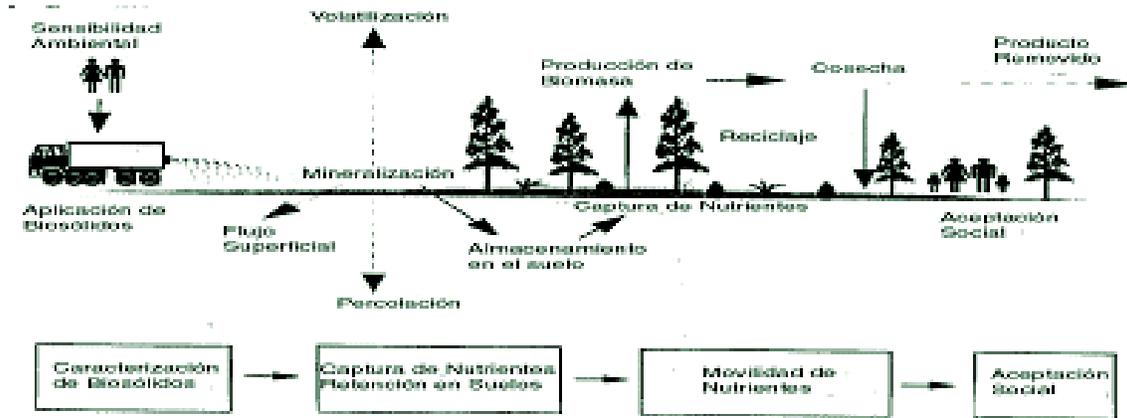
Curtin University,  
Muresk Campus,  
PMB

Centre for  
Environmental  
Contaminants,  
CSIRO Land and  
Water, Australia

School of  
Agriculture, Food  
and Wine,  
University of  
Adelaide,  
Australia

CSIRO Land and  
Water,  
Queensland  
Biosciences  
Precinct,  
Australia

En la Figura 4-1 se presenta un modelo de aplicación de los biosólidos en Nueva Zelanda. Un aspecto primordial para la utilización de los biosólidos es la aceptación de la población, para ello se debe realizar la investigación correspondiente para asegurar; que si los biosólidos son utilizados en forma segura produciendo grandes beneficios y evitando que ellos vayan a saturar los vertederos, problema de gran magnitud en la región Metropolitana.



**Figura 4-1 Diagrama de flujo del biosólido**

Los suelos forestales de muchas formas son buenos lugares para la aplicación de lodos. Tienen altas tasas de infiltración (reducen la salida y la acumulación), grandes cantidades de materia orgánica la cual inmoviliza los metales pesados de los lodos, sistemas de raíces perennes, que permiten aplicaciones a lo largo de todo el año en climas suaves.

Aunque los suelos forestales son frecuentemente ácidos, investigaciones realizadas no han encontrado problemas de lixiviación de metales pesados después de la aplicación del lodo. Por el contrario, el lodo estabilizado con cal presenta baja solubilidad.

En el reporte de la EPA530-R-99-009 (1999) indica que 6,9 millones de toneladas de biosólidos fueron generados en 1998, de los cuales un 60% fue reciclado (compostado, uso agrícola, uso forestal entre otros) y un 40 por ciento fue depositado en vertederos. (EPA530, 2009)

Vemos que la aplicación controlada de lodo al suelo supone un aporte de cantidades significativas de nutrientes (carbono, nitrógeno, azufre y fósforo) y micronutrientes (zinc, hierro y cobre), propiciando una situación favorable para el desarrollo de las plantas. No ocurre lo mismo con otros metales como el cadmio, mercurio, plomo, etc.; que resultan altamente tóxicos para cualquier forma de vida vegetal o animal.

Es sabido y mencionado con anterioridad que existen distintos tipos de lodos debido a su origen y su contenido de contaminantes, por lo que la NOM-004-SEMARNAT, establece en la tabla 4-1 como se pueden clasificar y su principal uso. (NOM-004-SEMARNAT, 2002)

**Tabla 4-2 Aprovechamiento de biosólidos**

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase B y C</li> </ul>
EXCELENTE Ó BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase C</li> </ul>
EXCELENTE Ó BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos forestales.</li> <li>• Mejoramientos de suelos.</li> <li>• Usos agrícolas.</li> </ul>

(NOM-004-SEMARNAT, 2002)

Sin embargo, no debemos olvidar que un aporte de lodos al suelo, de forma continua y reiterada durante largos períodos de tiempo, favorece la acumulación de metales en el mismo, por lo que obliga al control de los suelos tratados y tener un estricto control de monitoreo.

## **4.1 PRINCIPALES PROPIEDADES QUE SE MEJORAN CON LOS BIOSÓLIDOS**

### **4.1.1 Permeabilidad y Conductividad Hidráulica**

Un concepto ligado a la porosidad y al tamaño de las partículas es el de permeabilidad, que es una medida que indica la facilidad con que el agua se desplaza a través del suelo, es decir, la facilidad con que circula por los poros. El término conductividad hidráulica, que también se emplea algunas veces, se refiere a la prontitud con la que un suelo conduce o transmite fluidos a través de él.

En forma contraria a lo esperado, las arcillas, si bien son más porosas que las arenas, son menos permeables, pues al ser los poros tan pequeños, el agua encuentra gran dificultad en circular por ellos. Es decir, un suelo arcilloso puede tener mucha más agua que uno arenoso, pero sin embargo, a esa agua le costará mucho más circular y por lo tanto renovarse. (Tamhane, *et al*, 1986)

De este modo, estará más tiempo en contacto con los minerales solubles y se enriquecerá en ellos, con lo cual su calidad para el uso humano puede deteriorarse notablemente. Por el contrario un agua que ha circulado rápidamente por terrenos arenosos y se acumula en horizontes con grandes poros, conserva su

pureza y es, en general, de buena calidad para el consumo. (Miramites, *et al*, 1999) (NOM-021-RECNAT, 2000)

#### **4.1.2 Capacidad de Intercambio Catiónico**

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos, merced a su contenido en arcillas. Éstas están cargadas negativamente, por lo que suelos con mayores concentraciones de arcillas exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores.

Los cationes de mayor importancia con relación al crecimiento de las plantas son el calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) e hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). Los primeros cuatro son nutrientes y se encuentran involucrados directamente con el crecimiento de las plantas. El sodio y el hidrógeno tienen un pronunciado efecto en la disponibilidad de los nutrientes y la humedad. En los suelos ácidos, una gran parte de los cationes son hidrógeno y aluminio en diversas formas.

También contribuyen a la CIC las clases, cantidades y combinaciones de los minerales arcillosos y las cantidades de materia orgánica y su estado de descomposición. Los cationes no son retenidos con las mismas energías de enlace. Los sitios de intercambio de la materia orgánica, solo enlazan en forma débil a los cationes. Las arcillas con gran capacidad de intercambio tienden a enlazar los cationes bivalentes como el  $\text{Ca}^{++}$  y el  $\text{Mg}^{++}$ , con más energía que el  $\text{K}^+$ .

Esta característica puede afectar la disponibilidad de los nutrientes. Los suelos con arcillas caoliníticas tienen una menor energía de enlace y, por lo tanto, para un nivel analítico determinado o un porcentaje de saturación de un elemento se mostrará una disponibilidad relativamente mayor.

Si la CIC está neutralizada principalmente por calcio, magnesio, potasio y sodio, se dice que está saturada de bases. Sin embargo, si los cultivos o el lixiviado han removido la mayor parte de los cationes básicos, el suelo está bajo saturación de bases o alto en saturación ácida. Las cantidades totales de cationes ácidos relativas a la CIC son una medida de la saturación ácida. Ésta también es una medida de las necesidades de encalado de un suelo (aplicar cal). (Miramites, *et al*, 1999) (NOM-021-RECNAT, 2000)

#### **4.1.3 Contenido de Agua**

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. Además,

intemperiza las rocas y los minerales, ioniza los macro y micro nutrientes que las plantas toman del suelo, y permite que la materia orgánica sea fácilmente biodegradable. El contenido de agua en el suelo puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudicial.

El exceso de agua en los suelos favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (Topp, 1993).

Es recomendable determinar la capacidad de campo de los suelos, es decir, la cantidad de agua que un suelo retiene contra la gravedad, cuando se deja drenar libremente. En algunas ocasiones, como cuando se trata de suelos contaminados, por ejemplo con hidrocarburos del petróleo, es difícil llevar a cabo esta medición por la dificultad de rehidratar suelos secos con estas características. Por lo que la medición de la capacidad de campo se realiza sólo en función del porcentaje de agua que retiene. (Linares, *et al*, 2006).

#### **4.1.4 pH**

La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos ( $H^+$ ) que se da en la interface líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad. (Miramintes, *et al*, 1999) (NOM-021-RECNAT, 2000)

#### **4.1.5 Contenido de Materia Orgánica**

El carbono orgánico es uno de los principales componentes de los seres vivos: aproximadamente 50% del peso seco de la materia orgánica es carbono. En el medio ambiente su ciclo está estrechamente ligado al flujo de energía, debido a que las principales reservas de energía de los organismos son compuestos de carbono reducidos que han derivado de la fijación del  $CO_2$  atmosférico, ya sea por medio de la fotosíntesis o, con menor frecuencia de la quimiosíntesis (Tiessen & J., 1993). Las plantas y los animales que mueren son desintegrados por los microorganismos, en particular bacterias y hongos, los cuales regresan el carbono al medio en forma de bióxido de carbono.

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos que viven en el suelo; y sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición es muy amplia pues incluye tanto a los materiales

poco alterados como a aquellos que sí han experimentado cambios de descomposición, transformación y resíntesis dentro del suelo. (Linares, *et al*, 2006)

#### 4.1.6 Fósforo Total

El fósforo elemental (P) no se encuentra en estado libre en la naturaleza porque se oxida muy fácilmente; sin embargo, son muy comunes los compuestos orgánicos y principalmente minerales que contienen fósforo.

En términos generales, el fósforo del suelo se clasifica en fósforo orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos que forme. La forma orgánica se encuentra en el humus y la materia orgánica, y sus niveles en el suelo pueden variar desde 0 hasta mayores que 0.2%. La fracción inorgánica está constituida por compuestos de hierro, aluminio, calcio y flúor, entre otros, y normalmente son más abundantes que los compuestos orgánicos. Solo una pequeña parte del P aparece en solución en suelo (< 0.01-1 mg L<sup>-1</sup>).

El P es un macronutriente esencial para las plantas y los microorganismos, junto con el nitrógeno y el potasio. Puede ser un nutrimento limitante, ya que es un componente de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos.

Los análisis de P sirven fundamentalmente para el control de la dosificación de productos químicos en tratamientos de agua o suelos, o como un medio para determinar que un sistema presenta contaminación por exceso de este compuesto (Muñoz I. D. J., 2000).



Figura 4-2 Ciclo del fósforo en el suelo

La figura 4-2 muestra el ciclo del fósforo en la naturaleza y la intervención del hombre en el mismo. Se puede observar que se pierde fósforo por: escurrimiento, erosión, lavado y extracción en la cosecha. Por otro lado se regresa fósforo al suelo por medio de adición de fertilizantes minerales, que es la más importante y significativa, también se retorna de los residuos de animales y plantas y por deposición atmosférica.

Las plantas absorben únicamente el fósforo que está en la solución del suelo en forma de  $\text{HPO}_4^{-2}$  (ión fosfato monoácido) y  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$  (ión fosfato diácido). Cualquier fertilizante, ya sea de origen orgánico o mineral debe transformarse primero en estas formas químicas antes de ser utilizado por el cultivo.

Las diferencias entre los residuos orgánicos y los fertilizantes minerales son principalmente dos:

- 1) Velocidad de disponibilidad para el cultivo: los residuos orgánicos tienen que ser primero descompuestos por los microbios, mientras que los abonos minerales ya tienen los compuestos en la forma que la planta los utiliza.
- 2) Concentración: los residuos orgánicos tiene concentraciones más bajas de fósforo que los compuestos minerales. (Institute, 2010)

#### **4.1.7 Nitrógeno Inorgánico**

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes de la Tierra, pues en su forma gaseosa ( $\text{N}_2$ ) constituye 78% de la atmósfera. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su propia dinámica y a su ciclo biogeoquímico. El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire.

Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a sus tejidos. Cuando dichos organismos se mueren, el nitrógeno reingresa al suelo completando el ciclo. Este ciclo es complejo e involucra una serie de reacciones y organismos con diferentes metabolismos.

Siempre comienza con compuestos orgánicos sencillos ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ) y termina con compuestos orgánicos complejos; que a través de la descomposición regresan a la etapa de compuestos sencillos.

En los microorganismos la carencia de nitrógeno puede afectar el crecimiento, por lo que la población microbiana no tendrá un desarrollo óptimo. En contraste,

demasiado nitrógeno permite el crecimiento microbiano rápido y acelera la descomposición; pero puede crear problemas de olor en condiciones anaerobias.

Además, el exceso de nitrógeno puede ser liberado como amoniaco; en tanto que el nitrógeno aprovechable escapará en forma de gas. Para la mayoría de los materiales una relación C/N cercana a 10:1 mantendrá estos elementos en equilibrio aproximado. En los suelos normalmente el contenido de nitrógeno varía de 0.05 a 2% en sus diferentes formas. (Linares, *et al*, 2006)

En la Figura 4-3 se puede ver de mejor manera el Ciclo del Nitrógeno en el suelo y su interacción con el medio ambiente.

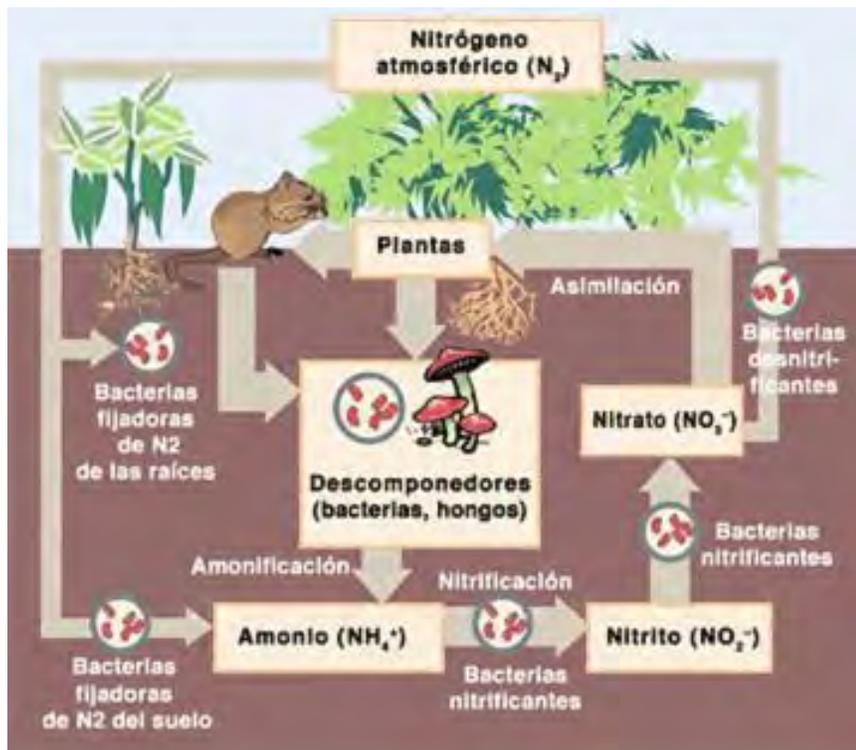


Figura 4-3 Ciclo del nitrógeno en el suelo

Su asimilación se diferencia en el hecho de que el ión nitrato se encuentra disuelto en la solución del suelo, mientras que gran parte del ión amonio está adsorbido en las superficies de las arcillas. El contenido de nitrógeno en los suelos varía en un amplio espectro, pero valores normales para la capa arable son del 0,2 al 0,7%. Estos porcentajes tienden a disminuir acusadamente con la profundidad. El nitrógeno tiende a incrementarse al disminuir la temperatura de los suelos y al aumentar las precipitaciones atmosféricas.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se presenta la metodología que se utilizó para realizar la parte experimental y de laboratorio para el desarrollo de la tesis. Se presenta la metodología del digestor aerobio, la estabilización alcalina y el aumento de la temperatura para formar el biosólido. También su aplicación en el suelo y los parámetros que se tomaron para ver su adaptación y el desarrollo que se presentó en la especie vegetal seleccionada.

### **5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS**

Los lodos fueron caracterizados tomando como parámetros los sólidos totales, sólidos volátiles totales, el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH, la DBO, patógenos (Coliformes fecales, salmonella spp y huevos de helmintos) y metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc), como indica la NOM-004-SEMARNAT-2002.

### **5.2 ESTABILIZACIÓN DEL LODO**

En este trabajo se estabilizaron lodos que provenían del tanque de recirculación de lodos activados de la planta de tratamiento de CU de la UNAM, por medio de digestión aerobia, estabilización con cal y aumento de temperatura.

#### **5.2.1 Proceso Experimental de Digestión Aerobia de Lodos**

Se utilizó un reactor de plexiglás dividido en dos secciones: la cámara de aireación y decantación. Dicha cámaras simulan el reactor y clarificador secundario de una planta real.

La capacidad de la cámara de oxidación es de 20 litros y el aire se suministró por medio de un difusor. Las burbujas de aire mantienen el contenido de la cámara de aeración en una condición de mezcla completa. El lodo de recirculación del proceso de lodos activados, se alimentó continuamente. Las cámaras de aireación y sedimentación están separadas por una puerta deslizante que puede retirarse si se desea.



**Figura 5-1 Reactor aerobio**

La puesta en marcha de este equipo se realizó colocando en la cámara de aireación una siembra de lodo activado recogido de la planta de tratamiento de CU de la UNAM y fue aclimatado gradualmente.

### **5.2.2 Estabilización con cal**

Un método para estabilizar los lodos es a través del uso de material alcalino para hacerlos no aptos para la supervivencia e inactivación de virus, bacterias y otros microorganismos presentes. En este proceso se utilizó cal, la cual se agregó a los lodos digeridos en el reactor aerobio en cantidad de 0.30 kg Ca (OH)<sub>2</sub>/kg ST para elevar el pH a 12 o superior. El pH alto creó un ambiente que detuvo o retardo considerablemente las reacciones microbianas que de otro modo puede conducir a la producción de olores y hacer crecer la población microbiana. El lodo no se pudre, ni crea olores o es un peligro para la salud, siempre y cuando el pH se mantenga en este nivel. Con este proceso se obtuvo el biosólido 1.

### **5.2.3 Aumento de temperatura**

En el proceso de estabilización se utilizó también el aumento de la temperatura para estabilizar y acondicionar los lodos digeridos en el reactor aerobio. Se calentó el lodo por arriba de una temperatura de 70 °C y durante un tiempo de 30 min a 1 hr, después de ser estabilizado con cal y de esta forma se obtuvo el biosólido 2.

## ***5.3 APLICACIÓN DE LODO EN EL SUELO.***

Debido a que se encontraba en estado semilíquido su aplicación fue en forma de riego que se dio 3 veces por semana del biosólido obtenido.

## ***5.4 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO***

Para probar la eficiencia de la aplicación de biosólidos en una zona erosionada se planteó un experimento donde se utilizó suelo degradado, en el cual se sembró cedro blanco (*Cupressus lindleyi*) de invernadero y se aplicó biosólido como abono.

La estabilización de biosólido con cal se escogió por ser el método más económico, pero se encontró en otros casos de estudio la recomendación de elevar la temperatura para garantizar la inactivación de patógenos, lo cual eleva los costos del sistema.

Por ello se decidió comparar el efecto de biosólido estabilizado con cal contra el biosólido estabilizado con cal y al cual se le aumentó la temperatura con el propósito de determinar el mejor método, que mejoren las características del suelo. Como testigo se utilizó el mismo suelo degradado y se sembró cedro

blanco (*Cupressus lindleyi*), al cual no se aplicó ningún biosólido, solo se regó con agua del sistema de agua potable de CU.

### **5.5 DISEÑO DE EXPERIMENTO**

Este estudio se realizó para comprobar que la aplicación de los biosólidos mejora las características de estructura, capacidad de intercambio, permeabilidad y velocidad de infiltración de un suelo degradado usado con propósitos de reforestación.

El experimento se montó conforme a un diseño de bloques al azar en el que se probaron tres tratamientos: blanco, biosólido 1 y biosólido 2. Estos tres tratamientos se probaron en tres jardineras o tinas experimentales, donde se colocaron cinco Cedros Blancos (*Cupressus lindleyi*) de una edad promedio de 8 meses a 1 año, con una altura entre los 10 y 15 cm.

**Tabla 5-1 Diseño de experimento**

Tratamiento	CEDRO BLANCO				
Blanco	CI -0-1	CI-0-2	CI -0-3	CI-0-4	CI-0-5
Biosólido 1	CI -1-1	CI-1-2	CI -1-3	CI-1-4	CI-1-5
Biosólido 2	CI -2-1	CI-2-2	CI -2-3	CI-2-4	CI-2-5

### **5.6 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL**

- Contenedor: Se utilizó una tina por cada tratamiento, este contenedor tenía una salida en la parte inferior con una llave para poder extraer el lixiviado.
- Sustrato: El contenedor se llenó con una capa de grava de 10 cm de espesor en la base, a continuación se colocó una columna de 25 cm de suelo; finalmente se dejó un espacio libre de 10 cm sobre el suelo con el objeto de que hubiera lugar suficiente para agregar los tratamientos.
- Alimentación de tratamiento: Se regó y agregó el tratamiento con los biosólidos de la siguiente forma:
  - ❖ BLANCO: Suelo que fue recolectado de los alrededores de CU UNAM que presentaba una ausencia de vegetación y estaba erosionado, que no fue sometido a ningún tratamiento y fue regado con agua del suministro de agua potable de CU.
  - ❖ BIOSÓLIDO 1: Suelo que fue expuesto al biosólido estabilizado con cal y regado con agua.
  - ❖ BIOSÓLIDO 2: Suelo que fue expuesto al biosólido estabilizado con aumento de temperatura y cal; también se regó con agua.

## 5.5 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

**Suelo:** se llenaron tres tinas o jardineras con suelo que fue extraído de los alrededores de CU, el cual se tamizó, para separar grava y arena, además de basura y raíces. Después se trasplantaron los cedros blancos (*Cupressus lindleyi*).

Se le determinaron parámetros de permeabilidad, capacidad de intercambio catiónico, humedad, materia orgánica, salinidad, pH, nitrógeno y fósforo presentes en el suelo, como el desarrollo del cedro blanco (*Cupressus lindleyi*) especies vegetales seleccionada como indicador para el uso del biosólido como abono.

## 5.6 PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CALIDAD

Los parámetros que se determinaron para medir el efecto de los tratamientos fueron la concentración de nutrientes (N<sub>2</sub>, P, Ca, Mg, K, NA) en el suelo, cambios físicos (textura, densidad aparente y real, porosidad, permeabilidad, conductividad eléctrica) y químicos (CIC, pH, NaCl y KCl) del suelo, cambios físicos (altura, número de ramas y brotes) presentes en los cedros blancos (*Cupressus lindleyi*).

## 5.7 DURACIÓN DEL EXPERIMENTO

Una vez armadas las tinas o jardineras experimentales se trasplantaron los Cedros Blancos (*Cupressus lindleyi*) y se les tomaron la altura, el número de brotes y número de ramas; se inició la aplicación de los tratamientos y con las determinaciones de los parámetros. A partir del día cero se dejaron pasar siete meses. En el anexo B se muestra la candelarización de las actividades que se describen a lo largo del documento.

## 5.8 TÉCNICAS PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

En anexo A se mencionan las técnicas que se emplearon en la determinación de los parámetros utilizados haciendo mención de las condiciones particulares que la técnica menciona para ciertos casos en particular.

Tabla 5-2 Técnicas para determinar parámetros

Parámetro	Método	Técnica
Textura	Determinación de Textura	Procedimiento de la pipeta
Porosidad	Densidad Aparente	Terrón parafinado
	Densidad Real	Peso del suelo por la diferencia del volumen de agua.
Permeabilidad	Determinación de la Permeabilidad	Ecuación de Darcy
Salinidad	Conductividad Eléctrica	Conductímetro
Capacidad de Intercambio	Determinación de CIC	CIC y Bases intercambiables

<b>Catiónico (CIC)</b>		empleado acetato de amonio.
<b>Contenido de agua</b>	Determinación de agua en el suelo	Método Gravimétrico
<b>pH</b>	Determinación de pH	Método Potenciométrico
<b>Materia Orgánica</b>	Determinación de MO	Oxidación del Carbono Orgánico con Dicromato de Potación y Ácido Sulfúrico.
<b>Fósforo</b>	Determinación de Fósforo Total	Método de Bray
<b>Nitrógeno</b>	Determinación de Nitrógeno Inorgánico	Método de Micro-Kjeldahl

### ***5.9 DESARROLLO VEGETAL***

Durante la parte experimental se usaron como indicadores biológicos de asimilación de los distintos tratamientos en suelo, lo que fue el Cedro Blanco (*Cupressus lindley*), donado del invernadero de Flor del Bosque, que se encuentra al Oriente de la Ciudad de Puebla. Con ellos se representó una zona de reforestación que fuera expuesta a los tratamientos, determinando en estos sujetos: altura, número de ramas y de brotes. Por lo que en la parte de resultados se dará una explicación a las observaciones obtenidas del desarrollo, asimilación y problemas presentados.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los datos obtenidos del experimento, se divide en tres partes principales que son: tratamiento de los lodos, propiedades físicas y químicas del suelo; por último crecimiento vegetal del cedro blanco (*Cupressus lindleyi*); seguida por una discusión en la que se relacionan los valores con los diferentes factores que pudieron influir en el comportamiento observado.

### 6.1 TRATAMIENTO DE LOS LODOS.

A continuación en la tabla 6-1 se presenta un resumen de los datos del lodo obtenido en el digestor aerobio; que se utilizó para obtener el biosólido que fue empleado en los dos distintos tratamientos, aplicados en el suelo experimental.

Tabla 6-1 Datos de lodos obtenido en el digestor aerobio

PARÁMETRO	UNIDAD	Influyente al digestor aerobio	Dentro del digestor aerobio	Efluente del digestor aerobio <sup>1</sup>
<b>Sólidos totales totales (STT)</b>	mg/L	2554	3717	4945
<b>Sólidos volátiles totales(SVT)</b>	mg/L	1135	980	790
<b>OD</b>	mg/L	2.7	3.16	3.4
<b>Temperatura (Temp)</b>	° C	18	19	18
<b>pH</b>		6.6	7	7.2
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/L	120	160	24.5
<b>Coliformes fecales</b>	UFC/g seco	1.245*10 <sup>6</sup>	7.43*10 <sup>6</sup>	7.033*10 <sup>7</sup>
<b><i>Salmonella spp</i></b>	UFC/g seco	1.43*10 <sup>6</sup>	5.39*10 <sup>6</sup>	2.793*10 <sup>7</sup>
<b>Huevos de Helminetos</b>	HH/g seco	84	104	35

<sup>1</sup> Lodo después de quitar el sobrenadante

El contenido de sólidos totales mostró un incremento a medida que avanza el tratamiento de los lodos, el lodo tenía 2554 mg/L en el influente que fue aumentando hasta obtener un valor de 4945 mg/L en el lodo de purga del reactor que se empleó para formar el biosólido, esto es un 94% de aumento en los sólidos totales. El lodo crudo es una fuente de microorganismos, como se ve en coliformes fecales y salmonella spp aumentan desde el reactor, para obtener en el efluente una concentración de 7.033\*10<sup>7</sup> y 2.793\*10<sup>7</sup> UFC/g seco respectivamente después de ser purgado el lodo digerido en el reactor aerobio.

En la tabla 6-2 se muestra el contenido de N y P en el lodo crudo. Se puede notar que el nitrógeno determinado se encuentra dentro de los valores de la bibliografía y que el fósforo está por debajo de lo reportado. (Metcalf & Eddy, 2003) (Ramalho, 1991)

**Tabla 6-2 Contenido de N y P en el lodo estabilizado**

MACRONUTRIENTES	NIVELES DETECTADOS	LODO ACTIVADO*
<b>Nitrógeno total (mg/kg como N)</b>	33.2	24 a 50
<b>Fósforo total (mg/kg como P)</b>	24.3	28 a 110

\* (Metcalf & Eddy, 2003)

En la tabla 6-3 se muestran los valores que se encontraron en el biosólido 1 y 2. Después de purgar el lodo digerido del digestor aerobio se agregó 0.30 kg Ca(OH)<sub>2</sub>/kg ST de lodo generado para elevar el pH a 12 o superior (biosólido 1) y después se aumentó la temperatura a 75 °C por un periodo de 30 min a 1 hr. (biosólido 2). Se observó que en el biosólido 2 los datos del nitrógeno, fósforo y materia orgánica disminuyen, esto debido al calentamiento al que fue sometido. Se observó que los patógenos presentes disminuyen en más del 95 % con ambos tratamientos.

Esta tabla no muestra diferencia significativa entre estos dos tipos de tratamiento para estabilizar los lodos, pero en la aplicación de suelo se obtuvieron muchos cambios lo que se explicará con más detalle en el siguiente apartado.

**Tabla 6-3 Datos de biosólidos 1 y 2**

PARÁMETRO	UNIDAD	BIOSÓLIDO 1	BIOSÓLIDO 2
<b>Temperatura de tratamiento (Temp)</b>	° C	18	19
<b>pH</b>		11	11.3
<b>Nitrógeno total</b>	mg/ kg	33.2	29.3
<b>Fósforo</b>	mg/kg	24.3	18
<b>Materia Orgánica</b>	g/kg	17.8	15.7
<b>Coliformes fecales</b>	UFC/g seco	790	253
<b><i>Salmonella spp</i></b>	UFC/g seco	1	1
<b>Huevos de Helminthos</b>	HH/g seco	1	No presenta

(NOM-004-SEMARNAT, 2002)

El análisis de metales pesados es una actividad importante cuando se quiere valorar el potencial de riesgo ambiental y de salud asociado con el uso de los biosólidos en suelos agrícolas y forestales. Sin embargo, es conocido que la determinación del contenido total no da una valoración apropiada del impacto ambiental causado. Se determinaron las concentraciones totales de metales pesados presentándolos en la tabla 6-4, las concentraciones totales fueron más bajas que los niveles máximos permisibles establecidos por la legislación mexicana. (NOM-004-SEMARNAT, 2002). Los metales pesados están asociados

principalmente a la fracción mineral y a la materia orgánica y consecuentemente muestran muy baja biodisponibilidad. (Flores, *et al*, 2009)

**Tabla 6-4 Metales pesados en el biosólido**

METALES PESADOS	UNIDAD (en base seca)	NIVELES DETECTADOS		INTERPRETACIÓN	LIMITES DE NOM-004*
		Biosólido 1	Biosólido 2		
<b>Arsénico</b>	mg/kg	0.183	0.215	EXCELENTES	41
<b>Cadmio</b>	mg/kg	0.091	0.096	EXCELENTES	39
<b>Cromo</b>	mg/kg	5.051	5.294	EXCELENTES	1200
<b>Cobre</b>	mg/kg	35.623	76.371	EXCELENTES	1500
<b>Plomo</b>	mg/kg	8.347	10.853	EXCELENTES	300
<b>Mercurio</b>	mg/kg	0.100	0.084	EXCELENTES	17
<b>Níquel</b>	mg/kg	41.172	41.223	EXCELENTES	420
<b>Zinc</b>	mg/kg	165.980	188.887	EXCELENTES	2800

\* (NOM-004-SEMARNAT, 2002)

Se puede observar que en el biosólido 1 la concentración de metales es menor con respecto al biosólido 2 (aumento de Temperatura), pero se advierte una gran diferencia en el cobre en el biosólido 2, en que alcanza niveles mayores de concentración en comparación con el biosólido 1 esto se puede atribuir a error de análisis o que la muestra se contaminara durante su manipulación.

## **6.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.**

En este apartado se van a presentar los datos obtenidos de las pruebas físicas y químicas realizadas al suelo después de la siembra de los cedros blancos (*Cupressus Lindley*).

En la tabla 6-20 se presenta una recopilación de los resultados obtenidos en los cuatro tipos de suelos antes mencionados, pero antes se dará una mejor explicación de estos resultados en cada apartado de los parámetros, observando mejor la diferencia que existe entre tratamientos, y de esta forma dar las mejores recomendaciones para el uso de este tipo de técnicas de estabilización y del biosólido producido.

### **6.2.1 Propiedades Físicas**

#### **6.2.1.1 Determinación de Textura**

La textura del suelo se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo. Su determinación es rápida y aproximada. Da una primera indicación de las características de la constitución de los suelos y de la influencia que estos tienen en las propiedades: como son la aeración del terreno, la permeabilidad, la

capacidad de retención del agua, etc. (NOM-021-RECNAT, 2000) (I. D. J. Muñoz, 2000)

En la tabla 6-5 se muestran los porcentajes de arena, arcillas y limos encontrados desde el suelo testigo utilizado como base para las tres cajas experimentales antes de colocar cualquier tipo de tratamiento; hasta los que fueron sometidos a tratamiento. Se observa que los suelos no cambian en gran proporción de textura y permanecen en franco arenosos

**Tabla 6-5 Textura en suelo**

MUESTRA	PORCENTAJES	INTERPRETACIÓN
BLANCO	% de Arena 75.82	FRANCO ARENOSO
	% de Limo 12.90	
	% de Arcillas 11.28	
BIOSÓLIDO 1	% de Arena 70.89	FRANCO ARENOSO
	% de Limo 17.51	
	% de Arcilla 11.6	
BIOSÓLIDO 2	% de Arena 84.10	FRANCO ARENOSO
	% de Limo 0.67	
	% de Arcilla 15.23	

Ver Figura A-1 Triángulo de textura del sistema de clasificación de la USDA.

La *ARENA*, (2.00 a 0.05mm de diámetro) representa la parte inerte del suelo y tiene por lo tanto solamente funciones mecánicas, constituye el armazón interno sobre las cuales se apoyan las otras fracciones finas del suelo, facilitando la circulación del agua y del aire.

El *LIMO* (0.05 a 0.002mm de diámetro) participa solo en forma limitada en la actividad química con las partículas de diámetro inferior en el suelo, mientras que su influencia en la relación agua no es significativa en el suelo, y se incrementa con el aumento de los diámetros menores de éste.

La *ARCILLA* (menores de 0.002mm de diámetro) comprende toda la parte coloidal mineral del suelo, y representa la fracción más activa, tanto desde el punto de vista físico como del químico, participando en el intercambio iónico, y reaccionando en forma más o menos evidente a la presencia del agua, según su naturaleza. (Linares, *et al*, 2006) (Miramintes, *et al*, 1999)

### 6.2.1.2 Porosidad

Como consecuencia de la textura y estructura del suelo tenemos su porosidad, es decir su sistema de espacios vacíos o poros. Los poros en el suelo se distinguen en: macroscópicos y microscópicos.

Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, en efecto, el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares. (Miramintes, *et al*, 1999)

Tabla 6-6 Porcentaje de porosidad

MUESTRA	% DE POROSIDAD	INTERPRETACIÓN
Blanco	38.49	LIGEROS
Biosólido 1	40.23	LIGEROS
Biosólido 2	41.54	LIGEROS

Ver Tabla A-1 Límites de porosidad

Los terrenos arenosos son ricos en macroporos, permitiendo un rápido paso del agua, pero tienen una muy baja capacidad de retener el agua, mientras que los suelos arcillosos son ricos en microporos, y pueden manifestar una escasa aeración, pero tienen una elevada capacidad de retención del agua. En los suelos tratados con biosólido 1 y biosólido 2 se puede obtener una gran retención de agua debido a la cantidad de cal que se le agregó por la estabilización esta aumentó ligeramente la porosidad con respecto al blanco.

#### 6.2.1.2.1 Densidad Aparente

La densidad aparente de un suelo se suele utilizar como medida de la estructura del suelo. Una densidad baja, generalmente, equivale a más porosidad y mayores agregados del suelo. Un suelo de bosque saludable tendrá una densidad baja, lo que corresponde a mayor estabilidad, menos compactación y, probablemente, mayor contenido de agua que un suelo con una densidad mayor. (Linares, *et al*, 2006)(Miramintes, *et al*, 2006)

Tabla 6-7 Resultados de densidad aparente

MUESTRA	$\rho$ APARENTE g/cm <sup>3</sup>	INTERPRETACIÓN
BLANCO	1.55	ARENOSO
BIOSÓLIDO 1	1.53	ARENOSO
BIOSÓLIDO 2	1.52	ARENOSO

Ver Tabla A-2 Interpretación de resultados de densidad aparente

El biosólido 2 tiene un valor de 1.52 en densidad aparente el más bajo que el biosólido 1 y el blanco, lo cual indica una mayor estructura, capaz de retener agua y nutrientes que las raíces de los cedros aprovechan para su desarrollo y tienen a su alcance de manera más fácil.

#### 6.2.1.2.2 Densidad Real

La densidad real de un suelo depende principalmente de la composición y cantidad de minerales y de la proporción de materia orgánica e inorgánica que contiene. La densidad de la parte mineral de un suelo es mayor que la de la materia orgánica porque contiene cuarzo, feldespato, mica y óxidos de hierro como la magnetita y la hematita. (Miramintes, *et al*, 2009).

**Tabla 6-8 Resultados de densidad real**

MUESTRA	$\rho$ REAL g/cm <sup>3</sup>
BLANCO	2.52
BIOSÓLIDO 1	2.56
BIOSÓLIDO 2	2.60

Se puede observar en la tabla 6-8 que la densidad real, de los distintos tipos de suelo, es muy parecida, pero debido a que existe una mayor concentración de minerales y materia orgánica en los suelos tratados con el biosólido 1 y 2, sus densidades reales son mayores.

#### 6.2.1.3 Permeabilidad y Conductividad Hidráulica

Un concepto ligado a la porosidad y al tamaño de las partículas es el de permeabilidad, que es una medida de la facilidad con que el agua se desplaza a través del suelo, es decir, la facilidad con que circula por los poros. El término conductividad hidráulica, que también se emplea algunas veces, se refiere a la prontitud con la que un suelo conduce o transmite fluidos a través de él.

**Tabla 6-9 Resultados de la conductividad hidráulica, velocidad de infiltración y caudal**

MUESTRA	K (cm/seg)	Vf (m/seg)	Q (m <sup>3</sup> /seg)	INTERPRETACIÓN
BLANCO	2.11E-06	5.00E-06	1.94E-08	Lenta
BIOSÓLIDO 1	2.02E-05	4.19E-05	1.70E-07	Moderada
BIOSÓLIDO 2	2.47E-05	5.72E-05	2.09E-07	Moderada

Ver Tabla A-3 Coeficientes de permeabilidad

En la tabla 6-9 se muestran los resultados de la K, Vf y Q obtenidos en la parte experimental, se observa que el blanco es un suelo compacto con baja permeabilidad y muy lenta filtración, con valores de K de  $2.43 \cdot 10^{-6}$  y  $2.11 \cdot 10^{-6}$

m/seg lo que hace pensar que tiene una estructura pobre el suelo y la poca cantidad de macroporos para dejar pasar el agua con libertad.

Por el contenido, en los dos tratamientos (biosólido 1 y 2) se encuentra una permeabilidad moderada, con una filtración mayor, esto se puede atribuir a la concentración y composición de las sales disueltas en el agua que influye sobre la permeabilidad del suelo. Y al tener una baja salinidad, una textura franco arenoso y una estructura mayor, su K es mayor  $2.02 \cdot 10^{-5}$  y  $2.47 \cdot 10^{-5}$  respectivamente.

#### 6.2.1.4 Salinidad

La salinidad de un suelo es determinada en un medio líquido a través de su conductividad eléctrica. Para determinarse en suelo es necesario agregarle más agua y esta última contribuye a diluir el contenido de sales de la solución intersticial, rebajando su conductividad original. (Linares, *et al*, 2006) (Miramintes, *et al*, 1999).

**Tabla 6-10 Resultados de conductividad eléctrica**

Muestras	Valor (dS/m)	Interpretación
BLANCO	0.42	NO SALINO
BIOSÓLIDO 1	0.61	NO SALINO
BIOSÓLIDO 2	0.94	NO SALINO

Ver Tabla A - 4 Criterios para evaluar la salida de un suelo, con base en su conductividad.

Cuando un suelo es "nuevo" y se empieza a fertilizar, el interior de los terrones, siempre es más pobre en nutrientes y por ende más baja su conductividad que la de la solución nutritiva que se está aplicando. Con el paso del tiempo, el suelo se va saturando de nutrientes y el interior de los terrones empieza a ser más rico que el exterior. Estas diferencias hacen que la interpretación de un extracto de saturación a capacidad de campo deba ser realizada cuidadosamente teniendo en cuenta estos factores. (Miramintes, *et al*, 1999).

En las figuras 6-1, 6-2 y 6-3 se presenta el tamaño de los terrones que se pudieron encontrar en las raíces, que tienen una dimensión de 0.79 cm en el blanco, 1.25 cm en el biosólido 1 y 3.09 cm en el biosólido 2, se puede concluir que conforme se va abonando el suelo con el tratamiento el terrón va aumentando de tamaño.



**Figura 6-1 Terrón de blanco**



**Figura 6-2 Terrón de biosólido 1**



**Figura 6-3 Terrón de biosólido 2**

**Tabla 6-11 Resultados de salinidad (NaCl)**

MUESTRA	PPM (NaCl)	INTERPRETACIÓN
BLANCO SUPERFICIAL	9.5	NO SALINO
BLANCO INTERMEDIO	3	NO SALINO
BIOSÓLIDO 1 SUPERFICIAL	9.5	NO SALINO
BIOSÓLIDO 1 INTERMEDIO	4.5	NO SALINO
BIOSÓLIDO 2 SUPERFICIAL	4.5	NO SALINO
BIOSÓLIDO 2 INTERMEDIO	20.9	POCO SALINO

En la tabla 6-11 se presentan los valores encontrados de NaCl que se tienen en los distintos suelos, puede ver que en el biosólido 2 se tiene una gran concentración en el fondo, esto se debe a que las partículas de NaCl son más finas por el calentamiento previo a que se sometió, haciendo que las partículas sean más fáciles de transportar por el agua. Lo que lo deja al alcance de las raíces más profundas que aprovechan para su crecimiento esto se nota en que este tratamiento tiene mejores resultados.

Tabla 6-12 Resultados de salinidad (KCl)

MUESTRA	PPM (KCl)	INTERPRETACIÓN
BLANCO SUPERFICIAL	34.2	NO SALINO
BLANCO INTERMEDIO	10.0	NO SALINO
BIOSÓLIDO 1 SUPERFICIAL	27.3	NO SALINO
BIOSÓLIDO 1 INTERMEDIO	11.4	NO SALINO
BIOSÓLIDO 2 SUPERFICIAL	12.1	NO SALINO
BIOSÓLIDO 2 INTERMEDIO	40.0	NO SALINO

En la tabla 6-12 de igual forma que en la anterior el biosólido 2 tiene una mayor concentración a media profundidad donde las raíces de los cedros, aprovechan mejor las sales, esto se puede ver en su crecimiento que es mucho mayor que el blanco y el biosólido 1.

### 6.2.1.5 Capacidad de Intercambio Catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos, merced a su contenido en arcillas. Éstas están cargadas negativamente, por lo que suelos con mayores concentraciones de arcillas exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores.

Tabla 6-13 Resultados de la CIC

MUESTRA	CIC (meq/Kg suelo)	GRUPO	CLASE
BLANCO	430	VERMICULITAS	MUY ALTA
BIOSÓLIDO 1	420	VERMICULITAS	MUY ALTA
BIOSÓLIDO 2	435	VERMICULITAS	MUY ALTA

Ver Tabla A - 5 Textura de suelo y Tabla 6 Tipos de arcillas & CIC

En la tabla 6-13 se ve que la CIC de las distintas muestras no muestran una gran diferencia, esto se puede explicar por la cantidad de materia orgánica que se tiene el suelo en el blanco, biosólido 1 y biosólido 2, como el tipo de textura que tiene el suelo también contribuye a este valor.

Tabla 6-14 Resultados de Ca, Mg y K

MUESTRA	UNIDADES	Ca	Mg	K	Na	INTERPRETACIÓN
BLANCO	cmol (+) kg <sup>-1</sup>	4.99	0.9868	0.3068	0.4347	MEDIA
BIOSÓLIDO 1	cmol (+) kg <sup>-1</sup>	11.1776	2.3025	0.8182	1.2171	ALTA
BIOSÓLIDO 2	cmol (+) kg <sup>-1</sup>	11.3772	2.63152	1.07394	1.4889	ALTA

Ver Tabla A - 8 Niveles de Ca, Mg y K en la tabla 8.

Tabla A-8 Niveles de Ca, Mg y K

Se puede ver en la tabla 6-14 que los dos tratamientos (biosólido 1 y 2) son los que contienen hasta 11.4 Ca en comparación con el blanco, esto por el tratamiento de estabilización de los lodos.

Con respecto a los nutrientes de Mg, K y Na se encuentran en mayor concentración en los tratamientos (biosólido 1 y 2) que en el blanco, estos son adquiridos por el contenido de materia orgánica y nutrientes que fueron adicionadas. Esto ha hecho crecer en mayor medida a los cedros que fueron expuestos, y no solo los cedros sino también las plantas invasoras las cuales hasta flor presentaron.



Figura 6-4 Flor presente en plantas invasoras



Figura 6-5 Plantas presentes en biosólido 1

### 6.2.1.6 Contenido de Agua

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. Además, intemperiza las rocas y los minerales, ioniza los macro y micro nutrientes que las plantas toman del suelo, y permite que la materia orgánica sea fácilmente biodegradable.

Tabla 6-15 Resultados de porcentaje de humedad

Muestra	% de Humedad	Interpretación
BLANCO SUPERFICIAL	64.2	HÚMEDO
BLANCO INTERMEDIO	54	MEDIANAMENTE HÚMEDO
BIOSÓLIDO 1 SUPERFICIAL	76.9	HÚMEDO
BIOSÓLIDO 1 INTERMEDIO	42.1	MEDIANAMENTE HÚMEDO
BIOSÓLIDO 2 SUPERFICIAL	85.5	EXTREMADAMENTE HÚMEDO
BIOSÓLIDO 2 INTERMEDIO	53.2	MEDIANAMENTE HÚMEDO

Se demuestra en la tabla 6-15 que el contenido de agua es muy diferente entre los distintos niveles del extracto del suelo y tipos de tratamiento, ahora bien podemos ver que la cantidad de humedad es mucho mayor en el biosólido 2 con valores de 85.5 a nivel superficial y 53.2 a nivel intermedio, esto se debe por que el biosólido llega a formar una capa que no deja escapar el agua y las raíces se encuentran en mayor contacto con el agua.

Después del tratamiento, el suelo es capaz de retener mucha agua, que será utilizada para todos los procesos químicos y físicos necesarios para un buen desarrollo de la vida vegetal. Como se ve en las figura 6-6.



Figura 6-6 Crecimiento de los cedros del día cero al día 270

## 6.2.2 Propiedades Químicas

### 6.2.2.1 Determinación de pH

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas).

Tabla 6-16 Resultados de pH

Muestra	pH	Interpretación
BLANCO	7.3	Neutro
BIOSÓLIDO 1	7.5	Medianamente Alcalino
BIOSÓLIDO 2	9.6	Fuertemente Alcalino

Ver Tabla A - 9 Criterios de evaluación de un suelo con respecto a si pH

En la Tabla 6-16 se muestran los resultados de pH, se puede observar que el biosólido 2 tiene una mayor pH con respecto a los demás tratamientos, este es causada por el contenido de cal que se agregó durante el proceso de estabilización y el aumento de temperatura por lo que se hizo más concentrado. Al

ser colocado en el suelo ha generado que no solo aumente el pH sino que el suelo tome un color blanco en la superficie, de manera que crecen muy pocas plantas invasoras y las plagas no existan, esto hace que los cedros se desarrollen mejor y a mayor velocidad.

### 6.2.2.2 Contenido de Materia Orgánica

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos que viven en el suelo; y sustancias producidas y vertidas por esos organismos.

**Tabla 6-17 Resultados de porcentaje de MO**

MUESTRA	% de MO	INTERPRETACIÓN
BLANCO SUPERFICIAL	2.60	MEDIANAMENTE RICO
BLANCO INTERMEDIO	1.09	POBRE
BIOSÓLIDO 1 SUPERFICIAL	2.15	MEDIANO
BIOSÓLIDO 1 INTERMEDIO	0.68	POBRE
BIOSÓLIDO 2 SUPERFICIAL	3.07	RICO
BIOSÓLIDO 2 INTERMEDIO	1.06	POBRE

Ver Tabla A-11 Interpretación del contenido de materia orgánica en suelo.

En la tabla 6-17 se dan los porcentajes de MO encontrados en el suelo, de los datos obtenidos se encuentra que la mayor concentración está en la parte superficial del extracto de suelo. Y que el biosólido 2 tiene 3.07 % de MO, seguido del blanco con 2.60 % de MO y el biosólido 1 con 2.15 % de MO, estos resultados son debido a que en el blanco y biosólido 1 se desarrolló un mayor porcentaje plantas invasoras que fueron una competencia directa para los cedros y que su concentración de materia orgánica fue menos con respecto a los cedros del biosólido 2.

Y también involucra los diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos que viven en el suelo; y sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición es muy amplia pues incluye tanto a los materiales poco alterados como a aquellos que sí han experimentado cambios de descomposición, transformación y resíntesis dentro del suelo.

### 6.2.2.3 Fósforo Total

El P es un macronutriente esencial para las plantas y los microorganismos, junto con el nitrógeno y el potasio. Puede ser un nutrimento limitante, ya que es un componente de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos.

**Tabla 6-18 Resultados del porcentaje de fósforo**

MUESTRA	PPM de Fósforo	INTERPRETACIÓN
BLANCO SUPERFICIAL	10.48	MEDIO
BLANCO INTERMEDIO	12.07	ALTO
BIOSÓLIDO 1 SUPERFICIAL	11.21	MEDIO
BIOSÓLIDO 1 INTERMEDIO	11.80	ALTO
BIOSÓLIDO 2 SUPERFICIAL	13.67	MUY ALTO
BIOSÓLIDO 2 INTERMEDIO	11.67	ALTO

Ver Tabla A-12 Criterios para determinar el fósforo

En la tabla 6-18 los resultados obtenidos indican que en el blanco y biosólido 1 tienen 12.07 y 11.80 PPM respectivamente, la mayor concentración se encuentra a la mitad del extracto del suelo, y en el biosólido 2 su mayor concentración está en la superficie con 13.67 PPM. De nuevo el calentamiento juega un papel importante en las concentraciones y el lugar donde se encuentra la mayor concentración. Siendo también el biosólido 2 en la parte intermedia el que contiene un mayor porcentaje dentro de las determinaciones.

Siendo que el fósforo se encuentra en muy pequeñas cantidades de forma natural en el suelo y solo está en formas minerales, el biosólido 1 y 2 al trabajar como abonos en el suelo, demostraron que tiene un aporte de este elemento y que es muy fácil ser asimilado por las raíces de las plantas dando un mejor desarrollo.

#### 6.2.2.4 Nitrógeno Inorgánico

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes de la tierra, pues en su forma gaseosa (N<sub>2</sub>) constituye 78% de la atmósfera. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su propia dinámica y a su ciclo biogeoquímico. El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire.

**Tabla 6-19 Resultados del PPM de nitrógeno**

MUESTRA	PPM de NITRÓGENO	INTERPRETACIÓN
BLANCO SUPERFICIAL	23.10	MEDIO
BLANCO INTERMEDIO	23.10	MEDIO
BIOSÓLIDO 1 SUPERFICIAL	24.50	MEDIO
BIOSÓLIDO1 INTERMEDIO	48.30	ALTO
BIOSÓLIDO 2 SUPERFICIAL	48.77	ALTO
BIOSÓLIDO 2 INTERMEDIO	60.90	ALTO

Ver Tabla A-13 Interpretación de Resultados de Nitrógeno

En la tabla 6-19 se tienen los resultados de PPM de  $N_2$ , se puede observar que el biosólido 2 es el que tiene una mayor concentración tanto en la parte superficial como en la intermedia del extracto de suelo con 48.77 y 60.90 respectivamente. Seguido por el biosólido 1 donde la concentración mayor está en la parte intermedio con 48.30 PPM y en la superficie 24.50 PPM.

Las concentraciones de  $N_2$  que se están dando al suelo con los tratamientos (biosólido 1 y 2), han sido muy buenas, por lo que se puede ver la recuperación del suelo y la adaptación de los microorganismos con este tipo de abono, dando un mayor desarrollo en los sujetos experimentales. El  $N_2$  es un nutriente esencial para el crecimiento de los vegetales, ya que es un constituyente de todas las proteínas. Es absorbido por las raíces generalmente bajo las formas de  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$ .

### ***6.3 CONDENSADO DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO***

En la tabla 6-20 se encuentran recopilados los resultados obtenidos de las pruebas físicas y químicas que se le aplicaron tanto en el Blanco y los dos Tratamientos.

En general se puede ver que el suelo inicial tenía deficiencias en permeabilidad, la capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y los nutrientes, esto se puede relacionar con la poca cantidad de agua que tenía el suelo. Debido a la degradación que muestra, pierde importantes propiedades como consecuencia de una inadecuada utilización. Las amenazas naturales son excluidas habitualmente como causas de la degradación del suelo; sin embargo las actividades humanas a las que fue expuesto afectan el uso de éste para poder sostener alguna especie vegetal

Conforme pasa el tiempo se nota que hay cambios en la porosidad, en la capacidad de intercambio catiónico, su contenido de agua es mayor, su pH aumenta, la cantidad de materia orgánica se mantiene a un nivel medio y los nutrientes se encuentran en una escala media que permite que los sujetos experimentales (cedro blanco) se desarrollen de una forma estable.

Los suelos retienen las sustancias minerales que las plantas necesitan para su nutrición y que se liberan por la degradación de los restos orgánicos. Un buen suelo es condición para actividades agronómicas productivas. Los tratamientos biosólido 1 y 2 al ser integrados en el suelo elevan la conductividad eléctrica, la concentración de NaCl y KCl, de igual forma los niveles de Ca y Mg, se vuelven suelos más húmedos, la cantidad de materia orgánica se mantiene a un nivel medio de concentración y la concentración de nutrientes es más alta.

Esto también se vio reflejado en los sujetos experimentales que fueron tratados con el biosólido 1 y 2, presentando una mayor recuperación de nutrientes, agua y estructura.

Como consecuencia de la aplicación del biosólido 1 y 2 los suelos han evolucionado, son más húmedos y permeables, permitiendo que contengan lombrices de tierra, grillos y otros insectos que a su vez favorece una mejor mezcla de las fracciones orgánica y mineral aumentando la fertilidad de suelo.

Tabla 6-20 Resultados físicos y químicos del suelo

PARÁMETRO	UNIDAD	BLANCO	INTERPRETACIÓN	BIOSÓLIDO 1	INTERPRETACIÓN	BIOSÓLIDO 2	INTERPRETACIÓN
TEXTURA	% de Arena	75.82	FRANCO ARENOSO	70.89	FRANCO ARENOSO	84.1	FRANCO ARENOSO
	% de Limo	12.9		17.51		0.67	
	% de Arcillas	11.28		11.6		15.23	
POROSIDAD		38.49	LIGEROS	40.23	LIGEROS	41.54	LIGEROS
ρ APARENTE	g/cm <sup>3</sup>	1.55	FRANCOSOS	1.53	FRANCOSOS	1.52	FRANCOSOS
ρ REAL	g/cm <sup>3</sup>	2.52		2.56		2.60	
PERMEABILIDAD	m/seg	2.11E-06	LENTA	2.02E-05	MODERADA	2.47E-05	MODERADA
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	ds/m	0.42	NO SALINO	0.61	NO SALINO	0.94	NO SALINO
NaCl Superficial	PPM	9.5	NO SALINO	9.5	NO SALINO	4.5	NO SALINO
NaCl Intermedia		3	NO SALINO	4.5	NO SALINO	9.5	NO SALINO
KCl Superficial	PPM	34.2	NO SALINO	27.3	NO SALINO	12.1	NO SALINO
KCl Intermedia		10	NO SALINO	11.4	NO SALINO	40	NO SALINO
CIC	meq/Kg	430	VERMICULITA MUY ALTA	420	VERMICULITA MUY ALTA	435	VERMICULITA MUY ALTA
Ca	cmol (+)kg <sup>-1</sup>	4.99	MEDIA	11.1776	ALTA	11.3772	ALTA
Mg	cmol (+)kg <sup>-1</sup>	0.9868	MEDIA	2.3025	ALTA	2.6315	ALTA
K	cmol (+)kg <sup>-1</sup>	0.3068	BAJA	0.8182	ALTA	1.0739	ALTA
Na	cmol (+)kg <sup>-1</sup>	0.4347		1.21716		1.47798	
% DE HUMEDAD SUPERFICIAL	%	64.2	HÚMEDO	76.9	HÚMEDO	85.5	EXTREMADAMENTE HÚMEDO
% DE HUMEDAD INTERMEDIO		54	MEDIANAMENTE HÚMEDO	42.1	MEDIANAMENTE HÚMEDO	53.2	MEDIANAMENTE HÚMEDO
pH		7.3	NEUTRO	7.5	MEDIANAMENTE ALCALINO	9.6	FUERTEMENTE ALCALINO
% MO SUPERFICIAL	%	2.6	MEDIANAMENTE RICO	2.15	MEDIANO	3.07	RICO
% MO INTERMEDIA		1.09	POBRE	0.68	POBRE	1.06	POBRE
% FOSFORO SUPERFICIAL	%	10.48	MEDIO	11.21	MEDIO	13.67	MUY ALTO
% FOSFORO INTERMEDIO		12.07	ALTO	11.8	ALTO	11.67	ALTO
NITRÓGENO SUPERFICIAL	PPM	23.10	MEDIO	24.50	MEDIO	48.77	ALTO
NITRÓGENO INTERMEDIO		23.10	MEDIO	48.30	ALTO	60.90	ALTO

## 6.4 CRECIMIENTO DE CEDRO BLANCO (*Cupressus Lindley*).

### 6.4.1 Alturas

Durante todo el experimento se fueron registrando los cambios de altura de los sujetos expuestos al tratamiento (biosólido 1 y 2) de la misma forma los que no fueron expuestos (blanco), para poder encontrar diferencias significativas dentro de la población. Lo que se encontró se describe en la siguiente tabla 6-21 y gráfica 6-1.

Tabla 6-21 Resultados de altura

TIPO DE BIOSÓLIDO	MESES	1 CEDRO	2 CEDRO	3 CEDRO	4 CEDRO	5 CEDRO	PROMEDIO	$\chi^2$	F (P $\geq$ 0.05)
BLANCO (cm)	1º MES	16	14.5	17.6	17.8	14	15.98	4	
	2º MES	17	15.9	19	18.6	15.7	17.24	4	
	3º MES	18.9	17	21.8	19.3	16	22.84	4	
	4º MES	21.3	24.5	23.9	26.5	18	22.84	4	
	5º MES	28.2	33.6	36.2	34.3	24.9	31.44	4	
	6º MES	41	51.5	49.2	52.5	40.7	46.98	4	
	7º MES	47.5	59.8	60.4	68.9	52.2	57.76	4	
BIOSÓLIDO 1 (cm)	1º MES	14	13.5	11	15	13.5	13.4	2.89	4.06*
	2º MES	15	14.3	12.3	15.1	14.5	14.2	2.25	3.16*
	3º MES	15.6	15	13.1	15.1	15.7	14.9	0.88	1.23*
	4º MES	22	17.3	16.2	15.3	18	17.8	2.48	3.49*
	5º MES	30.5	26.5	23.8	23.4	27.3	26.3	1.50	2.11*
	6º MES	41	40.3	38.3	38.5	41.3	40	0.26	0.36
	7º MES	52.5	51.5	56	55	56.5	54.3	0.28	0.40
BIOSÓLIDO 2 (cm)	1º MES	14.5	13.5	13	14	11.5	13.3	1.76	2.47*
	2º MES	15	14.3	13.5	14.5	12	13.9	2.40	3.37*
	3º MES	15.6	15	14.2	15.6	12.8	14.6	1.10	1.55*
	4º MES	20	21.3	21.8	21	19.4	20.7	0.36	0.50
	5º MES	28.9	33.8	32	39.8	33.5	33.6	2.85	4.00*
	6º MES	40.7	51	49	63.6	51	51.1	8.21	11.54*
	7º MES	52.5	64.5	59.4	80.3	58.7	63.08	6.53	9.19*

\*Diferencia significativa cepillado

En la tabla 6-21 se muestran los datos y resultados obtenidos de la prueba estadística que fue empleada para distinguir las diferencias significativas, se puede observar que durante casi todos los meses existe diferencia de tratamiento con respecto al blanco.

Los sujetos experimentales sometidos al biosólido 1 demuestran un crecimiento pero el blanco le gana en altura durante todo el tiempo de experimentación. Esto se puede explicar debido a que durante el 3º y 4º mes se vio mermado el

crecimiento de la población por la invasión de plantas externas las cuales aventajaron e hicieron una competencia importante por los recursos (nutrientes, agua y espacio).

En cambio la población sometida al biosólido 2 muestra un crecimiento importante desde el 5° al 7° mes, llegando a obtener 8.21 cm de alto en promedio, que los cedros en el biosólido 1, aunque el blanco tiene un crecimiento muy parecido al biosólido 2, en el 6° mes se presentó una diferencia significativa en su  $F = 11.54$ .

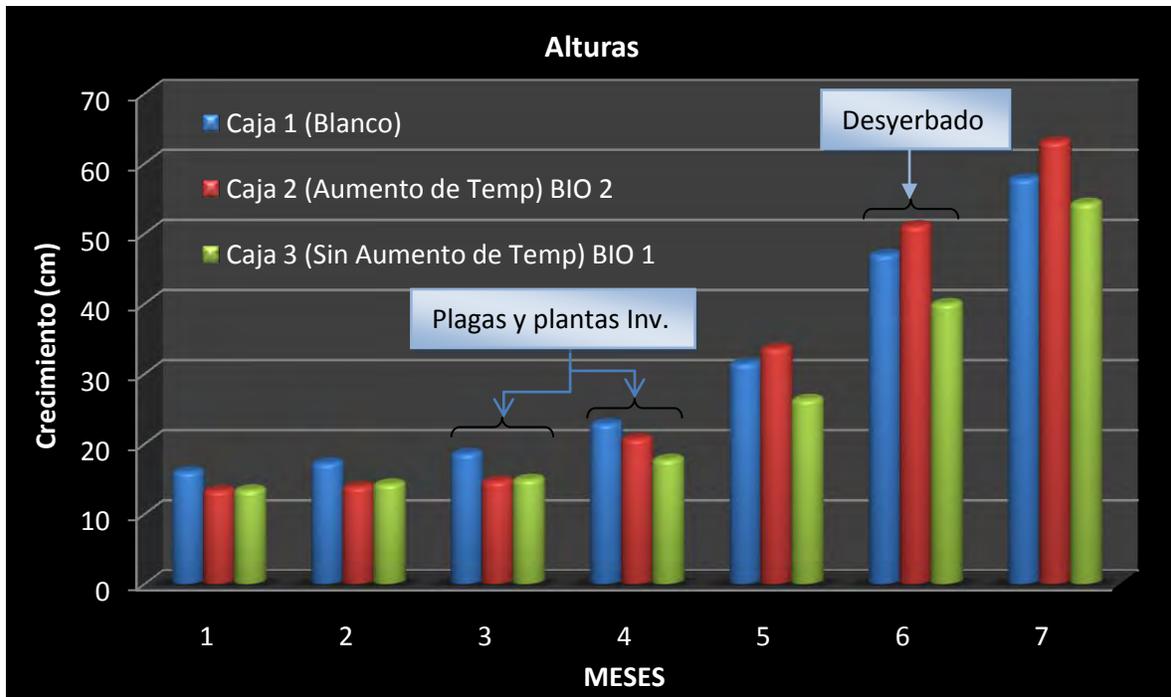


Figura 6-7 Gráfica de alturas

En la figura 6-7 vemos que durante los cuatro primeros meses existió un periodo de asimilación de las nuevas condiciones de la población sometida al tratamiento. También observamos que en el 4° mes ya se obtienen las diferencias entre el tratamiento biosólido 1 y el biosólido 2. Del 5° mes en adelante el desarrollo de los sujetos expuestos a los tratamientos, es mucho mejor en el biosólido 2.

En el 3° y 4° mes llegan a tener una plaga de pulgones (Afidos) afectando a todos los sujetos experimentales, pero conforme va pasando el tiempo se observa un desplazamiento de esta plaga alojándose únicamente en el blanco. Esta plaga se alimenta principalmente de la sabia de los tejidos vegetales, por lo que llega a secar la planta y ésta muere; aun así todo parece indicar que se llegó a obtener un repelente contra este tipo de plagas en el biosólido 1 y 2.



**Figura 6-8 Altura del cedro blanco**

#### **6.4.2 Ramas**

Las ramas son elementos importantes para el árbol y la planta. Ellas se conectan con el tronco y a través de sus espacios internos es por donde circulan los nutrientes que hacen brotar los frutos y hojas. Es por esto que las ramas son quizá una de las primeras partes en demostrar las condiciones positivas o negativas de un árbol cuando no ha sido bien cuidado y protegido de posibles daños, las ramas enseguida se secan, se vuelven quebradizas e impiden el crecimiento y florecimiento.

Las ramas pueden variar en su grosor y su longitud. Si bien cada tipo de árbol tiene un estilo particular de ramas, también se pueden encontrar variaciones dentro de la misma planta o árbol ya que el mismo puede contar con ramas gruesas y finas, horizontales verticales y diagonales, ramas más oscuras y ramas más claras, etc.

El número de ramas fue otro parámetro que fue contemplado para poder ver el área foliar que se puede llegar a producción con un enriquecimiento de nutrientes en el suelo. En la tabla 6-22 se muestran los datos y resultados obtenidos.

**Tabla 6-22 Resultados de número de ramas**

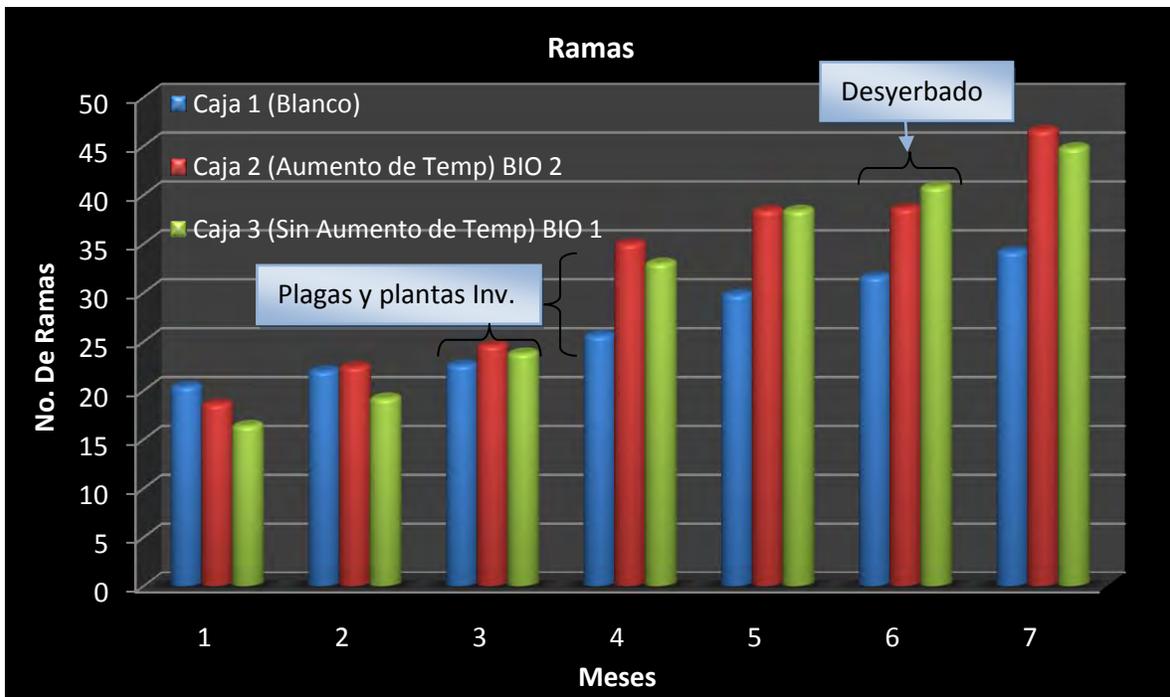
TIPO DE BIOSÓLIDO	MESES	1 CEDRO	2 CEDRO	3 CEDRO	4 CEDRO	5 CEDRO	PROMEDIO	$\chi^2$	F (P $\geq$ 0.05)
BLANCO	1º MES	18	25	22	13	24	20.4	4	
	2º MES	22	26	24	13	25	22	4	
	3º MES	23	26	25	14	25	22.6	4	
	4º MES	27	33	26	14	28	25.6	4	
	5º MES	32	28	26	19	34	31.6	4	
	6º MES	31	41	26	25	35	31.6	4	
	7º MES	30	42	31	29	39	34.5	4	
BIOSÓLIDO 1 (UNIDAD)	1º MES	16	17	14	17	18	16.4	0.38	0.53
	2º MES	18	19	17	21	21	19.2	0.47	0.65
	3º MES	20	25	23	25	26	23.8	0.94	1.32*
	4º MES	22	52	24	38	29	33	12.25	17.23*
	5º MES	29	57	27	45	34	38.4	11.36	15.98*
	6º MES	32	57	27	54	34	40.8	17.14	24.11*
	7º MES	37	50	34	56	47	44.8	9.65	13.57*
BIOSÓLIDO 2 (UNIDAD)	1º MES	18	18	16	22	19	18.6	0.79	1.11*
	2º MES	22	23	20	25	22	22.4	0.48	0.68
	3º MES	25	25	21	27	25	24.6	0.79	1.11*
	4º MES	37	39	22	41	36	35	4.58	6.45*
	5º MES	54	37	35	41	25	38.4	8.03	11.29*
	6º MES	54	37	35	41	26	38.6	9.53	13.40*
	7º MES	84	36	38	42	33	46.6	51.62	72.60*

\*Diferencia significativa

La tabla 6-22 nos deja ver que a partir del 3º mes en adelante el número de ramas es mayor en los sujetos expuestos a los tratamientos (biosólido 1 y 2) dando una mayor área foliar. Pero también existe diferencia entre tratamientos, el biosólido 1 es el que tiene un menor desarrollo con respecto al biosólido 2.

Del 3º al 6º mes se puede ver que la población biosólido 1 va en un 2% al 3 % en promedio en comparación con la población del biosólido 2. Pero en el 7º mes esta diferencia es mucho mayor dando una F= 13.57 del biosólido 1 contra una F= 72.60 del biosólido 2.

A pesar de las plagas y de las plantas invasoras, este parámetro no tuvo una reducción o merma con respecto a su desarrollo como lo mostró en la altura de los sujetos experimentales. Esto nos indica que dependiendo de las condiciones ambientales se ven afectados determinados parámetros.



**Figura 6-9 Gráfica de número de ramas**

En la figura 6-9 se puede ver mejor ilustrado como fue este crecimiento, durante todo el tiempo de trabajo. El biosólido 2 sigue manteniendo un mejor desarrollo durante todos los meses a pesar que en 5° se ve igualado por el biosólido 1 y en el 6° rebasado por el mismo, su desarrollo ha sido constante dando mejores resultados tanto de asimilación como desarrollo vegetal.

La explicación de este suceso es que al aumentar la temperatura las partículas llegan a ser más finas, fáciles de asimilar y degradar, por lo que al ser aplicado en suelo y estar en contacto con el medio ambiente, tienen una mayor y mejor aceptación por parte del suelo, el agua las desplaza más rápido por el extracto, y las raíces de los árboles y plantas tienen una mejor disponibilidad de los nutrientes.

### 6.4.3 Nuevos brotes

Los nuevos brotes es otro parámetro que se tomó en cuenta debido a su importancia, los brotes son las formas no maduras de una rama. Si éste parámetro llega a incrementarse tendremos una mayor posibilidad de aumentar el área foliar. En la tabla 6-23 se muestran los datos y resultados obtenidos durante la parte experimental.

**Tabla 6-23 Resultados de brotes**

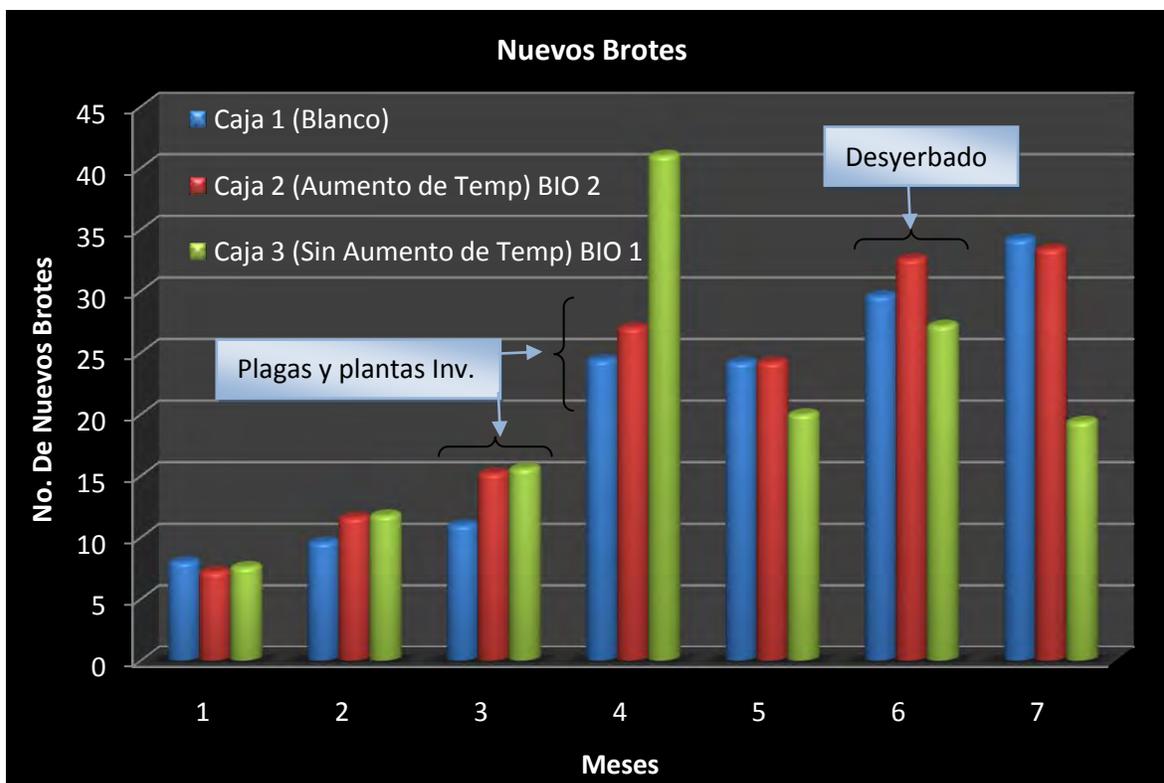
TIPO DE BIOSÓLIDO	MESES	1 CEDRO	2 CEDRO	3 CEDRO	4 CEDRO	5 CEDRO	PROMEDIO	$\chi^2$	F (P $\geq$ 0.05)
<b>BLANCO</b>	1º MES	8	9	6	8	9	8	4	
	2º MES	10	10	7	10	11	9.6	4	
	3º MES	11	11	9	12	12	11	4	
	4º MES	20	13	26	31	32	24.4	4	
	5º MES	16	18	29	25	33	24.2	4	
	6º MES	34	23	22	24	45	29.6	4	
	7º MES	40	21	22	24	64	34.2	4	
<b>BIOSÓLIDO 1 (UNIDAD)</b>	1º MES	7	8	8	9	6	7.6	3.47	4.88*
	2º MES	12	11	13	14	9	11.8	6.43	9.05*
	3º MES	15	16	15	17	15	15.6	2.13	3.00*
	4º MES	15	40	58	58	34	41	20.60	28.97*
	5º MES	1	25	8	40	26	20	18.68	26.28*
	6º MES	2	29	11	62	32	27.2	21.94	30.86*
	7º MES	15	19	18	24	21	19.4	0.13	0.19
<b>BIOSÓLIDO 2 (UNIDAD)</b>	1º MES	9	5	7	8	7	7.2	5.87	8.25*
	2º MES	12	9	12	13	12	11.6	4.00	5.63*
	3º MES	15	14	16	15	16	15.2	1.87	2.63*
	4º MES	27	26	19	35	28	27	2.05	2.89
	5º MES	29	28	18	16	30	24.2	3.42	4.81*
	6º MES	51	24	16	29	43	32.6	8.32	11.70*
	7º MES	56	18	10	36	47	33.4	4.41	6.20*

\*Diferencia significativa

En este parámetro se encuentra una mayor diferencias significativa, la tabla 6-23 muestra que el biosólido 1 en el 2º mes se obtiene un promedio de 11.8 de desarrollo de nuevos brotes, pero que se rezagan el 3º mes, y en el 4º mes aumenta hasta 41 de promedio siendo el único mes más alto durante todo el experimento.

Con respecto al biosólido 2 en los meses del 2º al 4º mes se destaca su crecimiento, luego se empareja con el blanco, en el 6º se nota un aumento pero en el 7º mes de nuevo hay un decremento con respecto al blanco.

El número de brotes está muy ligado al número de ramas, aunque en el apartado anterior se demuestra un desarrollo muy importante en las ramas, los brotes se rezagan en su desarrollo debido a las afectaciones ambientales (plagas y plantas invasoras).



**Figura 6-10 Gráfica de número de brotes**

En la figura 6-10 se puede ver que hay un mayor promedio en los meses 2º y 3º los tratamientos (biosólido 1 y 2) y se mantienen a la par; en el 4º mes se observa un crecimiento en el biosólido 1 muy importante, pero cuando llega a tener una invasión, principalmente de plantas, su crecimiento es mermado y se queda muy por debajo del que demuestran el blanco y el biosólido 2.

El biosólido 2 en el 5º mes se mantiene a la par con el blanco, en el 6º mes demuestra un pequeño aumento, y en el 7º mes los dos tratamientos se mantienen al margen y por debajo de lo esperado por el blanco, aparte que demuestra un gran decremento el biosólido 1 debido a que de nuevo sufre una periodo de asimilación de las nuevas condiciones una vez que es desyerbado el suelo.

### **6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LOS SUJETOS EXPERIMENTALES**

Le desarrollo vegetal fue un parámetro muy importante que demostró la buena asimilación del biosólido 1 y 2 como abono, cambiando las propiedades físicas y químicas del suelo que dieron un desarrollo y sostén a los sujetos experimentales.

El desarrollo que se dio en altura de los sujetos experimentales expuestos al biosólido 2 fue muy marcado llegando a tener un promedio de 63.08 cm de altura, en cambio los sujetos expuestos al biosólido 1 se vieron mermados por la invasión de plantas que competían por los nutrientes del suelo y no los dejaron crecer, tuvieron un promedio de 54.3 cm de altura. Los sujetos que fueron tomados como blanco obtuvieron un mejor resultado que los que fueron expuestos al tratamiento de biosólido 1, estos desarrollaron un crecimiento promedio de 57.76 cm de altura.

En el resultado de número de ramas el biosólido 2 es nuevamente el que ofrece un promedio mayor con 46.6 ramas por sujeto experimental, seguido por el biosólido 1 con un promedio de 44.8 ramas por sujeto experimental y el blanco con un promedio de 34.5 ramas por sujeto experimental. Entre mayor número de ramas se desarrollen se podrá obtener una mayor área foliar que puede absorber más CO<sub>2</sub> y luz solar.

Con respecto al número de brotes el promedio más alto fue para los sujetos que fueron tomados como blanco con un valor de 34.2 nuevos brotes por sujeto experimental, seguido por el biosólido 2 con un promedio de 33.4 nuevos brotes por sujeto experimental y por último el biosólido 1 con un promedio de 19.4 nuevos brotes por sujeto experimental. El número de brotes y ramas están relacionados por lo que es área foliar puede aumentar o disminuir por estos parámetros.

Otro punto que también se observó, es que el biosólido sirve como un repelente para las plagas y que esto hace tener árboles más sanos y fuertes, que al serles retirados el tratamiento estos pueden seguir su desarrollo de forma más lenta. En cambio los sujetos que fueron el blanco necesitaron un mayor cuidado ya que las plagas fueron más agresivas y los árboles fueron más débiles.

En general el mejor tratamiento fue el biosólido 2 obteniendo mejores resultados en el suelo y los sujetos experimentales, pero también es más costoso ya que se tiene que dar un aumento en la temperatura, esto hace que se eleven los costos en el tratamiento de los lodos. Punto importante que se tiene que considerar para su futura aplicación en campo.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

#### **Con respecto a los biosólidos:**

- El proceso de estabilización fue muy importante, ya que se modificaron las características físicas y químicas del biosólido, en los dos distintos tratamientos, demostrándose durante todo el experimento.
- En ambos biosólidos no se observa gran diferencia en patógenos, sin embargo se puede ver que en los metales pesados se obtiene ligeras diferencias que se pueden establecer como error de análisis.
- Los metales presentes se encuentra en una proporción pequeña con respecto a lo establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002, lo cual muestra que el biosólido puede ser utilizado como abono en los suelos.
- En las características físicas del biosólido, se observó que tenían un color café, en el biosólido 2 era mas claro con respecto al biosólido 1. También la sedimentación fue mayor en el biosólido 2. Al secarse el biosólido 1 y 2 se obtenía un material fino, siendo el biosólido 2 el de textura más fina.
- Las pruebas de laboratorio durante la estabilización del biosólido dieron buenos resultados en patógenos y metales pesados, y llegando a clasificarlos en tipo A para el biosólido 2 y tipo B para el biosólido 1, según la NOM-004-SEMARNAT-2002.
- Tanto en el biosólido 1 como en el 2 se observaron aplicaciones para repeler plagas.
- Con ambos biosólidos se comprobó su potencial como fertilizante en el suelo y su integración por el suelo es rápida, pero el Biosólido 2 dio mejores resultados en los sujetos experimentales, aumentó la humedad en el suelo y la cantidad de plantas invasoras fue mucho menos.

#### **Con respecto al suelo, se concluye:**

- Se observan diferencias significativas en los suelos tratados (biosólido 1 y 2) en sus propiedades físicas de color, estructura, porosidad, densidad aparente y real, la permeabilidad, conductividad eléctrica, salinidad, humedad. En las propiedades químicas pH, porcentaje de MO, Fosforo Total y Nitrógeno Total, lo que contribuyó al crecimiento del cedro blanco.
- Se presento la agrupación de las partículas, iniciando el proceso de formación de estructura, lo que permite tener un suelo más fértil y capaz de sostener vida vegetal y animal.
- Se produce una acumulación de materia orgánica, nutrientes, cantidad de agua en los suelos que fueron tratados con los biosólidos 1 y 2.

- Se presento el desarrollo de insectos, lombrices de tierra, grillos y hormigas en el suelo que sirvieron de blanco, también presento poca retención de agua, una permeabilidad muy alta, poca estructura y bajo contenido de nutrientes.

**Con respecto al Desarrollo Vegetal se concluye:**

- Se presento un mayor crecimiento en los cedros, observándose en los datos tales como; altura, desarrollo del número de ramas y brotes en los cedros sometidos al tratamiento con el biosólido 2, dando una mayor área foliar.
- También se presentó el desarrollo de otro tipo de formas de vida; como musgo, pasto y plantas.
- Se observo el desarrollo de más plantas invasoras con el tratamiento con biosólido 1, que en el blanco y biosólido 2 juntos.
- Las plantas invasoras dieron flor y se desarrollaron más rápido en el tratamiento con biosólido 1.
- En el tratamiento con biosólido 1 mermó el crecimiento y desarrollo de los cedros por las plantas invasoras que ocuparon nutrientes y espacio que eran necesarios para los sujetos experimentales.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

1. Evaluar las condiciones actuales de disposición de lodos y monitorear los efectos ambientales ocasionados por esta actividad en México.
2. Promover la implementación de tecnologías de tratamiento basándose en estudios de costo-eficiencia-beneficio, adecuados para el tipo de lodos generados.
3. El biosólido es un compuesto amigable para el ser humano y que puede ser usado como fertilizante o abono en los jardines, las cosechas o cualquier área verde sin temor de causar daño a las personas o al medio ambiente que nos rodea. (Robles, *et al*, 2006)
4. El uso del biosólido debe aplicarse después de ser caracterizado.
5. Considerar que la aplicación de biosólidos puede alterar el actual equilibrio ecológico y desplazar algunas especies que pueden tener valor para la zona a tratar.
6. Por las propiedades físicas y químicas que presenta el biosólido, es necesario mantener un control en su concentración y aplicación que se le da al suelo, para evitar altas concentraciones de metales o nutrientes que se puedan trasladar hasta las aguas freáticas, provocando el aumento de éstos compuestos, provocando una nueva forma de contaminación.

7. Se necesita un estudio mayor en el uso y aplicación de los biosólidos en México, y de esta forma establecer una reglamentación y normatividad más adecuada a las condiciones de nuestro país y el entorno.
8. Al ser colocado el tratamiento en el suelo será necesario que se esté arando debido a que el material se endurece una vez que el agua penetra el suelo. El arado superficial se aconseja también para que el oxígeno esté en contacto y conserve la humedad.
9. Un monitoreo y control de plagas durante todo el experimento.
10. Evaluar la disposición final y monitorear permanentemente los efectos ambientales del manejo de los biosólidos y, efectuar cambios de ser necesario.

## BIBLIOGRAFÍA

Adriano, D. C., M., B. J., & Frankenberger, W. T. (1999). Bioremediation of Contaminated Soils. *Agronomy Series* (37), 820.

Aguilar, A. L. (1987). Materia orgánica. En J. E. Aguilar S.A., *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. (págs. 85-91). Chapingo, Estado de México: Publicación especial No. 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.

Aguilera, M., & Martínez, R. (1990). *Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera*. México DF: Universidad Autónoma Chapingo.

Anónimo. (31 de Agosto de 2009). *Wikipedia. La enciclopedia libre*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2009, de wikipedia.org: [http://es.wikipedia.org/wiki/Textura\\_del\\_suelo](http://es.wikipedia.org/wiki/Textura_del_suelo)

Bates, G. R. (1983). *Determination of pH*. New York: Wiley.

Bautista, A. A. (1993). *Guía para interpretar el análisis*. México: Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. .

Bosch, G. P. (1997). *La zeolita, Una Piedra que hierve. La Ciencia para Todos* (Segunda ed.). México: Fondo de Cultura Económico.

Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). *Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil*. (Vol. 59). Soil Sci.

Bremner, J. M. (1965). Nitrogen availability indexes. En C. B. al, *Methods of soil analysis* (Vol. Part 2. Agronomy 9; págs. 1324-1345). Am. Soc. of Agron Madison,.

Cardoso, L. V. (OCTUBRE de 2002). Aplicación en un suelo agrícola de lodos residuales tratados. *AIDIS- FEMISCA* .

Chicón, L. (2006). *Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos*. (T. d. Doctorado, Ed.) Obtenido de lycos.es: <http://usuarios.lycos.es/ambiental/lodos.html>

CONAGUA. (2008). *Estadísticas del Agua en México* (Vol. 1). (S. d. SEMARNAT, Ed.) DF, México: Secretería del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT.

Constantinidius, C. (13 de 05 de 2010). *Wikipedia La enciclopedia libre*. Recuperado el 10 de 08 de 2010, de Web de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Porosidad\\_del\\_suelo](http://es.wikipedia.org/wiki/Porosidad_del_suelo)

Crites, & Tchobanoglous. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*. Mc Graw Hill.

Cuevas, G., & Walter, I. (2004). Metales Pesados en Maíz (*Zea mays* L.) Cultivado en un Suelo Enmendado con Diferentes Dosis de Compost De Lodo Residual. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 20 (2) , 59-68.

Delschen, T. (1999). Impacts of Long Term Application of Organic Fertilizers on Soil Quality Parameters in Reclaimed Loess Soils of the Rhineland Lignit Mining Area. *Plant and Soil* (213), 43-54.

Dickerson, G. W. (06 de Septiembre de 2004). *A sustainable approach to recycling urban and agricultural organic wastes*. Recuperado el 13 de Octubre de 2010, de College of agriculture and home economics, New México. EE.UU.: [http://www.cahe.nmsu.edu/pubs/\\_h-1](http://www.cahe.nmsu.edu/pubs/_h-1)

Enciso, A. (8 de Febrero de 2010). Fracasan planes de la Conafor pese a su presupuesto creciente. *La Jornada* , pág. 41.

EPA530. (07 de Octubre de 2009). *U.S. Environmental Protection Agency 530*. Recuperado el 22 de Mayo de 2010, de U.S. Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/oecaagct/awas.html>

EPA530R99009. (1999). BIOSOLIDS GENERATION, USE AND DISPOSAL IN THE UNITED STATES. *EPA* . USA: National Service Center for Environmental Publications P.O. Box 42419 Cincinnati ,OH 45242.

Fitzpatrick, E. A. (1987). *Uso potencial del suelo. Comisión del Plan Nacional Hidráulico* (Vol. 12). México DF: Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Flores, E. G., Campante, M. A., Cruz, Y. Á., & Fernández, N. B. (2009). Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (1) , 15-22.

Gilberto, Í., Javier, P., & A., V. P. (2006). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 8. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólido-bagazo de agave durante el compostaje. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 22 (2) , 83-93.

GREENPEACE. (03 de FEBRERO de 2004). *GREENPEACE MÉXICO*. Recuperado el AGOSTO de 2009, de El gobierno es culpable de la desaparición de bosques y selvas en México: <http://www.greenpeace.org/mexico/prensa/releases/el-gobierno-es-culpable-de-la>

Grim, R. E. (1953). *Clay Mineralogy*. New York,: McGraw-Hill.

Hernandez Fernandez, O. (1998). *Analisis de factibilidad tecnico economica de tratamiento de lodos producidos por la planta tratamiento de agua residual Texcoco Norte* .: México: Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Facultad de Ingenieria. .

Hernández Fernández, O. (1998). *Análisis de factibilidad técnico económica de tratamiento de lodos producidos por la planta tratamiento de agua residual Texcoco Norte* .: México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

I. D. J. Muñoz, C. A. (2000). *Manual de análisis de suelo. Edafología*. México, DF: Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM, México.

Imperial, R. M., Beltrán, E. M., Porcel, M. A., Beringola, M. L., Martín, J. V., Calvo, R., y otros. (2003). Disponibilidad de nutrientes por el aporte de tres tipos de lodos de estaciones depuradoras. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 19 (3) , 127 - 136.

Institute, I. P. (2010). *IPNI (International Plant Nutrition Institute)*. Recuperado el 22 de Julio de 2010, de [http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page](http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page)

Karma, A. (1993). *Chemical properties of organic soils. In: Soil sampling and methods of analysis*. (M. R. Carter, Ed.) Canada: Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.

Krogmann U., I. B. (1997). Biosolids and Sludge Management. *Water Environment Research* (64), 534-550.

Larney, F. J. (1996). Restoration of Productivity Desurfaced Soil chith Livestock Manure, Crop Residue and Fertilizer Amendments. *Soil Science Soc. Amer. J.* (88), 921-927.

Linares, L. C., Avelizapa, N. G., & Carrillo, T. G. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. México, D.F.: Instituto Mexicano del Petróleo y el Instituto Nacional de Ecología.

Metcalf & Eddy, I. (2003). *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse* (Fourth ed.). Mc Graw- Hill.

Miliarium Aureum, S. (2004). *Miliarium.com Ing. Civil y Medio Ambiente*. Recuperado el 26 de 05 de 2010, de [Miliarium.com: http://www.miliarium.com/Proyectos/Depuradoras/Fangos/Tratamientos.asp](http://www.miliarium.com/Proyectos/Depuradoras/Fangos/Tratamientos.asp)

Miramintes, F. B., Arroyo, V. L., Perez, S. D., & Alva, R. M. (1999). *Manual de Técnicas Selectas de Análisis Químico y Físico de Suelo*. Xochimilco, México. DF.: División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Dpto. de Producción Agrícola y Animal.UAM.

Mujeriego, R. (1990). *Riego con Aguas Residuales Municipales Regeneradas. Manual Práctico*. Cataluya, España: La Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya y la Universidad Politécnica de Cataluya 1a. edición.

Muñoz I. D. J., M. C. (2000). *Manual de análisis de suelo. Edafología*. México: UNAM.

N.Flores, S. (2001). *Utilización de lodos residuales en la restauración de suelos contaminados con hidrocarburos. Tesis de licenciatura*. Cuernavaca, Morelos, México.: UAEM.

NOM-004-SEMARNAT. (Abril de 2002). SEMARNAT. Recuperado el Agosto de 2009, de [http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/contaminación/suelo/barros/legislacion/mexico\\_nom\\_004\\_2002.pdf](http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/contaminación/suelo/barros/legislacion/mexico_nom_004_2002.pdf)

NOM-004-SEMARNAT. (24 de Septiembre de 2002). SEMARNAT. Recuperado el Agosto de 2009, de [Diario Oficial de la Federación: http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/contaminación/suelo/barros/legislacion/mexico\\_nom\\_004\\_2002.pdf](http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/contaminación/suelo/barros/legislacion/mexico_nom_004_2002.pdf)

NOM-021-RECNAT. (31 de Diciembre de 2000). SEMARNAT. Recuperado el 12 de Octubre de 2009, de [Diario Oficial de la Federación: http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf)

Ortiz, V. B., & Ortiz, S. (1990). *Edafología*. México, DF México: Universidad Autónoma de Chapingo.

Pabello, D. V. (2006). *Atlas de Ciliados y otros Microorganismos frecuentes en Sistema de Tratamiento Aerobio de Aguas Residuales*. (L. L. Gonzalés, Ed.) México DF, DF, México: UNAM. Fac. de Química. Departamento de Biología. Lanoratorio de Microbiología Experimental.

Ramalho, R. S. (1991). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: Reverté S.A.

Robles, A. N., Méndez, R. B., Ortiz, M. E., & Cabirol, J. M.-S. (2006). *Estabilización de lodos de desecho de plantas de tratamiento*. México D.F.: Instituto de Ingeniería.

Ruben, V. G. (Enero de 2003). *Aplicación de Biosólidos Provenientes de una Planta de Tratamiento*. 29-42. DF México, México: UNAM Tesis de Posgrado en Ingeniería (Ambiental).

SEMARNAT. (2008). *COMPENDIO DE ESTADÍSTICAS AMBIENTALES 2008*. Recuperado el 05 de MAYO de 2010, de SNIAN: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd\\_compendio08/compendio\\_2008/03\\_forestales8.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/03_forestales8.html)

Sullivan, D. (1998). *Fertilizing with Biosolids*. Oregon State University: Extension Service.

Switzenbaum, M. S. (1997). Defining Biosolids Stability. *J. Environ. Eng.* (123), 1178-1184.

Tamhane, R., Motiramani, D., Bali, Y., & Donahue, R. L. (Mayo de 1986). *Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales*. New Delhi, India: Diana.

Tiessen, H., & J., O. M. (1993). *Total and organic carbon*. In: *Soil sampling and methods of analysis*. (M. R. Carter, Ed.) Canada: Lewis Publishers. Canadian Society of Soil Science.

Topp, G. C. (1993). *Soil water content*. In: *soil sampling and methods of analysis*. (M. R. Carter, Ed.) Canada: Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.

Torri, S., & Alvarez, R. y. (2003). Mineralization of Carbin from Sewage Sludge in Three Soils of the Argentine Pampas. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* (34), 2035-2043.

Velásquez, A., Mas, J., Díaz-Gallegos, J., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., y otros. (2002). *Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México*. (Vol. Gaceta 62). México, DF.: SEMARNAT.

WEF. (1998). *Design of Wastewater Treatment Plants, 4th ed., Manual of Practice no. 8*, (Vol. 3). Alexandria, VA.: Water Environment Federation, .

WEF. (1995). *Wastewater Residual Stabilization. Manual of Practice no. FD-9*. Alexandria. VA: Water Environment Federation.

Willard H. H., M. L. (1974). *Instrumental methods of analysis*. (5. edition, Ed.) Van Nostrand.

Yong, R. N. (2000). *Geoenvironmental Engineering/ Contaminated Soils, Pollutant Fate and Migration*. Florida United States of America: CRC Press.

# ANEXO A

## PROPIEDADES FÍSICAS

### **1. Estructura**

Por estructura del suelo se entiende al 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 arcillas 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 peds o gránulos. (Aguilera M, 1990). La estructura influye en la permeabilidad, el drenaje, la aireación y el desarrollo de raíces, afectándose la productividad del suelo y las labores de labranza.

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 pocas ventajas 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, 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 (Fitzpatrick, 1987). 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 %. 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.

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. 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 material fecal granular que se ramifica a través de las áreas con otras formas de agregados.

#### 1.1 Determinación de textura (tamaño de las partículas de los suelos)

La textura del suelo es la proporción relativa por tamaños de partículas de arena, limo y arcilla; las cuales al combinarse permiten categorizar al suelo en una de las 12 clases texturales.

##### ➤ *Método*

La determinación del tamaño de partículas del suelo puede realizarse, entre otros métodos, por el procedimiento de la pipeta.

##### ➤ *Interferencias*

En el caso de suelos contaminados con hidrocarburos, si no se realiza una buena eliminación de la materia orgánica (que incluye a los hidrocarburos), ésta puede interferir con la determinación.

##### ➤ *Principio y aplicación*

El método de la pipeta es un procedimiento de muestreo directo que consiste en tomar una submuestra (alícuota) de una suspensión de suelo en agua, donde se está llevando a cabo un proceso de sedimentación, determinando el tipo de partícula en función de su velocidad de sedimentación.

La submuestra es tomada a una profundidad  $h$  y a un tiempo  $t$ , en el que todas las partículas con diámetro mayor o igual que 0.002 mm han sedimentado, teniéndose en las alícuotas únicamente partículas pertenecientes a la fracción arcillosa. El método se basa en la Ley de Stokes.

##### ➤ *Cálculos*

#### **Porcentaje de Arena**

$$\% \text{ de arena} = \left( \frac{B}{A} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

A = peso de la muestra.

B = peso de arenas.

### Porcentaje de Arcilla

$$\% \text{ de arcilla} = \left(\frac{E}{A}\right) \times 100 \quad (2)$$

C = peso de arcilla + limo = (A - B).

### Porcentaje de Limo

$$\% \text{ de limo} = \left(\frac{F}{A}\right) \times 100 \quad (3)$$

D = peso del suelo en la alícuota (partículas < 0.002 mm).

E = peso de arcilla = D x 8.

F = peso del limo = A - B - E.

Con los porcentajes de arena, limo y arcilla y mediante el uso del triángulo de textura se determina la textura del suelo.

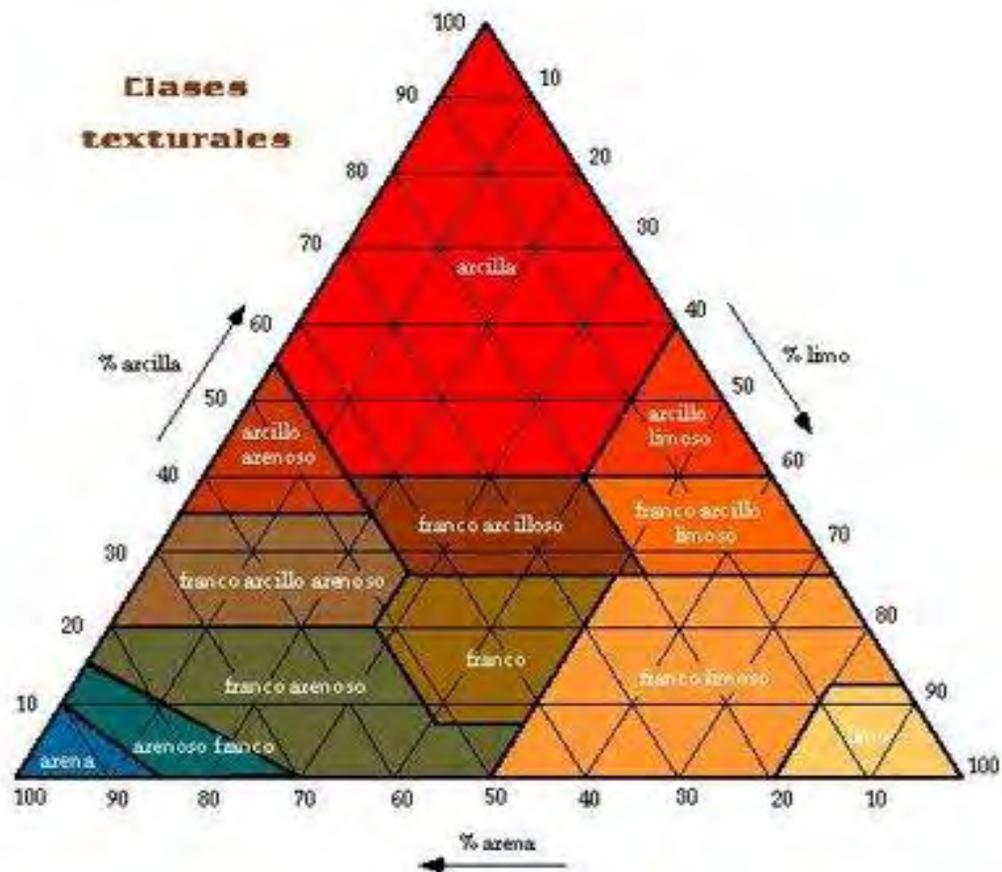


Figura A-1 Triángulo de textura del sistema de clasificación de la USDA.

## **2. Porosidad**

El espacio poroso en los suelos es importante dado que éstos se encuentran totalmente llenos de agua y/o 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 poros del mismo. (Fitzpatrick, 1987).

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 los peds. Esto se observa en aquellos casos donde los poros se formaron por encogimiento y rajaduras. 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.

Esta determinación se realizó saturando con agua una muestra de suelo seco a la estufa (105 °C por 24 horas) de volumen y masa conocidos. Una vez saturado el suelo se determinó nuevamente la masa y se calculó la porosidad con la relación siguiente:

### **Porosidad**

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (4)$$

Donde :

n= Porosidad

V<sub>v</sub>= volumen de espacio vacío

V<sub>t</sub>= volumen total

La porosidad puede ser determinada por la fórmula:

### **Porosidad por medio de densidades**

$$P = \frac{S - S_a}{S} * 100 \quad (5)$$

Donde:

- P = porosidad en porcentaje del volumen total de la muestra;
- S = densidad real del suelo;
- Sa = densidad aparente del suelo.

En líneas generales la porosidad varía dentro de los siguientes límites:

**Tabla A-1 Límites de porosidad**

• <b>Suelos ligeros: 30 – 45 %</b>	• <b>Suelos medios: 45 – 55 %</b>
• <b>Suelos pesados: 55 – 75 %</b>	• <b>Suelos turbosos: 75 – 90 %</b>

(Constantinidius, 2010)

## 2.1 Densidad Aparente

### ➤ *Método*

La densidad aparente de una muestra de suelo por terrón parafinado se calcula a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso. En el caso de la masa, ésta se conoce pesando la muestra (terrón) y en el caso del volumen, éste es determinado de manera indirecta recubriendo el terrón con una capa de parafina y pesándolo sumergido en un líquido (agua). (NOM-021-RECNAT, 2000)

### ➤ *Cálculos*

#### **Volumen de agua desplazada por el terrón**

$$(Ptp)a - (Ptp)w = \text{considerando una } w = 1 \frac{g}{cm^3} \text{ que es igual } (Vt + Vp) \quad (6)$$

#### **Peso de la parafina (Pp)**

$$(Ptp)a - (Pt)a = \text{peso de la parafina } (Pp) \quad (7)$$

#### **Volumen de la parafina (Vp)**

$$Pp = Vp = \text{Volumen de la parafina } (Vp) \quad (8)$$

## Densidad aparente

$$(V_t + V_p) - V_p = \text{Volumen del } \frac{(Pt)_a}{\rho_w} = \text{Densidad aparente} \quad (9)$$

W = densidad de H<sub>2</sub>O

P = Densidad de la parafina (0.90 g/cm<sup>3</sup>)

(Pt)<sub>a</sub> = Peso del terrón al aire

(Ptp)<sub>a</sub> = Terrón parafinado al aire

(Ptp)<sub>w</sub> = Peso del terrón sumergido en el agua

Tabla A-2 Interpretación de resultados de densidad aparente

TIPOS DE SUELO	g/ cm <sup>3</sup>
Orgánicos y volcánicos	Menor de 1.00
Minerales	
Arcillosos	1.0 – 1.19
Francosos	1.20 – 1.32
Arenosos	Mayor de 1.32

## 2.2 Densidad Real

### ➤ Método

La densidad real de un suelo puede ser calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa y el volumen de una cierta cantidad de suelo. La masa es determinada pesando directamente el suelo y el volumen de manera indirecta por el cálculo de la masa y la densidad del agua ( o cualquier otro fluido) desplazado por la muestra de suelo. (NOM-021-REC/NAT, 2000).

### ➤ Cálculos

#### Peso de las partículas del suelo (ps)

$$ps = (Pm) - (R) \quad (10)$$

#### Volumen de las partículas del suelo (VS)

$$VS = \frac{(tm) - (R)}{\rho_w} - \frac{(PmA) - (Pm)}{\rho_w} = \frac{\text{Peso del agua desplazada por partículas del suelo}}{\text{Densidad del Agua}} \quad (11)$$

## Densidad real

$$Densidad\ real\ (ps) = \frac{ps}{Vs} \quad (12)$$

Pm = Peso muestra con recipiente

R = Peso del recipiente vacío

tm = temperatura de la muestra con agua

PmA = Peso del matraz aforado

Pw = densidad del agua

### 3. Permeabilidad y conductividad hidráulica

Al aplicar el riego, la permeabilidad del suelo se ve modificada. 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. (Yong, 2000)

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. En dado el caso de que se presente una mala permeabilidad, 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 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. Las clases propuestas para indicar la permeabilidad se consideran la siguiente tabla.

Tabla A-3 Coeficientes de permeabilidad

Intervalo	cm/hora	m/s
<b>Muy Lenta</b>	Menos de 0.15	Menos de $4.16 \cdot 10^{-7}$
<b>Lenta</b>	De 0.15 a 0.5	De $4.16 \cdot 10^{-7}$ a $1.38 \cdot 10^{-6}$
<b>Moderada</b>	De 0.5 a 15	De $1.38 \cdot 10^{-6}$ a $4.16 \cdot 10^{-5}$
<b>Rápida</b>	De 15 a 25	De $4.16 \cdot 10^{-5}$ a $6.94 \cdot 10^{-5}$
<b>Muy Rápida</b>	Más de 25	Más de $6.94 \cdot 10^{-5}$

La medición se hizo directamente en la columna empacada con suelo manteniendo una carga constante de agua sobre la columna mientras se media el gasto que fluía hacia el drenaje de la columna. La conductividad hidráulica se calculó con la ecuación de Darcy:

#### Ecuación de Darcy

$$k = \frac{Q}{Ai} \quad (13)$$

Donde:

k= conductividad hidráulica (m/s)

Q= gasto (m<sup>3</sup>/s)

A=área de la sección de la columna (m<sup>2</sup>)

i= gradiente hidráulico,  $i=h/l$ , con h=altura de la columna de agua y l=longitud de la columna de suelo.

#### 3.1 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica, que generalmente se expresa en mmhos/cm o en mSiemens/m; la NOM-021-RECNAT-2002 establece dSiemens/m a 25°C. Es una propiedad de las soluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos. La determinación de la conductividad eléctrica es por lo tanto una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo. (NOM-021-RECNAT, 2000)

De acuerdo con los valores de conductividad eléctrica, pH y porcentaje de sodio intercambiable, los suelos se pueden clasificar en las siguientes categorías:

a) Suelos salinos. Se caracterizan porque su extracto de saturación tiene un valor de conductividad eléctrica igual o superior que 4 mmhos/cm a 25°C y la cantidad de sodio intercambiable es menor de 15%. Por lo general tienen una costra de sales blancas, que pueden ser cloruros, sulfatos y carbonatos de calcio, magnesio y sodio.

b) Suelos sódicos. Presentan un color negro debido a su contenido elevado de sodio. Su porcentaje de sodio intercambiable es mayor que 15, el pH se encuentra entre 8.5 y 10.0, y la conductividad eléctrica está por debajo de 4 mmhos/cm a 25°C.

c) Suelos salino-sódicos. Poseen una conductividad eléctrica de 4 mmhos/cm a 25°C, una concentración de sodio intercambiable de 15% y el pH es variable, comúnmente superior a 8.5 (I. D. J. Muñoz, 2000).

La conductividad eléctrica se puede complementar con la determinación de Na<sup>+</sup> o bases intercambiables (K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>). Principalmente si los suelos fueron contaminados con aguas congénitas. (Linares, *et al*, 2006).

#### ➤ *Método*

El método de la conductividad eléctrica se realiza por medio de un conductímetro sobre una muestra de agua o extracto de suelo.

#### ➤ *Fundamento*

Este método se basa en la teoría de la disociación electrolítica. Es aplicable a aguas o extractos de suelo. El equipo para medir la conductividad eléctrica es un conductímetro, que consiste en dos electrodos colocados a una distancia fija y con líquido entre ellos. Los electrodos son de platino y en ocasiones pueden llevar un recubrimiento de platino negro o grafito; éstos se encuentran sellados dentro de un tubo de plástico o vidrio (celda), de tal manera que este aparato puede ser sumergido en el líquido para medir. La resistencia eléctrica a través de los electrodos se registra a una temperatura estándar, generalmente 25°C.

#### ➤ *Interferencias*

La temperatura afecta la conductividad y varía alrededor de 2% por cada grado Celsius. Para esta determinación no se permite la preservación química de las muestras.

#### ➤ *Cálculos*

La unidad estándar de conductividad eléctrica es el siemens/metro (S/m = Ohm/m), pero para evitar la expresión de resultados en pequeñas fracciones decimales se usa generalmente una unidad más pequeña: el miliSiemens/metro (mS/m). Aunque la conductividad generalmente es reportada en µmhos/cm.

#### **Equivalencia de ms/m a µmhos/cm**

$$1 \text{ mS/m} = 10 \text{ µmhos/cm.} \quad (14)$$

Para convertir la conductividad eléctrica en unidades de salinidad, se toma el valor de referencia de una solución de NaCl 0.05 N con una conductancia de 604 µmhos/cm a 25°C como el factor, que al multiplicarlo por la conductividad expresa la salinidad.

## Salinidad

$$\text{Salinidad} = \text{mhos/cm} * 604 \quad (15)$$

Tabla A-4 Criterios para evaluar la salinidad de un suelo, con base en su conductividad

Categoría del suelo	Valor (mmhos/cm o ds/m)
No salino	0-2.0
Poco salino	2.1 – 4.0
Moderadamente salino	4.1 – 8.0
Muy salino	8.1 – 16.0
Extremadamente salino	> 16.0

(Bautista, 1993) (Linares, Avelizapa, & Carrillo, 2006)

### 3.2 Capacidad de Intercambio Catiónico

Todas las moléculas, en mayor o menor medida, tienen minúsculas cargas eléctricas, positivas y/o negativas. Por ello, en el suelo actúan como pequeños imanes, formando entre ellas estructuras que pueden ser muy simples, como la atracción entre una partícula de arcilla cargada negativamente y una partícula de un fertilizante cargada positivamente; o muy complejas, como cuando hay materia orgánica, con infinidad de cargas eléctricas de ambos signos.

La CIC o capacidad de intercambio catiónico es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales. Esta capacidad aumenta con la presencia de materia orgánica, y podría decirse que es la base de lo que llamamos fertilidad del suelo. Cation, ión cargado positivamente ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) o anión, ión cargado negativamente ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc.).

La CIC depende de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica. En general, entre más arcilla y materia orgánica en el suelo, la capacidad de intercambio es mayor. El contenido de arcilla es importante, debido a que estas pequeñas partículas tienen una relación alta de área superficial a volumen. Los diferentes tipos de arcillas presentan diferentes valores de la CIC. Las esmectitas tienen una mayor capacidad de intercambio catiónico (80-100 miliequivalentes  $100 \text{ g}^{-1}$ ), seguida por ilitas (15-40 meq  $100 \text{ g}^{-1}$ ) y caolinitas (3-15 meq  $100 \text{ g}^{-1}$ ).

Algunos ejemplos de valores de capacidad de intercambio catiónico para diferentes texturas de suelo se mencionan a continuación:

Tabla A-5 Textura de suelo y CIC

Textura de suelo	CIC (meq/100 g suelo)
Arenas (color claro)	3 – 5
Arenas (color oscuro)	10 – 20
Francos	10 – 15
Franco limoso	15 – 25
Arcilla y franco arcilloso	20 – 50
Suelos orgánicos	50 – 100

En general, en la mayoría de los suelos la CIC aumenta cuando se presentan incrementos en el pH.

➤ *Método*

Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) de los suelos, empleando acetato de amonio.

➤ *Principio y aplicación*

El método para la determinación consiste en la saturación de la superficie de intercambio con un catión índice, el ión amonio; lavado del exceso de saturante con alcohol; desplazamiento del catión índice con potasio y determinación del amonio mediante destilación. El amonio se emplea como catión índice debido a su fácil determinación, poca presencia en los suelos y porque no precipita al entrar en contacto con el suelo. La concentración normal que se usa asegura una completa saturación de la superficie de intercambio, y como está amortiguada a pH 7.0, se logra mantener un cierto valor de pH. El lavado con alcohol pretende desplazar el exceso de saturante y minimizar la pérdida del amonio adsorbido. (Linares, et al, 2006) (NOM-021-RECNAT, 2000).

➤ *Cálculos*

La capacidad de intercambio catiónico expresado en  $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$  de suelo (CIC) se calculará de la forma siguiente:

**Capacidad de intercambio catiónico**

$$\text{CIC} = (F) (V) (N). \quad (16)$$

En donde:

V = volumen (ml) de HCl empleado al titular lo destilado en la solución borada.

N = normalidad del HCl; y

## Determinación de F

$$F = \frac{100}{\text{Al cuota}} * \frac{100}{\text{Peso del suelo}} \quad (17)$$

Si la alícuota = 10 ml y peso de suelo = 5 g, entonces F= 200.

## Determinación de Ca y Mg intercambiables

### Determinación de Ca

$$Ca (cmol (+)kg^{-1}) = (a - b) * \frac{100}{100} * 20 * \frac{1000}{10 w} * \frac{2}{40.08} = 9.98 * \frac{a-b}{w} \quad (18)$$

### Determinación de Mg

$$Mg(Cmol (+)kg^{-1}) = (a - b) * \frac{100}{1000} * 20 * \frac{1000}{10 w} * \frac{2}{24.32} = 16.447 * \frac{a-b}{w} \quad (19)$$

Donde:

a = concentración de Ca o Mg medida en la muestra (mg L-1).

b = concentración de Ca o Mg medida en el blanco (mg L-1).

w= peso del suelo seco (g).

## Determinación de Na y K intercambiables

### Determinación de Na

$$Na (cmol (+)kg^{-1}) = (a - b) * \frac{100}{100} * 10 * \frac{1000}{10 w} * \frac{1}{23} = 4.347 * \frac{a-b}{w} \quad (20)$$

### Determinación de K

$$K (cmol (+)kg^{-1}) = (a - b) * \frac{100}{100} * 10 * \frac{1000}{10 w} * \frac{1}{39.1} = 2.557 * \frac{a-b}{w} \quad (21)$$

Donde:

a = concentración de Na o K medida en la muestra (mg L-1).

b = concentración de Na o K medida en el blanco (mg L-1).

w= peso del suelo seco (g).

### ➤ *Comentarios*

La CIC no deberá expresarse como meq/100 g, ya que las unidades aceptadas por el Sistema Internacional (SI) son cmol(+) kg-1, pero para que los valores de la

CIC sean familiares se dividirán entre 100. Por lo tanto, la CIC es expresada como cmol (+) kg<sup>-1</sup>. El signo (+) es añadido para indicar que la CIC deberá ser expresada como moles de cationes monovalentes; por lo tanto, los iones divalentes cuentan el doble.

➤ *Interpretación de resultados de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)*

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una propiedad química a partir de la cual es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente, de la magnitud de la reserva nutrimental y del grado de intemperismo de los suelos. El resultado numérico de la determinación sirve además como base en el cálculo del porcentaje de saturación de bases, que es un dato ampliamente usado en los estudios de fertilidad. Para poder inferir sobre los minerales arcillosos presentes en los suelos hay que considerar la medición hecha por (Grim, 1953) en los silicatos laminares del tipo 1:1 y 2:1, empleando acetato de amonio 1 N, pH 7.0.

**Tabla A-6 Tipo de arcilla & CIC**

<b>Grupo</b>	<b>CIC (Cmol (+) kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Caolinitas</b>	3 – 15
<b>Esmectitas</b>	80 – 150
<b>Micas hidratadas</b>	10 – 40
<b>Vermiculitas</b>	100 – 150
<b>Cloritas</b>	10 – 40

Con respecto al grado de intemperismo, se considera que un valor de CIC inferior que 10 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo en un horizonte B con más de 30 a 40% de arcilla indica tanto la ausencia de minerales primarios intemperizables, como la acumulación de minerales secundarios del grupo caolinítico y óxidos libres. Por lo que respecta a la reserva nutrimental se considera que ésta es abundante cuando la CIC es mayor que 25 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo. La fertilidad de los suelos se puede clasificar de acuerdo con los resultados analíticos obtenidos con métodos apropiados tanto en suelos ácidos como alcalinos. (Linares, *et al*, 2006) (NOM-021-RECNAT, 2000)

**Tabla A-7 Interpretación de CIC**

<b>Clase</b>	<b>CIC (cmol(+) kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Muy alta</b>	➤ 40
<b>Alta</b>	25 – 40
<b>Media</b>	15 – 25
<b>Baja</b>	5 – 15
<b>Muy Baja</b>	➤ 5

Los niveles de calcio, magnesio y potasio (Ca, Mg y K) obtenidos de los análisis de las bases intercambiables pueden interpretarse como se indica en la tabla 8.

**Tabla A-8 Niveles de Ca, Mg y K**

Clase	Cmol (+) Kg <sup>-1</sup>		
	Ca	Mg	K
<b>Muy baja</b>	< 2	< 0.5	< 0.2
<b>Baja</b>	2 – 5	0.5 – 1.3	0.2 – 0.3
<b>Media</b>	5 – 10	1.3 – 3.0	0.3 – 0.6
<b>Alta</b>	➤ 10	➤ 3.0	➤ 0.6

#### **4. Contenido de Agua**

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. Además, intemperiza las rocas y los minerales, ioniza los macro y micronutrientes que las plantas toman del suelo, y permite que la materia orgánica sea fácilmente biodegradable. El contenido de agua en el suelo puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudicial.

El exceso de agua en los suelos favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (Topp, 1993).

Aunque es recomendable determinar el contenido de agua a la capacidad de campo de los suelos, es decir, la cantidad de agua que un suelo retiene contra la gravedad, cuando se deja drenar libremente; en algunas ocasiones, cuando se trata de suelos contaminados, por ejemplo con hidrocarburos del petróleo, es difícil llevar a cabo esta medición por la dificultad de rehidratar suelos secos con estas características. Por lo que la medición de humedad se realiza sólo en función del porcentaje de agua que retiene este tipo de suelos (Linares, *et al*, 2006) (NOM-021-RECNAT, 2000)

##### ➤ *Método*

El método utilizado para esta medición es el gravimétrico, para determinar únicamente la cantidad de agua de los suelos.

### ➤ *Fundamento*

El contenido de agua en el suelo se calcula por la diferencia de peso entre una misma muestra húmeda, y después de haberse secado en la estufa hasta obtener un peso constante.

#### **Porcentaje Contenido de agua**

$$\% \text{ Contenido de agua en el suelo} = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso final})}{\text{Peso inicial}} * 100 \quad (22)$$

## **PROPIEDADES QUIMICAS**

### **1. Determinación de pH**

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). (Linares, *et al*, 2006). El pH es el logaritmo negativo de la concentración de 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.

La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es determinado por medio de un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación de suelo-agua, y expresado en términos de la escala de pH. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad. (Linares, *et al*, 2006).

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. (Miramintes, *et al*, 1999).

### ➤ *Método*

Para la determinación del pH se utiliza el método potenciométrico (Willard H. H., 1974) (Bates, 1983).

### ➤ *Fundamento*

El método potenciométrico o electroquímico para medir pH de un suelo es el más utilizado. Con este método se mide el potencial de un electrodo sensitivo a los iones H<sup>+</sup> (electrodo de vidrio) presentes en una solución problema; se usa como

referencia un electrodo cuya solución problema no se modifica cuando cambia la concentración de los iones por medir, que es generalmente un electrodo de calomelano o de Ag/AgCl. El electrodo, a través de sus paredes, desarrolla un potencial eléctrico. En la práctica se utilizan soluciones amortiguadoras, de pH conocido, para 20 calibrar el instrumento y luego comparar, ya sea el potencial eléctrico o el pH directamente de la solución por evaluar.

➤ *Interferencias*

Debido a que el pH del suelo es medido en una matriz acuosa como agua o una solución de sales diluidas, es dependiente del grado de dilución (relación suelo-dilución). Cuando se mide en agua es importante controlar el agua adicionada, ya que un aumento causará un incremento en pH; por ello es necesario mantener la relación constante y tan baja como sea posible. Sin embargo, la solución sobrenadante puede no ser suficiente para sumergir el electrodo apropiadamente, sin causar mucho estrés cuando se inserta dentro del suelo. Los suelos con alta cantidad de materia orgánica tienden a formar una gruesa pasta seca, por lo que una relación menor de muestra en agua puede ser aceptable (1:5 o 1:10) (Karma, 1993) (Linares, *et al*, 2006)

**Tabla A-9 Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH**

<b>Categoría valor de pH</b>	
<b>Fuertemente ácido</b>	< 5.0
<b>Moderadamente ácido</b>	5.1 – 6.5
<b>Neutro</b>	6.6 – 7.3
<b>Medianamente alcalino</b>	7.4 – 8.5
<b>Fuertemente alcalino</b>	8.5

**2. 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 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, 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 de tal 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 & 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 arcillas, se tornan físicamente inmanejables, por lo que a los suelos arenosos les falta cuerpo y capacidad para retener los nutrimentos. (Ortiz & 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.

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:

**Tabla A-10 Porcentajes de flora y fauna en suelo**

<b>Hongos / algas</b>	40%
<b>Bacterias / actinomycetes</b>	40%
<b>Gusanos de tierra</b>	12%
<b>Macrofauna</b>	5%
<b>Micro / meso fauna</b>	5%

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 hayan empleado fertilizantes químicos. (Ortiz & Ortiz, 1990)

➤ *Método*

Se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclar con ácido sulfúrico concentrado.

➤ *Fundamento*

Después de un cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de  $Fe^{3+}$  y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar.

➤ *Cálculos*

Calcular la cantidad de materia orgánica contenido en el suelo con la ecuación lineal de la curva estándar.

**Porcentaje de materia orgánica**

$$10(1 - S/B)(k') = \%MO \quad (23)$$

Donde:

10= ml de Dicromato de potasio agregado en la muestra

S= ml de la solución de sulfato ferroso consumido durante la titulación

B= ml de la solución ferrosa, gastados en la titulación del blanco

K`= factor derivado

#### Factor derivado para materia orgánica

$$K' = 1N * 0.003 * (1.72/0.77) * (100/0.5 \text{ g}) = 1.34 \quad (24)$$

Donde

N= normalidad de la solución de dicromato de potasio

0.033= peso miliequivalente del carbono

1.72 = factor de conversión del carbono a MO

0.5 g = peso de la muestra del suelo

A partir del contenido total de carbono orgánico se puede estimar el contenido de materia orgánica; suponiendo de forma convencional que la materia orgánica contiene 58% de carbono. Así, el contenido de carbono orgánico se multiplica por el factor 1.724 para obtener el contenido de materia orgánica (Aguilar, 1987).

**Tabla A-11 Interpretación del contenido de materia orgánica en suelo.**

Materia orgánica (%)		
Clase	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
<i>Muy bajo</i>	< 4.0	< 0.5
<i>Bajo</i>	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
<i>Medio</i>	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
<i>Alto</i>	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
<i>Muy alto</i>	> 16.1	> 6.0

### **3. Fósforo Total**

El fósforo elemental (P) no se encuentra en estado libre en la naturaleza porque se oxida muy fácilmente; sin embargo, son muy comunes los compuestos orgánicos y principalmente minerales que contienen fósforo.

En términos generales, el fósforo del suelo se clasifica en fósforo orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos que forme. La forma orgánica se encuentra en el humus y la materia orgánica, y sus niveles en el suelo pueden variar desde 0 hasta mayores que 0.2%. La fracción inorgánica está constituida por compuestos de hierro, aluminio, calcio y flúor, entre otros, y

normalmente son más abundantes que los compuestos orgánicos. Solo una pequeña parte del P aparece en solución en suelo (< 0.01-1 mg L<sup>-1</sup>).

El P es un macronutriente esencial para las plantas y los microorganismos, junto con el nitrógeno y el potasio. Puede ser un nutriente limitante, ya que es un componente de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos. Los análisis de P sirven fundamentalmente para el control de la dosificación de productos químicos en tratamientos de agua o suelos, o como un medio para determinar que un sistema presenta contaminación por exceso de este compuesto (I. D. J. Muñoz, 2000).

#### ➤ *Método*

Para la medición del P soluble se utiliza el método de Bray (Bray & Kurtz, 1945), el cual fue modificado en la parte de extracción del P. La cuantificación se lleva a cabo por colorimetría. Este método se emplea como índice del P aprovechable en suelos con pH neutro y ácido (NOM-021-RECNAT, 2000). Para suelos neutros y alcalinos se utiliza el método Olsen.

#### ➤ *Fundamento*

Este método se basa en la extracción de las formas de fósforo fácilmente solubles, principalmente fosfatos de calcio y una fracción de los fosfatos de aluminio y hierro, con la combinación de ácido clorhídrico y fluoruro de amonio. El fluoruro de amonio disuelve los fosfatos debido a la formación de un ión complejo con estos compuestos, cuando se encuentran en solución ácida. Este método ha dado buenos resultados en suelos ácidos y aceptables en suelos con pH neutros.

El límite de detección de la técnica va de 1 a 10 ppm de P y en caso de tener extractos más concentrados se recomienda hacer las diluciones necesarias para obtener mediciones de absorbancia entre 0.02 y 0.5.

#### ➤ *Interferencias*

Los detergentes que contienen fosfatos pueden interferir en la cuantificación del P, por lo que se recomienda no utilizarlos para lavar el material.

#### ➤ *Cálculos*

##### **Determinación de P**

$$P(\text{mg Kg}^{-1} \text{ de suelo}) = CC * \frac{V_i}{p} * \frac{V_f}{a} \quad (25)$$

Donde:

CC = mg L<sup>-1</sup> de P en la solución

Vi= Volumen de la solución extractora adicionada

p = peso de la muestra de suelo seca al aire

Vf = volumen final de la solución seca al aire

A= alícuota de la muestra empleada para la cuantificación

➤ *Interpretación de resultados Fósforo*

Los resultados de los análisis pueden interpretarse de forma aproximada

**Tabla A-12 Criterios para determinar el fósforo**

<b>Clase</b>	<b>mg Kg<sup>-1</sup> de P</b>
<b>Bajo</b>	< 5.5
<b>Medio</b>	5.5 – 11
<b>Alto</b>	➤ 11

#### **4. Nitrógeno Inorgánico**

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes de la Tierra, pues en su forma gaseosa (N<sub>2</sub>) constituye 78% de la atmósfera. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su propia dinámica y a su ciclo biogeoquímico. El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire.

Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a sus tejidos. Cuando dichos organismos se mueren, el nitrógeno reingresa al suelo completando el ciclo. Este ciclo es complejo e involucra una serie de reacciones y organismos con diferentes metabolismos. Siempre comienza con compuestos orgánicos sencillos (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) y termina con compuestos orgánicos complejos; que a través de la descomposición regresan a la etapa de compuestos sencillos.

En los microorganismos la carencia de nitrógeno puede afectar el crecimiento, por lo que la población microbiana no tendrá un desarrollo óptimo. En contraste, demasiado nitrógeno permite el crecimiento microbiano rápido y acelera la descomposición; pero puede crear problemas de olor en condiciones anaerobias. Además, el exceso de nitrógeno puede ser liberado como amoniaco; en tanto que el nitrógeno aprovechable escapará en forma de gas. Para la mayoría de los materiales una relación C/N cercana a 10:1 mantendrá estos elementos en

equilibrio aproximado. En los suelos normalmente el contenido de nitrógeno varía de 0.05 a 2% en sus diferentes formas. (Linares, *et al*, 2006)

➤ *Método*

La determinación de nitrógeno se realiza con el método Micro-Kjeldahl (Bremner, 1965).

➤ *Fundamento*

Se basa en la extracción del amonio intercambiable por equilibrio de la muestra de suelo con KCl 2 N y su determinación por destilación mediante arrastre de vapor en presencia de MgO. La adición de la aleación de Devarda permite incluir la determinación de nitratos y nitritos.

➤ *Cálculos*

Calcular la cantidad de nitrógeno con la siguiente ecuación:

**Determinación de N**

$$N(ppm) = (M - B) * N * 14 * (Vi/a) * 1/p * 1000 \quad (26)$$

Donde:

M y B = Son los mililitros de ácidos sulfúrico usados en la titulación de muestra y el blanco, respectivamente.

N = La normalidad del ácido.

Vi = Es el volumen del extractante.

a = La alícuota destilada.

p = el peso de la muestra en gramos.

➤ *Interpretación de resultados de Nitrógeno*

Los resultados de los análisis de nitrógeno inorgánico pueden interpretarse conforme (NOM-021-RECNAT, 2000)

**Tabla A-13 Interpretación de Resultados de Nitrógeno**

Clase	N en el Suelo mg Kg <sup>-1</sup>
<b>Muy bajo</b>	0 – 10
<b>Bajo</b>	10 – 20
<b>Medio</b>	20 – 40
<b>Alto</b>	40 – 60
<b>Muy Alto</b>	➤ 60

## ANEXO B

### 1. Calendario de Actividades del Reactor

FECHA	CANTIDAD	PARÁMETRO	OBSERVACIONES
11 de marzo de 2009	20 lt	Lodo crudo	Acondicionamiento del Reactor
25 de marzo de 2009	1 lt	Biosólido 1	Se produce el primer lote
31 de marzo de 2009	1 lt	Biosólido 1	
2 de abril de 2009	1 lt	Biosólido 1	
14 de abril de 2009	1 lt	Biosólido 1	
16 de abril de 2009	1 lt	Biosólido 1	
21 de abril de 2009	1 lt	Biosólido 1	
23 de abril de 2009	1 lt	Biosólido 1	
28 de abril de 2009	1 lt	Biosólido 1	
5 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 1	
7 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 1	
12 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 1	
14 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 1	
19 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 1	
21 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 1	Se producen 14 lt de Biosólido 1
26 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 2	Se produce el primer lote
28 de mayo de 2009	1 lt	Biosólido 2	
2 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
4 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
9 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
11 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
16 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
18 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
23 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
25 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
30 de junio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
2 de julio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
7 de julio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
9 de julio de 2009	1 lt	Biosólido 2	
10 de julio de 2009	5 lt	Biosólido 2	Cierre de Primer Semestre
10 de agosto de 2009	20 lt	Lodo crudo	Estabilización del Reactor
25 de agosto de 2009	1 lt	Biosólido 2	Se produce el primer lote
27 de agosto de 2009	1 lt	Biosólido 2	
1 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
3 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
8 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
10 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	

15 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
17 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
22 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
24 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
29 de septiembre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
1 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
6 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
8 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 2	
13 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 2	Se producen 15 lt Bio 2
20 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 1	Se produce el primer lote
22 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 1	
27 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 1	
29 de octubre de 2009	1 lt	Biosólido 1	
3 de noviembre de 2009	1 lt	Biosólido 1	
5 de noviembre de 2009	1 lt	Biosólido 1	
7 de noviembre de 2009			Se toma Muestra para Metales
10 de noviembre de 2009	1 lt	Biosólido 1	
12 de noviembre de 2009	1 lt	Biosólido 1	
13 de noviembre de 2009	5 lt	Biosólido 1	Desmonte del equipo

## ***2. Calendario de Actividades de Aplicación de Tratamientos***

<b>FECHA</b>	<b>ACTIVIDAD</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
9 de noviembre de 2009	Se trasplantan los Cedros	Se empiezan los tratamientos
12 de noviembre de 2009	Arado de suelo y regado	Falta de Agua
13 de noviembre de 2009	Se hace riego de agua	
16 de noviembre de 2009	Arado de suelo y regado	Se toma primera medición
18 de noviembre de 2009	Arado de suelo y regado	
21 de noviembre de 2009	Arado de suelo y regado	
23 de noviembre de 2009	Se hace riego de agua	Crecimiento de nuevos brotes
27 de noviembre de 2009	Arado de suelo y regado	Buena aceptación de los cedros a los tratamientos
30 de noviembre de 2009	Arado de suelo y regado	Se detecta olor y nuevas formas vegetales
2 de diciembre de 2009	Arado de suelo y regado	Se nota película en Blanco y mejor crecimiento en Biosólido 1 y 2
4 de diciembre de 2009	Arado de suelo y regado	Buena aceptación de los cedros a los tratamientos
7 de diciembre de 2009	Arado de suelo y regado	
9 de diciembre de 2009	Arado de suelo y regado	
11 de diciembre de 2009	Arado de suelo y regado	
15 de diciembre de 2009	Arado de suelo y regado	Se toma segunda medición
17 de diciembre de 2009	Arado de suelo y regado	Buena aceptación de los cedros a los tratamientos
5 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	Buena adaptación al medio ambiente
7 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	

12 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	
14 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	
19 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	Se toma tercera medición
21 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	
26 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	
28 de enero de 2010	Arado de suelo y regado	Finaliza temporada de adaptación a las nuevas condiciones
3 de febrero de 2010	Arado de suelo y regado	Mayor crecimiento en Biosólido 1 y 2
10 de febrero de 2010	Arado de suelo y regado	
17 de febrero de 2010	Arado de suelo y regado	
19 de febrero de 2010		Se toma cuarta medición
24 de febrero de 2010	Arado de suelo y regado	
3 de marzo de 2010	Arado de suelo y regado	
10 de marzo de 2010	Arado de suelo y regado	Mayor crecimiento de nuevos brotes en Biosólido 1 y 2
16 de marzo de 2010	Arado de suelo y regado	Presencia de Pulgones en el Blanco
18 de marzo de 2010		Se toma quinta medición
23 de marzo de 2010	Arado de suelo y regado	
6 de abril de 2010	Arado de suelo y regado	Presencia de grillo, cien pies y gusanos en Blanco
13 de abril de 2010	Arado de suelo y regado	
16 de abril de 2010		Se toma sexta medición
20 de abril de 2010	Arado de suelo y regado	crecimiento de plantas invasoras
27 de abril de 2010	Arado de suelo y regado	Solo sobreviven pulgones y grillos de las plagas
5 de mayo de 2010	Arado de suelo y regado	
12 de mayo de 2010	Arado de suelo y regado	Poda de plantas invasoras
17 de mayo de 2010		Se toma séptima medición
19 de mayo de 2010	Arado de suelo y regado	
25 de mayo de 2010	Arado de suelo y regado	Ya no existe presencia de plagas
1 de junio de 2010		Finaliza parte experimental de campo

# ANEXO C

## Resultados en Suelo

### TEXTURA

BLANCO				
A	5	Gr		
B	3.79	Gr	% de Arena	75.82
C	1.21	Gr	% de Arcillas	11.28
D	0.07	Gr	% de Limo	12.90
E	0.56	Gr		
F	0.64	Gr		
BIOSÓLIDO 1				
A	5	Gr		
B	3.54	Gr	% de Arena	70.89
C	1.46	Gr	% de Arcillas	11.60
D	0.07	Gr	% de Limo	17.51
E	0.58	Gr		
F	0.88	Gr		
BIOSÓLIDO 2				
A	5	Gr		
B	4.21	Gr	% de Arena	84.10
C	0.80	Gr	% de Arcillas	15.23
D	0.10	Gr	% de Limo	0.67
E	0.76	Gr		
F	0.03	Gr		

$$\% \text{ DE ARENA} = (B/A) * 100$$

A= peso de la muestra

B= peso de arena

$$\% \text{ DE ARCILLA} = (E/A) * 100$$

C= peso de arcilla + limo = (A-B)

$$\% \text{ de limo} = (F/A) * 100$$

D= peso del suelo en la alícuota

E= Peso de arcilla = D\*8

F= peso del limo = A-B-E.

## POROSIDAD

$$P = \frac{S - Sa}{S} * 100$$

P = porosidad en porcentaje del volumen total de la muestra;

S = densidad real del suelo;

Sa = densidad aparente del suelo.

### Blanco

ρ REAL	2.52	g/cm <sup>3</sup>
ρ APARENTE	1.55	g/cm <sup>3</sup>
Porosidad	38.49	

Biosólido 1			Biosólido 2		
ρ REAL	2.56	g/cm <sup>3</sup>	ρ REAL	2.60	g/cm <sup>3</sup>
ρ APARENTE	1.53	g/cm <sup>3</sup>	ρ APARENTE	1.52	g/cm <sup>3</sup>
Porosidad	40.23		Porosidad	41.54	

## DENSIDAD APARENTE

1. Volumen de H<sub>2</sub>O desplazada por el terrón

$$(Ptp)a - (ptp)w = (Vt + Vp)$$

2. (Ptp)a - (Pt)a = peso de la parafina (Pp)

3. Pp = Vp = Volumen de la parafina (Vp)

4. (Vt + Vp) - Vp = Volumen del terrón (Vt)

Blanco				
(Pt)a	7.9	gr	(Vt + Vp)	8.29
(Ptp)a	11.1	gr	Pp	3.2
(Ptp)w	1.7	gr	Vp	3.2
			Vt	5.09
			ρ aparente	1.55

### Biosólido 1

(Pt)a	7	gr	(Vt + Vp)	6.96
(Ptp)a	9.4	gr	Pp	2.4
(Ptp)w	1.5	gr	Vp	2.4
			Vt	4.56
			ρ aparente	1.53

### Biosólido 2

(Pt)a	8.5	gr	(Vt + Vp)	8.19
(Ptp)a	11.1	gr	Pp	2.6
(Ptp)w	1.8	gr	Vp	2.6
			Vt	5.59
			ρ aparente	1.52

## DENSIDAD REAL

$$ps = (Pm) - (R)$$

$$vs = \frac{(tm) - (R)}{\rho_w} - \frac{(PmA) - (Pm)}{\rho_w} = \frac{\text{Peso del agua desplazada por partículas del suelo}}{\text{Densidad del Agua}}$$

$$\text{Densidad real (ps)} = \frac{ps}{Vs}$$

Pm = Peso muestra con recipiente

R = Peso del recipiente vacío

tm = temperatura de la muestra con agua.

PmA = Peso del matraz aforado

$\rho_w$  = densidad del agua

Blanco					
R	26.5363	gr	ps	5.01	gr
Pm	31.5468	gr	vs	1.96	gr
PmA	54.5189	gr			
Tm	51.4596	gr	$\rho$ Real	2.56	
Temp	23	°C			
$\rho_w$	0.9977				
Biosólido 1			Biosólido 2		
R	29.8098	Gr	ps	5.03	gr
Pm	34.8426	Gr	vs	2.00	gr
PmA	57.8053	Gr			
tm	54.7663	Gr	$\rho$ Real	2.52	
Temp	24	°C			
$\rho_w$	0.9973				
R	26.8703	gr	ps	3.65	gr
Pm	30.5175	gr	vs	1.40	gr
PmA	55.3456	gr			
tm	53.0957	gr	$\rho$ Real	2.60	
Temp	23	°C			
$\rho_w$	0.9977				

## PERMEABILIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Blanco		
Q	1.94E-08	m <sup>3</sup> /seg
L	0.32	M
k	2.11E-06	m/seg
A	1.963E-03	m <sup>2</sup>
h3	1.53	M
h4	0.027	M
i	4.70	
V	7.00E-05	m <sup>3</sup>
t	3600	Seg

Biosólido 1			Biosólido 2		
Q	1.70E-07	m <sup>3</sup> /seg	Q	2.09E-07	m <sup>3</sup> /seg
L	0.32	M	L	0.32	m
K	2.02E-05	m/seg	k	2.47E-05	m/seg
A	1.963E-03	m <sup>2</sup>	A	1.963E-03	m <sup>2</sup>
h3	1.53	M	h3	1.53	m
h4	0.157	M	h4	0.149	m
I	4.29		i	4.32	
V	6.13E-04	m <sup>3</sup>	V	7.52E-04	m <sup>3</sup>
T	3600	Seg	t	3600	seg

## CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y SALES

Muestras	Valor (dS/m)
Blanco	0.42
Biosólido 1	0.61
Biosólido 2	0.94

NaCl			
MUESTRA		CONDUCTIVIDAD	PPM
BLANCO	SUPERFICIAL	18	9.5
	INTERMEDIO	6	3
BIOSÓLIDO 1	SUPERFICIAL	18	9.5
	INTERMEDIO	9	4.5
BIOSÓLIDO 2	SUPERFICIAL	9	4.5
	INTERMEDIO	26	20.9

KCl			
MUESTRA		CONDUCTIVIDAD	PPM
BLANCO	SUPERFICIAL	42	34.2
	INTERMEDIO	12	10
BIOSÓLIDO 1	SUPERFICIAL	34	27.3
	INTERMEDIO	14	11.4
BIOSÓLIDO 2	SUPERFICIAL	15	12.1
	INTERMEDIO	49	40

## CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

En  $CIC = (F) (V) (N)$ .

donde:

V = volumen (ml) de HCl empleado al titular lo destilado en la solución borada.

N = normalidad del HCl; y

$$F = \frac{100}{\text{Alícuota}} * \frac{100}{\text{Peso del suelo}}$$

Si la alícuota = 10 ml y peso de suelo = 5 gr, entonces F= 200.

BLANCO			
CIC	430		
F	200		
V	4.3		
N	0.5		
BIOSÓLIDO 1		BIOSÓLIDO 2	
CIC	420	CIC	425
F	200	F	200
V	4.2	V	4.25
N	0.5	N	0.5

Determinación de Ca y Mg intercambiables

$$Ca (cmol (+)kg^{-1}) = (a - b) * \frac{100}{100} * 20 * \frac{1000}{10 w} * \frac{2}{40.08} = 9.98 * \frac{a - b}{w}$$

$$Mg (Cmol (+)kg^{-1}) = (a - b) * \frac{100}{1000} * 20 * \frac{1000}{10 w} * \frac{2}{24.32} = 16.447 * \frac{a - b}{w}$$

Donde:

a = concentración de Ca o Mg medida en la muestra ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

b = concentración de Ca o Mg medida en el blanco ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

w= peso del suelo seco (gr).

Determinación de Na y K intercambiables

$$Na \text{ (cmol (+)kg}^{-1}\text{)} = (a - b) * \frac{100}{100} * 10 \frac{1000}{10 w} * \frac{1}{23} = 4.347 * \frac{a - b}{w}$$

$$K \text{ (cmol (+)kg}^{-1}\text{)} = (a - b) * \frac{100}{100} * 10 \frac{1000}{10 w} * \frac{1}{39.1} = 2.557 * \frac{a - b}{w}$$

Donde:

a = concentración de Na o K medida en la muestra ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

b = concentración de Na o K medida en el blanco ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

w= peso del suelo seco (gr).

#### BIOSÓLIDO 1

<b>Ca</b>	11.1776		<b>Mg</b>	2.30258	
<b>a</b>	5.8	$\text{mg L}^{-1}$	<b>a</b>	0.9	$\text{mg L}^{-1}$
<b>b</b>	0.2	$\text{mg L}^{-1}$	<b>b</b>	0.2	$\text{mg L}^{-1}$
<b>w</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr
<b>Na</b>	1.21716		<b>K</b>	0.81824	
<b>a</b>	1.6	$\text{mg L}^{-1}$	<b>a</b>	1.8	$\text{mg L}^{-1}$
<b>b</b>	0.2	$\text{mg L}^{-1}$	<b>b</b>	0.2	$\text{mg L}^{-1}$
<b>w</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr

BLANCO					BIOSÓLIDO 2						
<b>Ca</b>	4.99		<b>Mg</b>	0.9868	<b>Ca</b>	11.3772		<b>Mg</b>	2.63152		
<b>A</b>	2.7	mg L <sup>-1</sup>	<b>a</b>	0.5	mg L <sup>-1</sup>	<b>a</b>	5.9	mg L <sup>-1</sup>	<b>a</b>	1	mg L <sup>-1</sup>
<b>B</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>	<b>b</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>	<b>b</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>	<b>b</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>
<b>W</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr
<b>Na</b>	0.4347		<b>K</b>	0.3068	<b>Na</b>	1.47798		<b>K</b>	1.07394		
<b>A</b>	0.7	mg L <sup>-1</sup>	<b>a</b>	0.8	mg L <sup>-1</sup>	<b>a</b>	1.9	mg L <sup>-1</sup>	<b>a</b>	2.3	mg L <sup>-1</sup>
<b>B</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>	<b>b</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>	<b>b</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>	<b>b</b>	0.2	mg L <sup>-1</sup>
<b>W</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr	<b>w</b>	5	gr

## PORCENTAJE DE CONTENIDO DE AGUA

$$\theta g = \frac{(PB + Psh) - (PB + Pss)}{(PB + Pss) - PB} * 100$$

$\theta g$  = Contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje.

$Psh$  = Peso de suelo húmedo (g)

$PB$  = Peso del bote con tapa (g)

$PB + Psh$  = Peso del bote más peso del suelo Húmedo (g)

$PB + Pss$  = Peso del bote más peso del suelo seco (g)

BLANCO (SUPERFICIAL)			BLANCO (INTERMEDIO)		
% g	64.1577	% DE HUMEDAD	% g	53.9761	%DE HUMEDAD
<b>PB</b>	34.1	64.2	<b>PB</b>	47	54.0
<b>Psh</b>	137.4		<b>Psh</b>	154.9	
<b>PB+Psh</b>	171.5		<b>PB+Psh</b>	201.9	
<b>PB+Pss</b>	117.8		<b>PB+Pss</b>	147.6	
BIO 1 (SUPERFICIAL)			BIO 1 (INTERMEDIO)		
% g	76.9137	% DE HUMEDAD	% g	42.1145	% DE HUMEDAD
<b>PB</b>	41.5	76.9	<b>PB</b>	29.8	42.1
<b>Psh</b>	145.6		<b>Psh</b>	161.3	
<b>PB+Psh</b>	187.1		<b>PB+Psh</b>	191.1	
<b>PB+Pss</b>	123.8		<b>PB+Pss</b>	143.3	

BIO 2 (SUPERFICIAL)			BIO 2 (INTERMEDIO)		
% g	85.4691	% DE HUMEDAD	% g	53.1502	% DE HUMEDAD
PB	32.8	85.5	PB	38.8	53.2
Psh	162.1		Psh	189.6	
PB+Psh	194.9		PB+Psh	228.4	
PB+Pss	120.2		PB+Pss	162.6	

## PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA

$$10(1-S/B)(k') = \%MO$$

10= ml de Dicromato de potasio agregado en la muestra

S= ml de la solución de sulfato ferroso consumidos durante la titulación

B= ml de la solución ferrosa, gastados en la titulación del blanco.

K'= factor derivado

$$K' = 1N \cdot 0.003 \cdot (1.72/0.77) \cdot (100/0.5 \text{ g}) = 1.34$$

Donde

N= normalidad de la solución de Dicromato de potasio

0.033= peso miliequivalente del carbono

1.72 = factor de conversión del carbono a MO

0.5 g = peso de la muestra del suelo

K = 0.67

Blanco Intermedio				Blanco Superficial			
Blanco	20.4	ml		Blanco	24.5	ml	
			% MO				% MO
Muestra 1	16.3	ml	1.35	Muestra 1	16.2	ml	2.27
Muestra 2	18.4	ml	0.66	Muestra 2	14.2	ml	2.82
Muestra 3	16.5	ml	1.28	Muestra 3	14.6	ml	2.71
		<b>PROMEDIO</b>	1.09			<b>PROMEDIO</b>	2.60

BIO 2 Intermedio				BIO 2 Superficial			
Blanco	19.7	ml		Blanco	17.3	ml	
			% MO				% MO
Muestra 1	17.2	ml	1.05	Muestra 1	13.8	ml	2.93
Muestra 2	17	ml	1.12	Muestra 2	11.8	ml	3.47
Muestra 3	17.3	ml	1.02	Muestra 3	14.2	ml	2.82
		<b>PROMEDIO</b>	1.06			<b>PROMEDIO</b>	3.07

BIO 1 Intermedio				BIO 1 Superficial			
Blanco	20.8	ml		Blanco	20.2	MI	
			% MO				% MO
Muestra 1	17.5	ml	0.95	Muestra 1	16.9	MI	2.08
Muestra 2	18.1	ml	0.76	Muestra 2	16.1	MI	2.30
Muestra 3	19.4	ml	0.33	Muestra 3	16.9	MI	2.08
		<b>PROMEDIO</b>	0.68			<b>PROMEDIO</b>	2.15

## PORCENTAJE DE FÓSFORO

$$P(\text{mg Kg}^{-1} \text{ de suelo}) = CC * Vi/p * Vf/a$$

CC= mg L<sup>-1</sup> de P en la Sol.

Vi= Volumen de la Solución extractora adicionada

p= peso de la muestra de suelo seca al aire

Vf = volumen final de la solución colorimétrica a leer

a= alícuota de la muestra empleada para cuantificación

### Datos

Vi	50 ml
p	2.5 gr
Vf	3 ml
a	5 ml

Blanco Sup 1	27	0.84
Blanco Sup 2	25	0.88
Blanco Sup 3	24	0.90
<b>PROMEDIO</b>		0.87
	<b>Absorbancia</b>	<b>CC</b>
Blanco int 1	17	1
Blanco int 2	15	1.03
Blanco int 3	18	0.98
<b>PROMEDIO</b>		1.01
<b>Biosólido 1 Sup 1</b>	21	0.96
<b>Biosólido 1 Sup 2</b>	18	0.98
<b>Biosólido 1 Sup 3</b>	26	0.86
<b>PROMEDIO</b>		0.93

	Absorbancia	CC
<b>Biosólido 1 Int 1</b>	18	0.98
<b>Biosólido 1 Int 2</b>	19	0.97
<b>Biosólido 1 Int 3</b>	17	1
<b>PROMEDIO</b>		0.98
<b>Biosólido 2 Sup 1</b>	10	1.12
<b>Biosólido 2 Sup 2</b>	8	1.15
<b>Biosólido 2 Sup 3</b>	8	1.15
<b>PROMEDIO</b>		1.14
<b>Biosólido 2 Sup1</b>	20	0.95
<b>Biosólido 2 Sup2</b>	19	0.97
<b>Biosólido 2 Sup3</b>	17	1
<b>PROMEDIO</b>		0.97

## PORCENTAJE DE NITRÓGENO INORGÁNICO

$$N(ppm) = (M - B) * N * 14 * (Vi/a) * 1/p * 1000$$

Donde:

M y B = Son los mililitros de ácidos sulfúrico usados en la titulación de muestra y el blanco, respectivamente.

N = La normalidad del ácido

Vi = Es el volumen del extractante

a = La alícuota destilada

p = el peso de la muestra en gramos

Blanco Sup				Biosólido 1 Sup			
<b>m</b>	5			<b>m</b>	5.3		
<b>b</b>	0.05			<b>b</b>	0.05		
<b>N</b>	0.005			<b>N</b>	0.005		
<b>Vi</b>	20			<b>Vi</b>	20		
<b>a</b>	30	% de Nitrógeno	23.10	<b>a</b>	30	% de Nitrógeno	24.50
<b>p</b>	10			<b>p</b>	10		

Blanco Int				Biosólido 1 Int			
<b>m</b>	5			<b>m</b>	10.4		
<b>b</b>	0.05			<b>b</b>	0.05		
<b>N</b>	0.005			<b>N</b>	0.005		
<b>Vi</b>	20			<b>Vi</b>	20		
<b>a</b>	30	% de Nitrógeno	23.10	<b>a</b>	30	% de Nitrógeno	48.30
<b>p</b>	10			<b>p</b>	10		

Biosólido 2 Sup			
<b>m</b>	10.5		
<b>b</b>	0.05		
<b>N</b>	0.005		
<b>Vi</b>	20		
<b>a</b>	30	% de Nitrógeno	48.77
<b>p</b>	10		

Biosólido 2 Int			
<b>m</b>	13.1		
<b>b</b>	0.05		
<b>N</b>	0.005		
<b>Vi</b>	20		
<b>a</b>	30	% de Nitrógeno	60.90
<b>p</b>	10		