

**EVALUACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICO Y ALCALINO EN LA DESINFECCIÓN DEL  
LODO GENERADO EN LA PTAR EL SALITRE**

**MARÍA DEL PILAR ARAQUE MANRIQUE**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D.C.**

**2006**

**EVALUACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICO Y ALCALINO EN LA DESINFECCIÓN DEL  
LODO GENERADO EN LA PTAR EL SALITRE**

**MARÍA DEL PILAR ARAQUE MANRIQUE**

**Tesis para optar al título de  
Magíster en Ingeniería Civil**

**Asesor**

**MANUEL RODRÍGUEZ SUSANA, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D.C.**

**2006**

**Nota de aceptación**

**Presidente del Jurado**

**Jurado**

**Jurado**

Ciudad y fecha \_\_\_\_\_

A Dios, por estar siempre a mi lado,  
a mis padres y hermano, por ser mi motivación,  
y a Thomas, por su amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora agradece la financiación de esta investigación a la Dirección de Ingeniería Especializada de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. De igual forma agradece el apoyo brindado por: el ingeniero Manuel Rodríguez, asesor de este trabajo, el equipo técnico de la PTAR El Salitre, el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Centro de Innovación Tecnológica de la Universidad de los Andes, y el Laboratorio de parasitología de la Pontificia Universidad Javeriana.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	pag. 13
1. LODOS Y BIOSÓLIDOS	15
1.1 COMPOSICIÓN	15
1.1.1 Metales pesados y compuestos orgánicos	15
1.1.2 Microorganismos patógenos	16
1.2 UTILIZACIÓN AGRÍCOLA DE LOS BIOSÓLIDOS	17
1.2.1 Beneficios agronómicos	17
1.3 REGLAMENTACIÓN	18
1.3.1 Metales pesados	18
1.3.2 Microorganismos patógenos	18
2. DESINFECCIÓN DE LODOS	20
2.1 MICROORGANISMOS PATÓGENOS PRESENTES EN EL LODO	20
2.2 INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL	21
2.2.1 Coliformes fecales	21
2.2.2 Fagos somáticos	22
2.2.3 Huevos de helminto	22
2.3 TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN DE LODOS	22
2.3.1 Tratamientos de estabilización y desinfección	23
2.4 BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PTAR EL SALITRE	27
2.4.1 Tren de tratamiento de lodos	27
2.4.2 Caracterización del lodo y biosólido	28
2.4.3 Utilización actual del biosólido	29

3. OBJETIVOS	32
3.1 OBJETIVO GENERAL	32
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
4. MATERIALES Y MÉTODOS	33
4.1 TRATAMIENTO TÉRMICO	33
4.1.1 Equipo	33
4.1.2 Calentamiento del lodo espesado	33
4.1.3 Calentamiento del lodo deshidratado	33
4.1.4 Monitoreo de parámetros	35
4.2 TRATAMIENTO ALCALINO	36
4.2.1 Evaluación preliminar	36
4.2.2 Tratamiento a escala piloto	37
4.3 TÉCNICAS DE ANÁLISIS	38
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	39
5.1 CONCENTRACIONES MICROBIOLÓGICAS INICIALES	39
5.2 TRATAMIENTO TÉRMICO	39
5.2.1 Lodo espesado	40
5.2.2 Lodo deshidratado	42
5.2.3 Recrecimiento de indicadores bacterianos	43
5.2.4 Monitoreo de otros parámetros	44
5.3 TRATAMIENTO ALCALINO	45
5.3.1 Coliformes fecales	52
5.3.2 Fagos somáticos	53
5.3.3 Huevos de helminto	54
5.3.4 Variación del nitrógeno y materia orgánica	56
6. CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58

## LISTA DE TABLAS

	pag.
Tabla 1. Concentraciones máximas de metales pesados permitidas por USEPA.	18
Tabla 2. Concentración máxima de microorganismos patógenos permitida por USEPA.	19
Tabla 3. Características promedio del lodo espesado y lodo deshidratado PTAR El Salitre.	28
Tabla 4. Concentraciones de metales pesados en el biosólido PTAR El Salitre.	29
Tabla 5. Resumen de condiciones de tratamiento térmico para lodo espesado.	35
Tabla 6. Resumen de condiciones de tratamiento térmico para el lodo deshidratado.	35
Tabla 7. Parámetros y frecuencia de monitoreo.	37
Tabla 8. Técnicas microbiológicas utilizadas.	38
Tabla 9. Concentraciones microbiológicas iniciales en el lodo espesado y lodo deshidratado.	39
Tabla 10. Reducciones microbiológicas en el lodo espesado después de 30 min de exposición.	41
Tabla 11. Reducciones microbiológicas en el lodo deshidratado expuesto a una temperatura de 80°C.	41
Tabla 12. Concentraciones de CF en el lodo almacenado	44
Tabla 13. Características físicas del material tratado.	45
Tabla 14. Registro de temperaturas iniciales.	48



## LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1. Tren de tratamiento de lodos PTAR El Salitre.	28
Figura 2. Procesos del tren de tratamiento de lodos PTAR El Salitre.	29
Figura 3. Cobertura de celdas clausuradas en Doña Juana.	29
Figura 4. Reactores de Calentamiento. A: lodo espesado, B: lodo deshidratado.	34
Figura 5. Materiales y proceso constructivo de reactor de calentamiento.	35
Figura 6. Procedimiento evaluación preliminar.	36
Figura 7. Procedimiento evaluación a escala piloto.	37
Figura 8. Concentraciones máximas, mínimas y promedio de CF, FS y HH en el lodo espesado y lodo deshidratado.	40
Figura 9. Efecto de la cobertura en la temperatura.	46
Figura 10. Efecto de la relación A/V en la temperatura.	47
Figura 11. Efecto de la dosis en la temperatura.	49
Figura 12. Distribución de la temperatura a escala piloto.	50
Figura 13. Comportamiento del pH a escala banco.	50
Figura 14. Comportamiento del pH a escala banco y piloto (25% CaO).	51
Figura 15. Reducción de la humedad a escala banco y piloto	51
Figura 16. Variación de la concentración de coliformes fecales – Escala piloto.	52
Figura 17. Variación de la concentración de Fagos somáticos - Escala piloto.	53

Figura 18. Variación de la concentración de huevosde helminto para varias dosis de CaO.	54
Figura 20. Decaimiento de los HH en función de la dosis para el día 7 de tratamiento.	55
Figura 21. Variación de la concentración de NTK a escala piloto.	56

## RESUMEN

En este estudio se evaluó la eficiencia de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección de un lodo proveniente de una planta de tratamiento TPQA. Se evaluaron dos temperaturas (60°C y 80°C), durante diferentes tiempos de exposición, en la destrucción de indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales, fagos somáticos y huevos de helminto). Los resultados mostraron que mediante una temperatura de 80°C los lodos tratados adquirieron características de biosólido clase A (USEPA, 2003). En el tratamiento alcalino se evaluaron dosis entre 25% y 85% CaO en BS, los resultados indicaron que una dosis de 25% es suficiente para sanear el lodo en 21 días de tratamiento. El pH alcanzado disminuyó el valor fertilizante del lodo. En ninguno de los tratamientos evaluados se observó recrecimiento de indicadores bacterianos.

**Abstract:** The aim of this study was to evaluate the efficiency of thermal and alkaline treatments on disinfection of a sludge produced in a CEPT plant. Sewage sludges were heated at two temperatures (60°C and 80°C) for different exposition times to evaluate the destruction of fecal coliforms, somatic phages and helminth eggs. Results showed that the treatment produced a class A biosolids when 80°C were applied. Doses from 25% to 85% CaO DW were applied in alkaline treatment, results showed that with 25% CaO the sludge was sanitized on 21 days. The pH achieved made to decrease the material fertilizer value. Regrowth of bacterial indicators did not occur in any of the treatments.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la gran cantidad de lodos que se producen en el tratamiento de las aguas residuales, se han aumentado los problemas ambientales, sociales y económicos relacionados con el procesamiento y disposición de este material.

En el territorio nacional se tienen Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que manejan grandes caudales, y producen diariamente cantidades considerables de biosólido. Dentro de las más grandes se encuentran la PTAR San Fernando, en Medellín; la PTAR Cañaveral, en Cali; y la PTAR El Salitre, en Bogotá.

Adicionalmente, en todo el país se proyectan nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o ampliaciones de las existentes, lo que incrementará la producción anual de biosólidos de aproximadamente 101.105 Ton a 383.250 Ton para el año 2020 (PTAR El Salitre, 2005).

La disposición adecuada de este material genera altos costos operativos, sin embargo este es un material que puede ser aprovechado en diferentes actividades, siempre y cuando se tengan en cuenta sus características físicas, químicas y microbiológicas. Una de estas alternativas de utilización es su aprovechamiento agrícola, ya que el lodo tratado es un material que contiene nutrientes y materia orgánica, los cuales pueden ser aprovechados por diversos cultivos y suelos.

Al utilizar el lodo como mejorador de suelos, no solo se disminuyen los costos y los problemas en su disposición, también se genera un producto que puede llegar a disminuir la gran diferencia que existe entre la producción interna de fertilizantes químicos y su demanda anual en el país (FAO, 1999).

Por otro lado, según la Unidad de Planeación Minero Energética (2003), las expectativas de incrementar la producción interna de estos fertilizantes no son muchas, debido a que el nivel de explotación geológica no es suficiente para cuantificar y conocer las reservas de minerales requeridos para la fabricación de estos productos. Por lo cual, se considera que el aprovechamiento de los lodos como biofertilizantes puede llegar a disminuir, en algún grado, los altos costos de los insumos agrícolas.

Sin embargo, este aprovechamiento debe realizarse adecuadamente y bajo las más estrictas normas y controles, con el fin de evitar la generación de impactos negativos en la salud pública y en el ambiente. Esto es debido a la posible presencia de metales pesados, microorganismos patógenos y compuestos orgánicos, los cuales limitan su utilización y aprovechamiento.

Aunque los metales pesados fue durante mucho tiempo la mayor preocupación de la utilización de los lodos en la agricultura, se estableció que debido al bajo contenido de contaminación química, el grado de afectación era mínimo (Ingallinella et al, 2001). Por lo cual, el interés se centró en las características microbiológicas del lodo, ya que en los lodos están contenidos los microorganismos patógenos que trae consigo el agua residual de una comunidad, y contrario a los metales pesados y compuestos orgánicos, estos no pueden controlarse en la fuente (Yanko, 1987, citado por Ponugoti et al, 1997).

La presencia de microorganismos patógenos en el biosólido (parásitos, virus y bacterias) (Ingallinella et al, op cit) limita su utilización y aprovechamiento, ya que existe la posibilidad de que estos microorganismos se ingieran y perjudiquen la salud de la población. Por lo cual, los lodos deben someterse a tratamientos de desinfección que eliminen los microorganismos patógenos y permitan su utilización en tierras agrícolas (Ericksen et al, 1995, Keller et al, 2004, Mignotte-Cardiergues et al, 2001).

En la PTAR El Salitre se producen más de 50000 Ton al año de lodo deshidratado, las cuales se llevan al Relleno Sanitario Doña Juana como material de cobertura de las celdas saturadas, sin embargo esta actividad consume altos recursos económicos y existe una amenaza constante de la disminución de terrenos adecuados, por lo cual es necesario estudiar nuevas alternativas de aprovechamiento que se basen en las características del material.

La concentración de metales pesados en el lodo de la PTAR El Salitre cumple los límites exigidos por la United States Environmental Protection Agency (USEPA) para aplicación en terrenos agrícolas; sin embargo, la concentración de microorganismos patógenos supera las concentraciones admisibles por USEPA para utilizar sin restricciones este material.

Este trabajo se enfoca en la evaluación a escala piloto de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo. Estos tratamientos emplean la temperatura y el pH como los principales factores de disminución de la carga microbiológica que trae consigo este material.

## 1. LODOS Y BIOSÓLIDOS

Se llaman biosólidos a los sólidos orgánicos o lodos generados en el tratamiento del agua residual doméstica que han sufrido un proceso de tratamiento y estabilización (EPA, 1999), lo cual permite su utilización benéfica (Ponugoti et al, op cit). Los biosólidos son el principal subproducto del tratamiento de las aguas residuales domésticas (Olaya & Ramirez, 2001), y su composición depende de la calidad de las aguas que transporta la red de alcantarillado conectada a la planta de tratamiento.

A pesar de que los biosólidos son un recurso valioso y aprovechable gracias a que poseen una serie de propiedades que los hacen útiles en diferentes actividades, son el aspecto más abandonado del tratamiento del agua residual, y su producción, tratamiento y disposición final muchas veces no forman parte del plan de saneamiento a implementarse. (Olaya & Ramirez, op cit).

Sin embargo, aunque existen varias alternativas de aprovechamiento y disposición de los biosólidos, la elección de las más adecuadas para ser implementadas en una ciudad o municipio dependen de la composición del biosólido, de sus características físicas, químicas y microbiológicas. A continuación se presentan los principales componentes del biosólido y su importancia al diseñar un plan de aprovechamiento.

### 1.1 COMPOSICIÓN

El biosólido es un material heterogéneo cuyas características pueden variar en el tiempo (Olaya & Ramirez, op cit), puesto que estas dependen de la calidad del agua residual y del tipo y nivel de tratamiento que se le da tanto al agua como al biosólido.

Existen ciertos componentes del biosólido que se consideran peligrosos cuando sobrepasan ciertas concentraciones, entre estos se encuentran los metales pesados, los compuestos orgánicos y los microorganismos patógenos.

1.1.1 Metales pesados y compuestos orgánicos: La concentración de metales pesados y de compuestos orgánicos en los biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas es usualmente muy baja (Andreadakis et al, 2001), debido a los controles de vertimientos industriales que se llevan a cabo en las ciudades. Lo mismo sucede con los compuestos orgánicos, los cuales son controlados directamente en las industrias con la implementación de pretratamientos. (Ponugoti et al, op cit).

Se han desarrollado una serie de investigaciones con el objetivo de determinar la acumulación de los metales pesados en el suelo en el que se aplican lodos residuales y en los cultivos sembrados en estos suelos, y se ha encontrado que estos metales, cuando se aplica el lodo a tasas agronómicas, no se transfieren a los cultivos y las concentraciones en el suelo no sobrepasan las normativas (Del Campo et al, 2001, Jurado et al, 2004).

1.1.2 Microorganismos Patógenos: En los lodos sin tratar están contenidos los microorganismos patógenos que trae consigo el agua residual doméstica de una comunidad, dentro de estos pueden incluirse bacterias entéricas, virus y parásitos (protozoarios y helmintos) (Ingallinella et al, op cit).

Diferente a los metales pesados y a los compuestos orgánicos, los patógenos que componen los vertimientos de agua residual no pueden controlarse en la fuente, y frecuentemente se concentran en el lodo generado por el tratamiento del agua residual, debido a su densidad o a la adsorción durante el tratamiento del agua. (Yanko, 1987, citado por Ponugoti et al, op cit).

Los tratamientos de aguas residuales domésticas que involucran procesos de mezcla, coagulación y filtración remueven virus y bacterias presentes en esta agua, y debido a que estos microorganismos son partículas coloidales, quedan sometidos a los procesos de aglutinamiento y sedimentación. (Arboleda, 2000). Por lo tanto, en el lodo es posible recuperar cantidades considerables de patógenos de origen fecal (bacterias, virus y parásitos) (Eriksen et al, op cit).

Los procesos de coagulación-floculación-sedimentación son altamente eficientes con la remoción de bacterias vegetativas, sin embargo con los virus, por su pequeña dimensión, también intervienen otros fenómenos químicos y físicos. La remoción de bacterias es directamente proporcional a la remoción de la turbiedad del agua residual y se pueden lograr remociones de hasta 99.7% cuando se obtiene una eficiencia alta en el proceso de coagulación y sedimentación (Arboleda, op cit).

Se han encontrado diferentes microorganismos en el agua residual doméstica, y los principales son bacterias (salmonella, shigella, vidrio comma, yersenia y E coli), protozoarios (amoebas, giardia lamblia y cryptosporidium), virus (virus de la hepatitis infecciosa, virus de la poliomeilitis poliovirus) y tremátodos y nemátodos (schistosoma manzoni, dracunculus medinensis y ascaris) (Arboleda, op cit). Sin embargo, la lista de microorganismos presentes y su concentración es altamente dependiente de la incidencia de enfermedades entéricas en la comunidad (Ingallinella et al, op cit) y del uso per cápita del agua, por lo tanto mayores concentraciones se esperan en países en vía de desarrollo (Gerba et al, 2001). La variación de esta concentración también depende de las técnicas de muestreo y análisis utilizadas para el lodo, y del tipo de lodo analizado.

Se conoce que dos familias de parásitos (helmintos y protozoarios), las cuales pueden estar presentes en el biosólido, causan un gran número de infecciones (Gaspard & Schwartzbrod, 2001). En América Latina, las infecciones gastrointestinales ocasionadas por los nemátodos (helmintos) son bastante prevalentes, y estos microorganismos tienden a ser más persistentes en el ambiente que los virus, las bacterias y los protozoarios (Ingallinella et al, op cit).

Los microorganismos que contienen los lodos sin tratar pueden estar presentes en formas que son directamente infecciosas para los humanos, o en sus formas más resistentes (esporas de bacterias, quistes de protozoos o huevos de parásitos), las cuales pueden convertirse en patógenos después de su ingestión o incorporación en el sistema gastrointestinal de los humanos o animales. Por tal razón los patógenos deben ser eliminados o disminuidos en concentración hasta niveles aceptables, antes de que los biosólidos puedan ser aprovechados (Ponugoti et al, op cit). Esta determinación también se debe a que, aunque las concentraciones de los virus y parásitos decrecen cuando se someten a condiciones ambientales, algunas bacterias son capaces de reproducirse si se presentan las condiciones adecuadas respecto a humedad, temperatura, pH y radiación, entre otras; lo que generaría riesgos potenciales a la comunidad.

Gaspard & Schwartzbrod (2001) establecieron tres medidas que permiten evitar los riesgos de contaminación microbiológica: tratamiento del lodo para eliminar los patógenos, buenas prácticas de utilización y desarrollo de técnicas de análisis para controlar el nivel de contaminación.

## 1.2 UTILIZACIÓN AGRÍCOLA DEL BIOSÓLIDO

Existen dos opciones de manejo de los biosólidos, la disposición y la utilización (USEPA, 1999). Dentro de la primera se encuentran la disposición de los biosólidos en rellenos sanitarios ya sea en monorrellenos o como cobertura final de las celdas clausuradas, y la incineración.

Debido al incremento de los controles regulatorios y a la prohibición de algunas opciones de disposición (Swanson et al, 2004), alrededor del mundo se han venido desarrollado diferentes formas de aprovechamiento de los biosólidos. Dentro de las alternativas de aprovechamiento se encuentran opciones de utilización agrícola y no agrícola (adecuación de zonas verdes urbanas, reforestación, restauración de zonas degradadas, biorremediación) que tienen que ver con la aplicación del biosólido en terrenos. También se han implementado alternativas de utilización de los lodos en la industria, como fuente de energía, agregado en la industria de la construcción, materia prima para fertilizantes, entre otras.

En la actualidad, la utilización del biosólido en terrenos agrícolas es una práctica que se ha extendido en todo el mundo, ya que el aprovechamiento de los nutrientes, la materia orgánica y los minerales que contiene pueden llegar a reducir el consumo de fertilizantes comerciales (Ingallinella et al, op cit), y de esta forma disminuir los costos de las producciones agrícolas. La utilización del biosólido no sólo ofrece grandes ventajas para el mundo agrícola, también lo hace para los centros urbanos, ya que el aumento de la producción de este material será un problema si no se dispone adecuadamente (Banas et al, 2002).

En Estados Unidos se generan 5.4 millones de toneladas anualmente, y su uso benéfico como acondicionador de suelos es una alternativa que ha ganado popularidad rápidamente (Ponugoti et al, op cit).

**1.2.1 Beneficios agronómicos de los biosólidos:** Los biosólidos tienen un alto potencial de aprovechamiento agrícola, ya que su contenido de nutrientes y de materia orgánica puede ser aprovechado por suelos y cultivos determinados, y la probabilidad de que estos nutrientes generen eutroficación en cuerpos de agua es mínima si no se sobrepasan las tasas agronómicas de aplicación (Suh & Rousseaux, 2001).

El valor fertilizante de los lodos es determinado con base en su contenido de nitrógeno y fósforo. Las concentraciones de estos nutrientes en la mayoría de los lodos se encuentra entre 4.9 y 12.6%, y entre 0.9 y 8.8% para nitrógeno y fósforo respectivamente (Andreadakis et al, op cit). Se ha comprobado que este material mejora algunas características de los suelos en los que se aplica, como la estabilidad, la capacidad de campo, la infiltración, la capacidad de intercambio catiónico, disminuye la erosión, y disminuye la relación de adsorción de sodio (Sort & Alcañiz, 1999).

En la mayoría de los lodos generados en plantas de tratamiento de agua residual doméstica, el contenido de nitrógeno y fósforo supera las concentraciones de potasio, por lo cual si se utiliza este material en un cultivo que requiera altas cantidades de este nutriente, debe agregarse adicionalmente.

## 1.3 REGLAMENTACION



Con el fin de realizar un aprovechamiento adecuado de los biosólidos, se hace necesario implementar y adoptar reglamentaciones, guías y manuales (Gerba et al, op cit) que eliminen los riesgos asociados con malas practicas de manejo del material.

Debido a que en Colombia no se cuenta con una normativa que reglamente los límites de utilización de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua residual, se presentan a continuación los límites máximos permitidos por la norma USEPA 40 CFR 503, respecto a metales pesados y microorganismos patógenos, para aplicar un lodo sobre tierras agrícolas sin ningún tipo de restricción.

1.3.1 Metales pesados: La norma 40 CFR 503 reglamenta la concentración máxima de metales pesados en los lodos para su aplicación en tierras agrícolas (véase la Tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones máximas de metales pesados permitidas por USEPA.

Parámetro	EPA 40 CFR 503 (mg/Kg Base Seca)
Arsénico	41
Cadmio	39
Cobre	1500
Cromo	1200
Plomo	300
Mercurio	17
Niquel	420
Selenio	100
Zinc	2800

1.3.2 Microorganismos Patógenos: La norma USEPA 40 CFR 503 divide a los lodos en dos categorías, según las concentraciones de microorganismos patógenos: biosólido clase A y biosólido clase B, el primero puede utilizarse en la agricultura sin ningún tipo de restricción ya que las concentraciones son tan bajas que no genera riesgos en la salud pública. El biosólido Clase B es un material con mayor contenido patogénico y puede utilizarse pero con ciertas restricciones

El objetivo de esta norma es limitar las rutas de exposición de una comunidad a los patógenos presentes en los lodos; en el biosólido clase A lo logra mediante la reducción de las concentraciones de estos microorganismos hasta niveles no detectables, y en el clase B, previene el contacto directo o indirecto con el material.

- Biosólido Clase A

Para que un lodo adquiera las características de un biosólido clase A debe someterse a tratamientos de desinfección, los cuales garanticen la reducción de las concentraciones de los microorganismos patógenos presentes en el material hasta niveles no infecciosos. Para esto, las concentraciones finales no deben sobrepasar las máximas admitidas por USEPA (véase Tabla 2).

Los biosólidos clase A pueden utilizarse sin restricciones de sitio de aplicación, por lo cual antes de su utilización, deben examinarse las concentraciones de coliformes fecales o salmonella, ya que las bacterias pueden presentar recrecimiento, aun después de aplicados los tratamientos de desinfección. Esto no ocurre con los virus ni con los parásitos, ya que estos microorganismos requieren de un huésped para llegar a su estado infectivo. Las bacterias pueden reproducirse si las condiciones ambientales, como humedad y temperatura, lo permiten.

Tabla 2. Concentración máxima de microorganismos patógenos permitida por USEPA.

Parámetro	EPA 40 CFR 503
Coliformes fecales	< 1.0E+03 UFC/g BS
Salmonella	< 3.0 NMP/4g BS
Enterovirus	< 1 PFP/4g BS
Huevos de helminto	< 1 huevo viable/4g BS

\*UFC: unidades formadoras de colonia, BS: base seca, NMP: número más probable, PFP: partículas formadoras de placa.

- Biosólido Clase B

Contrario a los biosólidos clase A, los cuales están libres de patógenos, los clase B pueden presentar concentraciones más altas de estos microorganismos, por lo cual la USEPA reglamentó una serie de normas de manejo para este material cuando es aplicado sobre terrenos agrícolas y no agrícolas. Dentro de estas restricciones de manejo se encuentran la prohibición de sembrar cualquier clase de cultivo durante un periodo de tiempo determinado, y delimitar el sitio de aplicación para evitar el ingreso de personas o animales. Esta técnica de aislamiento permite desinfectar el material aplicado mediante la influencia de factores ambientales, como la temperatura, la radiación solar y la desecación, entre otros. Estos biosólidos deben ser monitoreados constantemente.

En un biosólido clase B se analizan los coliformes fecales y su concentración debe ser menor de 2.0E+06 UFC/g seco. No es necesario analizar los enterovirus ni huevos de helminto.

## 2. DESINFECCIÓN DE LOS LODOS

Debido a que la mayoría de los patógenos presentes en el agua cruda están presentes en el lodo, y que estos pueden generar graves enfermedades en la población al transmitirse por diversos mecanismos como: inhalación de aerosoles provenientes del lodo e ingestión de alimentos de agua contaminada (Banas et al, op cit), se deben investigar métodos efectivos de desinfección antes de utilizar el este material como fertilizante en tierras agrícolas (Ericksen et al, op cit).

La reducción de los patógenos es un aspecto importante en los métodos de estabilización del lodo, ya que muchas consideraciones sobre los peligros ambientales de utilizarlo recaen sobre el riesgo de liberar patógenos al ambiente. En este contexto, varios métodos como degradación biológica, compostaje, tratamiento con calor o con cal, han sido utilizados para eliminar los patógenos del lodo residual (Ericksen et al, op cit)

USEPA recomienda varios procesos que reducen fuertemente los patógenos: compostaje, secado térmico, digestión anaerobia termofílica, radiación con rayos beta y gamma, y pasteurización (Banas et al, op cit). Estos tratamientos emplean la temperatura y la radiación como los principales factores para destruir a los patógenos. Sin embargo, los costos asociados a la radiación son muy altos, por lo que su aplicación es escasa. El pH también es un factor determinante en la inactivación de los microorganismos patógenos. Los tratamientos que utilizan variaciones en el pH son costo efectivos, ya que su consumo de energía es bajo y proporcionan muy buenos resultados (Banas et al, op cit).

La mayoría de los lodos generados en Dinamarca son estabilizados; sin embargo, estos tratamientos de estabilización no reducen el contenido de patógenos hasta las concentraciones requeridas para su utilización agrícola, por lo tanto se han iniciado estudios de los efectos que algunos tratamientos tienen sobre la desinfección del lodo (Gepsen et al, 1997).

### 2.1 MICROORGANISMOS PATÓGENOS PRESENTES EN EL LODO

Teniendo en cuenta que las características microbiológicas de un lodo dependen de la situación local de cada planta de tratamiento (población, vertimientos industriales, clima, metodología de muestreo), se encuentran grandes variaciones entre datos publicados (Guzmán, 2004). Los grupos de microorganismos presentes en los lodos son: bacterias, virus y parásitos (protozoarios y helmintos).

La salmonella es una de las bacterias más estudiadas en el laboratorio y en el ambiente, ya que está frecuentemente presente en el lodo, y puede contaminar rápidamente humanos y animales ya que crece ante condiciones ambientales específicas y tiende a ser la bacteria patógena más persistente.

Respecto a los virus, en un lodo es posible encontrar hasta 100 especies diferentes patógenas para humanos. Se ha comprobado, por diversos estudios, que este tipo de patógenos es más

resistente a los tratamientos de desinfección que los organismos coliformes, por lo cual se considera que estos últimos no son buenos indicadores de la reducción o ausencia de virus (Guzmán y Campos, 2004). Los virus se comportan como coloides por su tamaño, contrario a las bacterias, esta característica les permite adherirse mucho más fácil a la superficie de los sólidos del lodo (Guzmán y Campos, 2004). Las técnicas desarrolladas hasta el momento para la determinación de virus son costosas y dispendiosas (Mocé-Llivina et al, 2003).

Dentro del grupo de parásitos se encuentran los protozoarios y los helmintos. Dentro de los primeros se encuentran: Entamoeba histolytica, el cual no resiste procesos de secado, y giardia lamblia, microorganismo que se caracteriza por su alto potencial infeccioso para los humanos (Guzmán y Campos, 2004). Los principales helmintos son: Ascaris lumbricoides, sus huevos son resistentes a la mayoría de los tratamientos, por esta razón se utilizan para determinar la efectividad de los tratamientos de desinfección (Guzmán y Campos, 2004); trichuris trichiura también es un helminto; sin embargo, Hay (1981), citado por Guzmán y Campos (2004), afirma que sus huevos son menos resistentes que los de Ascaris. Se conoce que los huevos de Ascaris sobreviven y mantienen su actividad infectiva por un largo periodo de tiempo en el lodo residual (Pike & Carrington, 1985, citado por Ericksen et al, op cit); por lo tanto, la medición de estos patógenos durante los tratamientos del lodo se ha usado como parámetro que evalúa la eficiencia del proceso de desinfección.

Los huevos de helminto son microorganismos muy resistentes a las condiciones ambientales adversas (Gaspard et al, 1997), y su periodo de latencia es prolongado.

## 2.2 INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL

Es común que la eficiencia de tratamientos de desinfección se evalúe en términos de indicadores de contaminación fecal, ya que aunque es ideal trabajar con los microorganismos patógenos, las técnicas y métodos de medición son muy dispendiosas y generan altos costos, además de no permitir distinguir los microorganismos viables de los no viables en muchos casos (Mocé-Llivina et al, op cit).

Los indicadores de contaminación fecal revelan la posible presencia de los patógenos. Los indicadores utilizados normalmente para bacterias son los coliformes fecales, para virus los fagos, y para parásitos los huevos de helminto (nemátodos, céstodos y tremátodos). Un buen indicador debe cumplir con las siguientes características (Guzmán, 1998, citado por Guzman y Campos, 2004).

1. Estar presente o ausente en presencia o ausencia del patógeno.
2. Concentración constante y directamente relacionada con la concentración del patógeno.
3. No debe poder multiplicarse en el medio contaminado
4. Debe ser identificable fácilmente
5. No debe ser patógeno para los humanos
6. Debe tener igual periodo de supervivencia en el medio ambiente que el patógeno
7. Debe poder ser detectado fácilmente y por métodos sencillos

2.2.1 Coliformes fecales: Son bacterias entéricas no patógenas para los humanos y su presencia se relaciona con contaminación fecal (Guzmán y Campos, 2004). Los coliformes fecales son un indicador que se encuentra en altas concentraciones en el lodo (Keller et al, op cit), y su concentración disminuye en la misma proporción que las bacterias patógenas lo hacen, al someter el lodo a un tratamiento de estabilización o desinfección (Guzmán y Campos, 2004).

Estos microorganismos pueden recrecer después de haber sido disminuidos hasta los límites de detección de la técnica, si se dan las condiciones ambientales adecuadas para su reproducción o si se presenta recontaminación del material.

2.2.2 Fagos: Estos microorganismos son virus parásitos de bacterias, y es posible considerarlos como indicadores de virus entéricos debido a su similar estructura, estos microorganismos son incapaces de reproducirse fuera del huésped bacteriano (Guzmán y Campos, 2004), y su resistencia en muchos casos es mayor que la presentada por los virus en los procesos de tratamiento (Mocé-Llivina et al, op cit).

Varios estudios han utilizado los fagos somáticos como indicadores de virus entéricos (poliovirus, coxsackievirus, echovirus y reovirus), y se ha encontrado que su concentración es menos variable y son más resistentes que otros grupos de fagos (Lasobras et al, citado por Guzmán y Campos, 2004).

2.2.3 Huevos de helminto: Los huevos de helminto (*Ascaris* sp, *trichuris* sp, *toxocara*, *uncinaria* sp, *oxiuro*, *capilaria*, *taenia* sp, *hymenolepsis* sp), por su gran resistencia a la mayoría de procesos de tratamiento y su presencia en cantidades considerables en el lodo, son un indicador muy importante de la eficiencia de un tratamiento (Strauch & Carrington, 1992, citados por Gaspard et al, op cit). Las técnicas de análisis permiten determinar los huevos de helminto totales y los viables; sin embargo, para determinar la eficiencia de un tratamiento de desinfección del lodo, los huevos de helminto totales no son los requeridos, ya que únicamente los viables son los susceptibles de causar infecciones (NOM-004- ECOL, 2002). Guzmán y Campos (2004) también indican que es importante analizar la concentración de huevos viables más que la de totales, ya que los primeros son los que determinan el riesgo parasitológico del material.

Varios estudios han evaluado la eficiencia de los huevos de helminto como indicadores de contaminación parasitaria frente a los quistes de *giardia lamblia*, después de someter el lodo a tratamientos de desinfección (Gaspard & Schwartzbrod, op cit). Sus resultados han reportado que hay mayor presencia de huevos de helminto viables en el lodo, ya que el lodo doméstico es contaminado predominantemente por estos microorganismos, debido a su capacidad de sobrevivir en ambientes hídricos (Ghiglietti et al, 1993, Reimers et al, 1998, Gaassenbek & Borgsteede, 1998, citados por Gaspard & Schwartzbrod, op cit).

## 2.3 TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN DE LODOS

Los huevos de helminto, considerado el indicador de mayor resistencia, responden a los tratamientos físicos que involucran la temperatura, radiación, ultrasonido y almacenamiento; de igual forma responden a los cambios biológicos que se dan en el compostaje, y a los cambios químicos generados por aumento de pH.

La estabilización biológica aerobia y anaerobia a temperaturas termofílicas y el compostaje, han probado ser métodos efectivos en la remoción de huevos de helminto. La temperatura es el factor principal en estos tratamientos, y el tiempo de tratamiento varía con la temperatura empleada. A menor temperatura se requiere mayor tiempo de tratamiento. Para obtener un material completamente saneado, esta temperatura debe ser uniforme en todo el material.

En los tratamientos químicos que aumentan el pH, se genera amoníaco, el cual es un componente muy tóxico para los enterovirus, por lo cual su concentración disminuye a medida que la generación de amoníaco aumenta. El amonio causa que el RNA de los virus se fragmente.

2.3.1 Tratamientos de estabilización y desinfección: Dentro de un tren de tratamiento de lodos la estabilización es el proceso mínimo requerido para poder disponer adecuadamente el material, ya que en este proceso se disminuye el potencial de degradación de la materia orgánica, la atracción de vectores y la generación de olores. Sin embargo, la mayoría de estos procesos no disminuyen la concentración de microorganismos patógenos hasta el nivel necesario para aprovechar benéficamente este material.

- Digestión biológica anaerobia mesofílica

La digestión anaerobia es la técnica más utilizada seguida por la digestión aerobia y el compostaje (Ponugoti et al, op cit). Su eficiencia depende de varios factores, dentro de los que se encuentran: pH, temperatura, tiempo de retención, contenido de sólidos volátiles, carga volumétrica, humedad, mezcla, entre otros.

El objetivo de la digestión es la estabilización del material y no su desinfección. Las reducciones microbiológicas reportadas después de un proceso de digestión anaerobia se encuentran entre 1 y 1.5 unidades logarítmicas (Gepsen et al, op cit), y entre 1 y 2 unidades logarítmicas para bacterias y virus (Pedersen, 1981, citado por Ponugoti et al, op cit).

Ponugoti et al (1997), encontraron que los lodos estabilizados mediante digestión anaerobia adquieren características de biosólidos clase B. Guzmán y Beltrán (2005) encontraron que las concentraciones de indicadores de contaminación fecal, en el lodo digerido anaerobicamente, no fueron reducidas lo suficiente para que el material presentara características de biosólido clase A, y pudiera ser utilizado sin restricciones en aplicaciones agrícolas.

- Estabilización aerobia mesofílica

En análisis realizados en Dinamarca, se encontró que la concentración de bacterias en el lodo digerido anaerobicamente es aproximadamente 1 unidad logarítmica menor que en el digerido aerobicamente (Gepsen et al, op cit).

Se ha encontrado que la eficiencia de la digestión anaerobia es superior a la digestión aerobia, en términos de desinfección (Ponugoti et al, op cit); sin embargo, ninguna permite obtener un lodo saneado (Guzmán y Campos, 2004).

2.3.2 Tratamientos de desinfección: En muy pocas plantas de tratamiento de agua residual se implementan tratamientos de desinfección, que permitan disminuir el contenido patogénico para utilizar los lodos en la agricultura, y en las etapas del tratamiento tradicionales (espesado-estabilización-almacenamiento-deshidratación) no se obtienen los niveles de desinfección requeridos. Se presentan a continuación algunos de los tratamientos de desinfección más comunes.

- Tratamiento Alcalino y térmico

En este proceso, la cal es adicionada en suficiente cantidad para subir el pH del lodo, y esta dosis varía con el tipo de lodo y la concentración de sólidos. El alto pH crea un ambiente que mata o retarda sustancialmente las reacciones microbianas que generaran olores y atracción de vectores. Este proceso inactiva virus, bacterias y otros microorganismos presentes, ya que los agentes alcalinos inducen cambios en la naturaleza coloidal del protoplasma, lo que causa la muerte de la

célula (Metcalf & Eddy, 1996 citado por Keller et al, op cit). Valores de pH superiores a 11 producen la desnaturalización de la capa proteínica de los virus y la destrucción de los mismos (Arboleda, 2000).

La mayoría de plantas de tratamiento que implementaron el tratamiento alcalino pueden generar lodos tipo A y Tipo B. Los requerimientos para generar un lodo clase B son: mantener el pH de los lodos sobre 12 por 2 horas, y mantenerlo en 11,5 por 22 horas (Farzadkia & Mahvi, 2004). Para producir un lodo clase A se debe mantener el pH sobre 12 por 72 horas y una temperatura de 52°C por 12 horas durante el tiempo en que se registran valores de pH sobre 12, y para finalizar se deben someter a secado hasta alcanzar una concentración de sólidos mayor al 50% (USEPA, 2000). Este proceso puede ser adaptado para utilizar temperaturas sobre 70°C durante 30 minutos mientras se mantiene un pH sobre 12 (USEPA, 2000).

Varios estudios indican los buenos resultados que se obtienen al tratar alcalinamente el lodo, debido a los altos valores de pH. Este efecto puede ser complementado al utilizar óxido de calcio (CaO) como material alcalino, ya que la hidratación que sufre este compuesto al reaccionar con la humedad del lodo, aumenta la temperatura del material. Algunos autores como Keller et al (1999), afirman que el mantenimiento del pH sobre 12 y las altas temperaturas son factores importantes que en combinación, eliminan el contenido patológico del lodo.

Este tratamiento busca aumentar el pH sobre 12, ya que este incremento crea un ambiente agresivo y poco adecuado para la supervivencia de los microorganismos. El grado de inactivación obtenido en el tratamiento alcalino depende del pH inicial y de la duración del almacenamiento (Eriksen et al, op cit). En este tratamiento pueden utilizarse cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) o cal viva (CaO), aunque esta última es preferida por la reacción exotérmica generada.

Aunque puede adicionarse cal al lodo antes de su deshidratación, se ha determinado que el tratamiento alcalino es más eficiente cuando se aplica a lodos con mayor contenido de materia seca (Gaspard et al, 1996, Marcinkowski, 1985, citados por Mignotte-Cardiergues et al, op cit).

En el estudio realizado por Gepsen et al (1997) se encontró que después del tratamiento con cal viva no se detectaron fagos somáticos, Mignotte-Cardiergues et al (2001) determinaron en su estudio que este tratamiento inactiva patógenos como la salmonella y los huevos de nemátodo. Keller et al (2004) demostraron que la desinfección con cal es un método eficiente de desinfección.

En el estudio realizado por Mignotte-Cardiergues et al (2001) se determinaron los efectos de la cal viva y el almacenamiento posterior al tratamiento en el comportamiento de los microorganismos patógenos (salmonella y huevos de nemátodo) presentes en el lodo en muestras sólidas (23% de sequedad) y líquidas (2-3% de sequedad). En el estudio se probaron varias dosis de cal, desde 15% hasta 45%, las cuales se mezclaron con el lodo por 10 minutos y se almacenaron por 2 meses. En el estudio, los autores encontraron que la estabilización con cal modifica ciertas características del lodo, como la sequedad y el pH; sin embargo, en el lodo líquido, su contenido de materia seca no fue afectado por el tratamiento, mientras que en el sólido, el porcentaje de materia seca aumentó desde un 23% hasta un 31% con la dosis de 45% de cal. Se alcanzaron valores de pH de 10, 11.5 y 12 para las dosis 15%, 30% y 45% respectivamente. Sin embargo se define que el aumento de pH depende del lodo y no pueden extrapolarse estos resultados sin realizar pruebas para cada tipo de lodo en particular. Por lo tanto, según los autores, la eficiencia de este tratamiento debe basarse en el pH alcanzado y no en la cantidad de cal aplicada. En los análisis realizados a las muestras, se encontró que la cal tiene un efecto significativo en la salmonella, ya que no se detectó en ninguna de las muestras de lodo tratado después de 24 horas, concluyéndose que cuando el pH es mayor de 10.7 la salmonella es eliminada y no hay peligro de recrecimiento en 60 días. Al analizar en las muestras líquidas los huevos viables de nemátodo, se determinó que el tratamiento alcalino no ejercía ningún efecto sobre estos microorganismos, contrario a lo ocurrido en las muestras sólidas, en las cuales el número de huevos de nemátodo

decreció en factores de 2, 6 y 7 después de la adición de 15, 30 y 45% de cal, respectivamente. Se estudió el efecto del almacenamiento de las muestras tratadas por un tiempo igual a 60 días, encontrándose que el número de huevos de nemátodo decrece después de 15 días cuando el pH se mantiene en 12, y si el pH se mantiene en 11,5 la reducción se alcanza en los 60 días.

Se demostró que la inactivación de los patógenos mediante este tratamiento depende del microorganismo, el pH, la sequedad del lodo, y la duración de este efecto. Lo que indica, que un pH alto juega un papel importante en la inactivación de estos microorganismos, y que este aumento de pH no es proporcional a la cantidad de cal adicionada sino depende del tipo de lodo. Se esperó que el aumento de temperatura después de aplicar la cal viva fuera más significativo; sin embargo, en las muestras líquidas no se reportó este incremento, y en las muestras sólidas, sólo se incrementó este parámetro en 9°C. Los factores que pudieron influir en estos resultados son las condiciones ambientales del ensayo. Fue posible demostrar que la temperatura no se incrementa homogéneamente en todo el lodo, diferente al pH.

En las condiciones del estudio, el tratamiento con cal permitió obtener un lodo sólido desinfectado en 24 horas con valores de pH mayores que 12.5, en 7 días si el pH se mantiene en 12, y en 14 días si el pH permanece sobre 11.5. Los autores demostraron que la salmonella es fácilmente eliminada de un lodo cuando este es sometido a tratamiento alcalino, tanto en muestras sólidas como líquidas, concordando con los resultados obtenidos por Jiménez et al (2000).

El estudio realizado por Eriksen et al (1995) también evaluó el efecto de la cal en la desinfección del lodo, utilizando los huevos de *Ascaris* (huevos de nemátodo) como indicadores del tratamiento. En el estudio se adicionó 43.5% de CaO en base seca, y se almacenaron las muestras tratadas por un tiempo de cinco meses. Se utilizó una mezcla de lodo con un porcentaje de sólidos del 20%. La adición de la cal aumentó el pH hasta 12, el cual fue conservado en todo el tiempo de almacenamiento. En el estudio se encontró que después de 10 semanas de almacenamiento no se encontraron huevos de *Ascaris* en el lodo. Con base en este ensayo, se determinó que el tratamiento con cal que mantenga un pH sobre 12 durante 10 semanas produce un lodo libre de estos parásitos, y puede utilizarse en la agricultura como enmienda orgánica. La temperatura liberada por la reacción exotérmica de la cal viva y el agua presente en el lodo aumentó la temperatura hasta 45°C, pero esta no influyó en la inactivación de los huevos de *Ascaris*, ya que en la muestra tomada la segunda semana de almacenamiento se encontraron huevos viables; sin embargo, las temperaturas alcanzadas pueden ser mayores, como las encontradas por Keller et al (2004) en su estudio, realizado en muestras sólidas y líquidas de lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual doméstica, ya que después de adicionar dosis de CaO entre 10% y 60%, las temperaturas estuvieron entre 70°C y 30°C, y el pH se mantuvo sobre 12.

Keller et al (2004) evaluaron las concentraciones de coliformes fecales y huevos de helminto a diferentes tiempos de almacenamiento. No se detectaron huevos de helminto en las muestras de lodo tratadas con dosis de cal entre 30 y 60%, y solo a bajas concentraciones, como 10 y 20%, se detectaron algunos huevos no viables. Respecto a los coliformes fecales, encontraron que sólo con dosis de 10% de CaO se presentaba recrecimiento después de 30 días de almacenamiento, esto acompañado de una disminución en el pH. En las dosis 30 a 60% no se presentó este fenómeno.

Eriksen et al (1995) encontró que la distribución de los huevos de *Ascaris* es muy importante en el efecto alcalino de la cal, ya que una distribución homogénea y no tan concentrada, como suele presentarse en el lodo, hace mucho más eficiente el tratamiento y hace que el pH alcalino afecte a todos los huevos por igual.

En el estudio realizado por Eriksen et al (1995) se comprobó que el tiempo de almacenamiento a un pH mayor de 12 reduce la habilidad de los huevos para embrionar cuando son suspendidos en una solución con pH neutro. Se encontró que una dosis que permita alcanzar un pH de 12 durante



más de 10 semanas, genera un efecto irreversible y bloquea la habilidad de los huevos de *Ascaris* para desarrollar su etapa infectiva.

Con base en los resultados de los estudios realizados, es posible concluir que el encalado destruye los patógenos en el lodo mediante dos fenómenos: incremento del pH y de la temperatura; sin embargo, muchos trabajos han investigado la inactivación de los patógenos debido al aumento del pH, y sólo unos pocos han investigado la inactivación de los huevos de *Ascaris* mediante la combinación del pH y la temperatura generados por la adición de la cal viva al lodo (Banaset al, op cit).

Es importante resaltar que el comportamiento de los microorganismos patógenos frente a los tratamientos de desinfección es diferente, y depende de cada microorganismo. En el tratamiento alcalino, el *E. Coli* y *Enterococci* son más resistentes que la salmonella, pero menos que los huevos de nemátodo (Mignotte-Cardiergues et al, op cit).

Es frecuentemente sugerido en la literatura que el tratamiento del lodo con cal reduce el riesgo en la utilización agrícola del lodo (Schuh et al, 1985 citado por Banas et al, op cit). Sin embargo, se ha dicho que el encalado del lodo cuando se alcanzan valores de pH de 11,5 por 24 horas, tiene poca influencia en los huevos de *Taenia*; y aun después de 6 meses, los huevos continúan latentes (Crewe & Owen, 1983, citados por Banas et al, op cit).

La estabilización con cal es generalmente más costo-efectivo y más simple que otras alternativas de tratamiento, y la calidad de los lodos resultantes es superior. Y aunque la adición de cal resulta en un modesto incremento en el volumen del lodo, este método generalmente requiere menos espacio que otras alternativas (Farzadkia & Mahvi, op cit). Adicionalmente, el tratamiento alcalino tiene grandes ventajas respecto a otros, ya que reduce los olores en el lodo, lo estabiliza, incrementa su contenido de calcio (Banas et al, op cit), y contribuye a su deshidratación (Andreoli et al, 1997, citado por Keller et al, op cit); sin embargo, los altos valores de pH limitan su utilización en la mayoría de cultivos (ICA, 1992).

Con base en una serie de estudios realizados por National Lime Association, en los cuales se comparó la estabilización alcalina, el compostaje, el secado térmico y la digestión, se encontró que la estabilización alcalina es un método con 60% menos de costo unitario que las otras alternativas (Farzadkia & Mahvi, op cit).

La pasteurización es un tratamiento de desinfección que elimina patógenos, sin embargo varios estudios han comprobado que el recrecimiento de las bacterias puede ocurrir en lodos pasteurizados. (Keller et al, op cit). Ward et al (1999) observaron que la salmonella crece a mayores densidades en el lodo pasteurizado que en el lodo crudo.

El estudio realizado por Keller et al en 2004 demostró que la pasteurización y la estabilización con cal son métodos de desinfección eficientes para remover los huevos de helminto del lodo. Sin embargo la pasteurización tiene ventajas y desventajas, ya que este tratamiento incrementa el problema de olor en la planta, y según Gonçalves et al, 1998, este proceso solo puede ser económico si se usa el biogas producido en la planta como energía térmica para la higienización del lodo mediante pasteurización (Keller et al, op cit).

Varios estudios han demostrado que la pasteurización del lodo (70°C por 30 minutos) elimina todos los enterovirus presentes en el lodo.

## 2.4 BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PTAR EL SALITRE

Las características y la cantidad de lodos que se generan en una planta de tratamiento dependen de varios factores, tales como la composición del agua residual y el tipo de tratamiento utilizado. A continuación se presenta el tren de tratamiento empleado en la PTAR El Salitre para el agua residual y el lodo.

La PTAR El Salitre trata en promedio  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua residual, proveniente de la cuenca norte de la Ciudad de Bogotá, en la cual residen aproximadamente 2'100.000 habitantes. El aporte de agua residual industrial que llega a la PTAR es muy bajo, debido a los controles de vertimientos que se llevan a cabo en la cuenca, por lo cual, el agua tratada es un agua residual en su mayoría doméstica.

El agua residual influente a la PTAR El Salitre, recibe un tratamiento primario químicamente asistido (TPQA), en el cual se adicionan cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) como coagulante, y un polímero aniónico como floculante, para mejorar las eficiencias de remoción de las partículas (sólidos totales) y de la materia orgánica ( $\text{DBO}_5$ ).

El sistema de tratamiento del agua está compuesto por tres etapas:

**Toma de agua:** en esta etapa se eliminan los sólidos más gruesos que llegan a la planta mediante un conjunto de cuatro rejas gruesas. El caudal que atraviesa estas rejas es elevado por una batería de tornillos de Arquímedes, 9 metros por encima de su cota de llegada, con el fin de que a partir de este punto el transporte del caudal se realice por gravedad.

**Pretratamiento:** compuesto por 4 rejas finas de limpieza automática y 3 desarenadores dobles cada uno de 6 metros de ancho por 8 m de largo. En el inicio de los tanques desarenadores se adiciona el cloruro férrico, el cual se mezcla con el caudal de agua gracias al movimiento generado por una serie de sopladores ubicados en el fondo del tanque en una de sus paredes laterales. Este movimiento, además de permitir la mezcla del coagulante, ayuda en la separación de arenas y grasas contenidas en el agua residual. Al terminar el recorrido del agua en los desarenadores se aplica el polímero aniónico.

**Tratamiento primario:** el tratamiento primario se compone de ocho tanques decantadores, en cada uno de estos tanques se produce la sedimentación de los sólidos que serán separados del agua residual, y constituirán el lodo primario.

Diariamente se producen  $7400 \text{ m}^3$  de lodo primario con un porcentaje de humedad del 99%, el cual es extraído del fondo de los ocho sedimentadores primarios para que inicie su tratamiento.

**2.4.1 Tren de Tratamiento del Lodo:** Se llama tren de tratamiento de lodos a un conjunto de estructuras dispuestas en determinado orden, las cuales permiten mejorar las características físicas y químicas del lodo, de tal forma que al finalizar su tratamiento sea más fácil su manejo, disposición y utilización.

El tren de tratamiento del lodo implementado en la PTAR El Salitre (véanse Figuras 1 y 2), está compuesto por las siguientes estructuras:

**Dos espesadores en paralelo:** estructuras encargadas de concentrar a un mayor porcentaje de sólidos el lodo primario. El lodo que se extrae del fondo de estas estructuras es llamado lodo espesado y tiene un porcentaje de sólidos promedio del 4%. Diariamente se toma una muestra del

lodo espesado para conocer la cantidad de sólidos totales y volátiles y su pH, el promedio histórico de estos datos se presenta en la tabla 3.

Tres digestores anaeróbicos en paralelo: en estas estructuras se estabiliza el lodo espesado mediante la reducción de los sólidos volátiles en un 41.8%. En estas estructuras se producen diariamente 15000 m<sup>3</sup> de biogás.

Cinco filtros banda: Equipos empleados para deshidratar el lodo digerido hasta una humedad promedio del 70 ± 2%. Las características del lodo deshidratado se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Características promedio del lodo espesado y lodo deshidratado PTAR El Salitre.

	Sólido total	Sólido volátil	pH
Espesado	45000 mg/l	24300 mg/l	6.4
Deshidratado	327141 mg/Kg BS*	162786 mg/Kg BS*	7.4

\*BS: Base Seca

Fuente: Laboratorio PTAR El Salitre

2.4.2 Caracterización del lodo y biosólido: El lodo producido en la PTAR El Salitre es caracterizado en las diferentes etapas del tratamiento: lodo primario, lodo espesado, lodo digerido y lodo deshidratado.

El lodo deshidratado, también llamado biosólido, es sometido constantemente a análisis físico químicos, los cuales se realizan en el laboratorio del Acueducto de Bogotá. Mensualmente se envían dos muestras, una puntual y una compuesta, en la primera se analizan los parámetros físico químicos y en la segunda se mide la concentración de metales pesados. En la tabla 4 se presentan estas concentraciones y se realiza un paralelo con las máximas permitidas por USEPA.

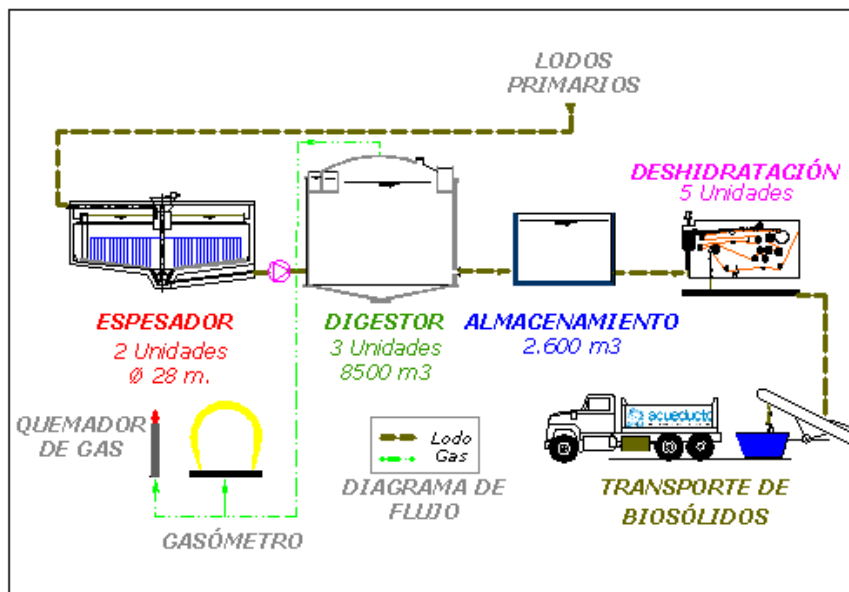


Figura 1. Tren de tratamiento de lodos PTAR El Salitre.



Figura 2. Procesos del tren de tratamiento de lodos PTAR El Salitre.

La caracterización del lodo deshidratado ha sido estudiada, y se ha identificado que su aplicación mejora la estabilidad de los suelos, aumenta su capacidad de campo, evita la erosión y promueve la vida vegetal gracias a los macronutrientes, micronutrientes y materia orgánica que proporciona.

2.4.3 Utilización actual del lodo deshidratado: En la actualidad el lodo deshidratado es transportado hasta el Relleno Sanitario Doña Juana, en donde se utiliza como material de cobertura de las celdas clausuradas (véase Figura 3), después de mezclarlo con el suelo propio del terreno en proporción 2:1 (suelo:lodo). Este procedimiento ha permitido revegetar en menor tiempo estas zonas, y mejorar las características de la vegetación respecto a resistencia. Con base en los monitoreos realizados al suelo y a las fuentes de agua adyacentes al terreno, se ha determinado que la aplicación del lodo no ha influido en sus características físicas ni químicas.

Tabla 4. Concentraciones de metales pesados en el biosólido PTAR El Salitre.

Parámetro	Concentración Salitre	EPA 40 CFR 503 (mg/Kg Base Seca)
Arsénico	3.2	41
Cadmio	6.8	39
Cobre	157	1500
Cromo	101.1	1200
Plomo	98.4	300
Mercurio	3.15	17
Niquel	45.9	420
Selenio	3.95	100
Zinc	1016	2800



Figura 3. Cobertura de celdas clausuradas en Doña Juana.

- Antecedentes Investigativos PTAR El Salitre

Al igual que en muchos países, en Colombia se vienen realizando estudios e investigaciones que tienen como objetivo caracterizar el lodo producido en las plantas de tratamiento de agua residual,

para determinar alternativas de utilización que aprovechen las ventajas del material sin generar problemas en la salud de la población o en el ambiente.

En ciudades como Cali, Medellín y Bogotá se han adelantado proyectos investigativos debido a la gran cantidad de biosólidos producidos diariamente, a los inconvenientes técnicos y operativos que estos generan, y al aumento en los costos de transporte y disposición de este material.

La PTAR El Salitre, desde el inicio de su operación, ha realizado investigaciones orientadas a determinar el grado de aprovechamiento de los lodos en diferentes actividades bio-remediadora de suelos, recuperador de terrenos degradados, acondicionador y mejorador de suelos, materia prima para materiales de construcción, entre otras. Todas estas investigaciones han arrojado resultados preliminares importantes.

Los resultados encontrados fueron la base para iniciar una línea investigativa que entrelace todos los factores que pueden afectar la utilización del lodo, y ataque cada proyecto desde todos los puntos de vista.

- Investigaciones Preliminares

Dentro de las investigaciones con fines agrícolas desarrolladas por la PTAR El Salitre se encuentra la evaluación del potencial agronómico de los lodos en el desarrollo, crecimiento y producción del cultivo de Rábano Rojo. En este estudio se demostró que con ciertos porcentajes de mezcla suelo:lodo, la productividad del cultivo se incrementa, al igual que los porcentajes de germinación, peso seco de hojas y raíz, y área foliar.

Las proporciones de mezcla suelo:lodo, que permitieron obtener los mejores resultados fueron 0.33:1 y 1:1. Las concentraciones de metales pesados en los rábanos cosechados, para estos porcentajes de mezcla, no superaron las máximas permitidas para alimentos. Se encontró que la utilización de lodo puro, sin mezclarlo con suelo, no permite el crecimiento adecuado de las plantas y retarda su germinación.

Una investigación más reciente, permitió encontrar indicadores de contaminación fecal en los lodos generados en la planta en las diferentes etapas de tratamiento (lodo espesado, lodo estabilizado y lodo deshidratado), y poder clasificarlo según la normatividad USEPA según la concentración de coliformes fecales, enterovirus y huevos de helminto. En este estudio se midieron los fagos como indicadores de enterovirus, por ser más sencillo el procedimiento y menos costoso el análisis.

Las concentraciones encontradas de coliformes fecales, fagos F específicos, fagos somáticos y huevos de helminto fueron  $1.6E+05$  UFC/g base seca,  $7.9E+01$  PFP/g BS,  $5.0E+03$  PFP/g base seca, y 10.6 Huevos viables/4g base seca, respectivamente.

Con base en este estudio se concluyó que el lodo deshidratado generado en la PTAR El Salitre presentaba características de biosólido clase B. Con el fin de superar este inconveniente, el ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, en su Plan de Investigación, contempla la evaluación de ciertos tratamientos de desinfección, que permitan eliminar los riesgos al aplicar el material en terrenos agrícolas, y generar un producto atractivo para el país.

- Aplicación agrícola de lodos en Colombia

Varias de las investigaciones realizadas en la PTAR El Salitre permitieron conocer el potencial que tiene el lodo deshidratado como acondicionador de suelos, de igual forma se conocieron sus desventajas y riesgos al ser utilizado en terrenos agrícolas o pecuarios. Al relacionar estos

resultados, con el mercado potencial que puede existir para este tipo de producto, se definió como primera alternativa de aprovechamiento, la utilización agrícola del lodo.

El gran déficit de fertilizantes que existe en Colombia influenció también esta decisión, ya que la producción interna en los años 1998-1999, según datos de la FAO, fue de 19.000 Ton, mientras que la demanda fue de 596.000 Ton de fertilizantes químicos. Con base en estos datos, se consideró que los lodos tratados podrían disminuir en algún grado el déficit de fertilizantes en el país, gracias a su contenido de nutrientes y materia orgánica.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del tratamiento térmico y alcalino y el secado en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre, y su influencia en las características físicas y químicas y del biosólido para su utilización agrícola.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Revisar y recopilar información bibliográfica técnica y experiencias nacionales e internacionales sobre la aplicación de técnicas de desinfección.

Identificar el nivel de desinfección requerido en el biosólido de acuerdo con la normatividad y el tipo de aplicación.

Diseñar, implementar y operar a escala piloto las técnicas de tratamiento.

Monitorear la operación de los tratamientos mediante análisis físicos, químicos y microbiológicos

Comparar las concentraciones de microorganismos patógenos alcanzadas al operar los sistemas de desinfección con la normatividad internacional.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 TRATAMIENTO TÉRMICO

En este tratamiento se sometió el lodo espesado y el lodo deshidratado a ciertas temperaturas por un periodo de tiempo determinado, después del cual se almacenó el material tratado a condiciones ambiente para conocer la posibilidad de recrecimiento de los indicadores bacterianos.

4.1.1 Equipo: El equipo de calentamiento empleado se construyó en el taller de la PTAR El Salitre utilizando un tanque metálico de 0,2 m<sup>3</sup> de capacidad, el cual se dividió en dos zonas zona de calentamiento y zona de tratamiento. En la primera zona (véase Figura 4) se instaló una resistencia eléctrica inmersa de 2400 W, encargada de aumentar indirectamente la temperatura del material a tratar. En la zona de tratamiento se ubicó el mecanismo de mezcla, el cual fue impulsado eléctricamente mediante un motor de 1 hp en el tratamiento del lodo espesado, mientras que para el lodo deshidratado la mezcla se realizó manualmente. La mezcla en ambos casos fue constante en todo el tiempo de tratamiento. En el lodo espesado se trabajó con una velocidad de 60 rpm y en el biosólido de 30 rpm aproximadamente. El mecanismo de mezcla para el lodo espesado consistió en un agitador compuesto por un eje y 8 pares de cucharas, mientras que para el biosólido fue necesario ubicar dentro del tanque un mezclador con álabes internos, el cual cumplía la función de rotar sobre su propio eje para agitar y calentar homogéneamente el biosólido (véase Figura 4). Durante un periodo de un mes se calibraron los dos reactores con el fin de realizar ajustes mecánicos y eléctricos, conocer los tiempos en que se lograría la temperatura necesaria de tratamiento y determinar las velocidades de mezcla que permitieran la distribución homogénea de la temperatura en el material. En la figura 5 se observa el proceso constructivo del equipo de calentamiento.

4.1.2 Calentamiento del lodo espesado: Se obtuvieron 19L de lodo directamente de la salida de uno de los espesadores de la PTAR El Salitre, los cuales fueron trasladados inmediatamente al lugar de tratamiento. Se realizaron tres repeticiones por cada régimen tiempo-temperatura evaluado (véase Tabla 5).

4.1.3 Calentamiento del lodo deshidratado: Se obtuvieron 2Kg de lodo deshidratado, proveniente de los filtros de banda de la etapa de deshidratación de la PTAR El Salitre, los cuales fueron trasladados inmediatamente al lugar de tratamiento. Se realizaron tres repeticiones por cada régimen tiempo-temperatura evaluado (Tabla 6).

El tratamiento térmico, tanto para el lodo espesado como para el deshidratado, se realizó en las siguientes 6 etapas:

- a) Elevación de la temperatura en la zona de calentamiento hasta 90°C.
- b) Introducción del material en la zona de tratamiento.
- c) Calentamiento sin mezcla del material durante 10 min para el lodo espesado y durante 15 min para el lodo deshidratado.



- d) Inicio de la mezcla constante\*.
- e) Disminución de la temperatura de la resistencia para mantener en la zona de tratamiento la temperatura adecuada durante el tiempo especificado.
- f) Toma de dos muestras tratadas en recipientes esterilizados\*\*. Después de cada prueba se desinfectó el reactor y se flameó para evitar contaminación cruzada.

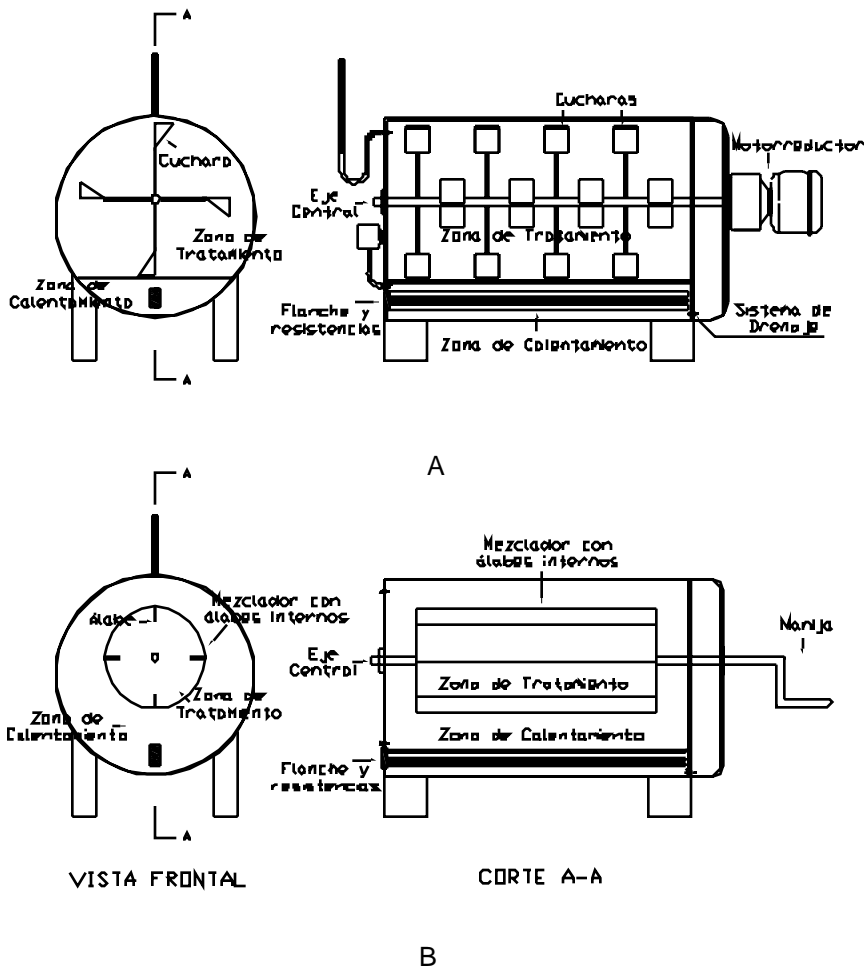


Figura 4. Reactores de Calentamiento. A: lodo espesado, B: lodo deshidratado.

\* El lodo espesado tardó 10 min y 20 min en subir su temperatura a 60°C y 80°C, respectivamente. El lodo deshidratado tardó 10 min en alcanzar los 80°C.

\*\* La primera muestra se envió al laboratorio microbiológico y la segunda se almacenó.



Figura 5. Materiales y proceso constructivo de reactor de calentamiento.

Tabla 5. Resumen de condiciones de tratamiento térmico para lodo espesado.

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Almacenamiento (días)	Repeticiones
1	60	30	7	3
2	80	30	7	3

Tabla 6. Resumen de condiciones de tratamiento térmico para el lodo deshidratado.

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Almacenamiento (días)	Repeticiones
1	80	10	7	3
2	80	30	7	3

4.1.4 Monitoreo de parámetros: Durante el tiempo de tratamiento del lodo espesado y del lodo deshidratado se monitoreo constantemente la temperatura en la zona de calentamiento y en el material mediante dos termocuplas (Koline-305® y PT100®). Al finalizar el tratamiento se evaluaron las concentraciones de coliformes fecales (CF), fagos somáticos (FS) y huevos de helminto (HH) totales y viables; de igual forma se midieron los sólidos totales (ST), los sólidos volátiles (SV), y el porcentaje de humedad.

## 4.2 TRATAMIENTO ALCALINO

Este tratamiento empleó cal viva (CaO), y se dividió en dos fases; la primera se realizó a escala banco con el fin de efectuar una evaluación preliminar de varios factores, los cuales podrían afectar la eficiencia del tratamiento alcalino respecto al aumento y mantenimiento del pH y de la temperatura, esta última generada por la reacción entre la cal viva y la humedad presente en el lodo deshidratado. Los factores tenidos en cuenta fueron: la dosis de cal, la relación Área/Volumen (A/V) de las pilas, y la cobertura de las pilas.

4.2.1 Evaluación preliminar: Las dosis evaluadas fueron 0.25, 0.45, 0.65 y 0.85 Kg CaO/Kg de lodo en base seca; estas dosis se probaron bajo diferentes escenarios: en pilas descubiertas y cubiertas con poliestireno expandido, y en pilas con dos relaciones A/V (0.3 y 0.5). Se realizaron dos repeticiones de cada combinación, lo que generó la construcción de 32 pilas de tratamiento alcalino. Las pilas se almacenaron durante 75 días.

El montaje de cada pila se realizó con aproximadamente 2 Kg de lodo deshidratado (Figura 6), cifra que varió dependiendo del porcentaje de cal empleado. La cal utilizada contenía un 85% de CaO y fue tamizada para utilizar únicamente las partículas de tamaño menor de 2 mm. La mezcla entre la cal y el biosólido se realizó manualmente en contenedores plásticos abiertos con el fin de simular la mezcla a escala real. El tiempo de mezcla dependió del porcentaje de cal, y se dio por terminada al observar una apariencia homogénea del material. El montaje y almacenamiento de las pilas se realizó en un espacio cerrado con una humedad relativa promedio del 60% y una temperatura promedio de 18°C durante todo el tiempo de la prueba. Los parámetros monitoreados se presentan en la Tabla 7.

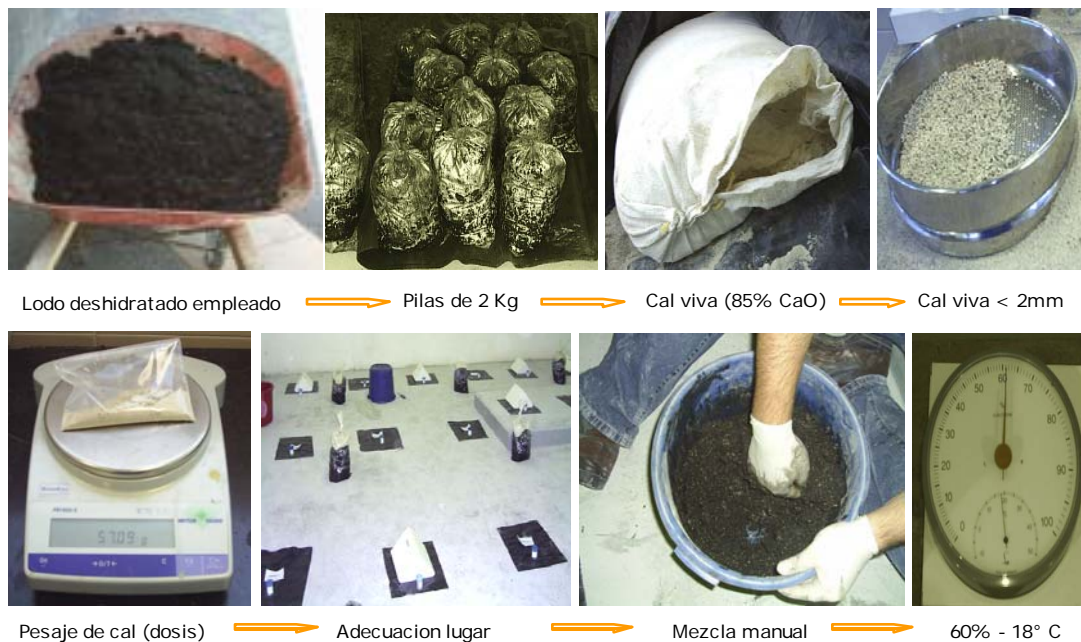


Figura 6. Procedimiento evaluación preliminar.

4.2.2 Tratamiento a escala piloto: Con base en los resultados encontrados en la prueba preliminar se determinó la dosis de cal a utilizar, y si la relación A/V y la cobertura debían tenerse en cuenta en la realización del ensayo a escala piloto. Para la construcción de la pila se utilizaron 250 Kg de lodo deshidratado y se realizó la prueba por duplicado (Figura 7). Además de los parámetros monitoreados en la prueba a escala banco (Tabla 7), también se midió la evolución de la concentración de Nitrógeno total Kjeldahl (NTK) los días 1, 2, 3, 5 y 10 de tratamiento, y el contenido de materia orgánica inicial y final.

El lugar del montaje y almacenamiento de las pilas fue el espacio utilizado en el tratamiento a escala banco, y se conservaron las mismas condiciones ambientales. Se realizó una mezcla manual mediante palas, y el tiempo aproximado de mezcla fue de 20 min.

Tabla 7. Parámetros y frecuencia de monitoreo.

Parámetro	Tiempo monitoreo	Frecuencia
pH	Primeros 30 días	24 horas
	Ultimos 45 días	72 horas
Humedad	Primeros 30 días	8 días
	Ultimos 45 días	15 días
Temperatura	1 día (primer día)	15 min
CF, FS y HH	43 días	Días 1, 7, 21 y 43



Figura 7. Procedimiento evaluación a escala piloto.

#### 4.3 TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Para la determinación de los indicadores de contaminación fecal, las muestras se enviaron al Laboratorio de Parasitología de la Pontificia Universidad Javeriana, las técnicas utilizadas se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Técnicas microbiológicas utilizadas.

Parámetro	Técnica
Coliformes fecales	Técnica de filtración por membrana EPA-625-R92/013 (1999)
Fagos somáticos	Técnica de detección y cuantificación de fagos Lasobras et al (1999)
Huevos de helminto	Norma Oficial Mexicana, 2002. Técnica para determinar y cuantificar huevos de helminto. NOM-004- ECOL (2002).

En el Laboratorio Ambiental del Centro de Innovación Tecnológica de la Universidad de los Andes se midieron los parámetros físicos y químicos de las muestras. El pH se midió in situ, siguiendo las especificaciones de la técnica SW-846 método 9045C.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 CONCENTRACIONES MICROBIOLÓGICAS INICIALES

Las concentraciones microbiológicas iniciales del lodo espesado y del lodo deshidratado se presentan en la Tabla 9 y Figura 8. Estas se tomaron del estudio realizado por Guzmán y Beltrán (2005).

Las concentraciones de CF, FS y HH encontradas (véase Figura 3) están de acuerdo con las reportadas por diversos estudios (Gantzer et al, 2001; Mendez op. cit.; Mignotte-Cardiergues op. cit., Gaspard op cit.); sin embargo, las concentraciones de HH son mucho menores que las reportadas por Jiménez et al (2001) en plantas de tratamiento mexicanas.

Tabla 9. Concentraciones microbiológicas iniciales en el lodo espesado y lodo deshidratado.

	CF (UFP/g BS)	FS (PFP/4g BS)	HH totales (Nº/4g BS)	HH viables (Nº/4g BS)
Espesado	1.0E+06	1.1E+07	4.8 a 45.6	4.0 a 38.8
Deshidratado	3.1E+06	5.3E+06	20.4 a 71.6	12.4 a 51.6

Fuente: Adaptado de Guzmán y Beltrán (2005)

Se decidió presentar un rango de valores de HH, ya que su concentración fue muy heterogénea; este comportamiento disperso también es reportado Gaspard et al (1997) y Gantzer et al (2001). En todas las muestras se encontraron HH viables, y su porcentaje respecto a los totales en el lodo espesado varió desde el 33% hasta el 85%, y en el lodo deshidratado varió desde el 38% hasta el 76%. Es importante analizar la concentración de huevos viables más que la de totales, ya que los viables son los que determinan el riesgo parasitológico que representa el material para las personas (Guzmán y Campos, op cit).

En el estudio realizado por Guzmán y Campos (2004) se encontró que la concentración de quistes de protozoos (*E. Histolytica*, *Giardia* sp, *Coccidia* sp, *Eimeria* sp.) es menor de 1 quiste viable/4g BS en el lodo deshidratado de la PTAR El Salitre, por lo que se concluyó que los huevos de helminto son más resistentes a los procesos de estabilización mesofílica (digestión anaeróbica) y deshidratación (Gantzer op cit.); por lo tanto, estos microorganismos podrían ser mejores indicadores de la eficiencia de un tratamiento de desinfección.

### 5.2 TRATAMIENTO TÉRMICO

Las concentraciones logradas, después de someter el lodo espesado y el lodo deshidratado a los regímenes tiempo-temperatura evaluados, se presentan en las Tablas 10 y 11. Para los CF, estas reducciones se presentan en unidades Log<sub>10</sub> (UL) por gramo de base seca (BS); para los FS, se presentan en UL por cuatro gramos de BS; y para los HH se presentan en porcentaje. Las

concentraciones finales encontradas después de cada tratamiento corresponden a la media geométrica de tres repeticiones por cada prueba.

6.2.1 Lodo espesado: Las concentraciones finales en el lodo espesado después de someterlo a 80°C por 30 min indican que el material tratado fue saneado y las concentraciones de CF, FS y HH viables estuvieron por debajo de los límites exigidos por normatividades internacionales; sin embargo, es necesario que el lodo espesado sea estabilizado antes de realizar su aprovechamiento agrícola, con el fin de disminuir su potencial de generación de olores y de atracción de vectores (USEPA, 2003).

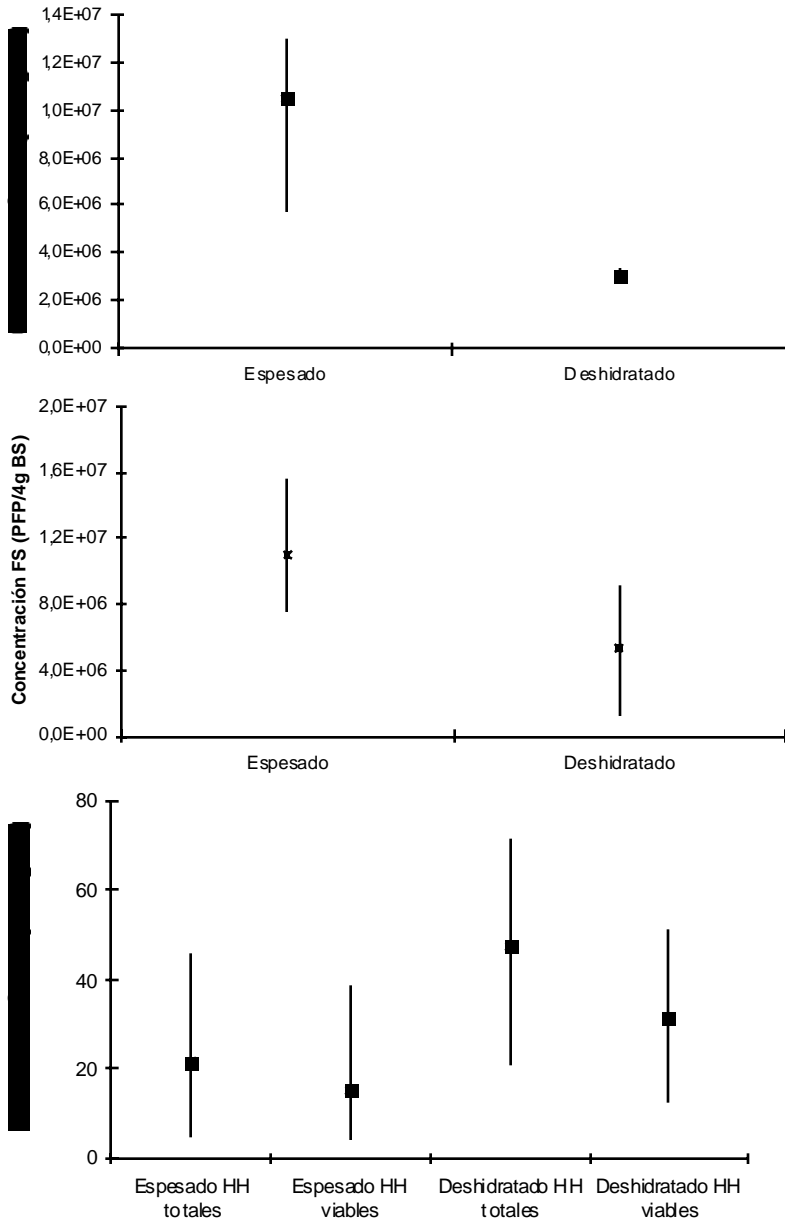


Figura 8. Concentraciones máximas, mínimas y promedio de CF, FS y HH en el lodo espesado y lodo deshidratado.

Al analizar los resultados del tratamiento 30 min-60°C en el lodo espesado (Tabla 10), se observa que los CF y los HH viables son más sensibles al tratamiento térmico que los FS. Estos resultados están de acuerdo con los reportados por Mocé-Llivina et al (2003), quienes encontraron que los FS son más resistentes a las altas temperaturas que los indicadores bacterianos, la salmonella, los virus humanos y que los huevos de nemátodos, e indican que cuando se logran reducciones entre 0.5 y 1.0 UL en los FS se garantiza la reducción de los huevos de nemátodo. Esto puede apreciarse en este estudio, puesto que los huevos de helminto viables fueron reducidos a niveles no detectables con una disminución en los fagos somáticos de 1.77 UL.

Tabla 10. Reducciones microbiológicas en el lodo espesado después de 30 min de exposición.

Temperatura	Parámetro	Concentración final	Reducción
60°C	CF (UFC/g BS)	< 1*	6.0 UL
	FS (PFP/4g BS)	2.7E+05	1.77 UL
	HH (totales/4g BS)	37.7	- 75.5%
	HH (viables/4g BS)	<0.4*	98%
80°C	CF (UFC/g BS)	<1*	6.0 UL
	FS (PFP/4g BS)	<6.3E+02*	4.2 UL
	HH (totales/4g BS)	6.4	70.2%
	HH (viables/4g BS)	<0.4*	98%

\* Dato correspondiente al límite de detección de la técnica.

Tabla 11. Reducciones microbiológicas del lodo deshidratado expuesto a una temperatura de 80°C.

Tiempo	Parámetro	Concentración final	Reducción
10 min	CF (UFC/g BS)	< 3.3E+01*	5.0 UL
	FS (PFP/4g BS)	< 3.3E+01*	5.2 UL
	HH (totales/4g BS)	5.1	89.3%
	HH (viables/4g BS)	<0.4*	99%
30 min	CF (UFC/g BS)	< 3.3E+01*	4.9 UL
	FS (PFP/4g BS)	< 3.3E+01*	5.2 UL
	HH (totales/4g BS)	<0.4*	99%
	HH (viables/4g BS)	<0.4*	99%

\* Dato correspondiente al límite de detección de la técnica.

Con base en lo anterior es posible afirmar que aunque no se llegó al nivel de inactivación requerido para los virus en los FS (< 1PFP / 4g BS), no debe descartarse la aplicación de 60°C por 30 min en el lodo espesado para convertirlo en clase A; sin embargo, es importante tener en cuenta que los virus son microorganismos muy susceptibles a diversos componentes químicos (compuestos orgánicos, metales pesados y amonio) y a ciertos microorganismos, lo que puede ocasionar diferentes respuestas al tratamiento en diferentes tipos de lodos.

De igual forma, si se considera la aplicación de una temperatura de 60°C, es necesario que en estudios posteriores se analice la presencia de otros patógenos, ya que aunque en el trabajo realizado por Guzmán y Campos (2004) se encontraron niveles de Giardia Lamblia <1 quiste viable / 4g BS en el lodo de la PTAR El Salitre, Hannan (1981), citado por Guzmán y Campos (2004), indica que este parásito resiste temperaturas de hasta 62°C. También se ha encontrado que los quistes de Cryptosporidium parvum se inactivan con temperaturas de 55°C (Whitmore, T. & Robertson, L, 1995), y que su viabilidad se reduce completamente sólo después de tratar el lodo por 30 min a 65°C (Fayer et al, 1990, citado por Whitmore & Robertson op cit); sin embargo se ha comprobado que los tratamientos que reducen los HH, disminuyen en mayor porcentaje los quistes de Cryptosporidium (Bowman, D. et al, 2000).



Los resultados obtenidos para los CF, están de acuerdo con los reportados por Mocé-Llivina et al (2003), quienes después de someter un lodo crudo a 60°C, lograron una reducción de más de 5.0 UL, demostrando que este indicador es uno de los más sensibles. Sin embargo, es importante resaltar que los resultados encontrados por Hay et al (1990), citado por Guzmán y Campos (2004), reportaron que los CF fueron las bacterias entéricas más resistentes a la inactivación térmica, con lo cual es posible suponer que la destrucción de este microorganismo indica la destrucción de la mayoría de los de su género.

El porcentaje de reducción de los HH totales fue negativo en el tratamiento a 60°C (Tabla 9), esto pudo deberse al porcentaje de recuperación de la técnica empleada en laboratorio, ya que el 100% de los microorganismos no es recuperado (Guzmán y Campos op cit), de igual forma, la toma de la muestra pudo influir en este resultado, ya que los huevos de helminto no se encuentran distribuidos homogéneamente en el material. Es claro que el desarrollo de los huevos de helminto hasta estados larvarios no se da fuera de un huésped, por lo que la posibilidad del aumento de huevos con respecto a la muestra inicial no se contempla.

5.2.2 Lodo deshidratado: En el lodo deshidratado se evaluó el efecto de la temperatura (80°C) en dos tiempos de exposición. Se encontró que en 30 minutos de tratamiento los CF, los FS y los HH se eliminan hasta ser no detectables por la técnica de análisis. De igual forma en el tratamiento que empleó solo 10 minutos se encontraron los mismos resultados para CF y FS, y aunque no se reportaron HH viables, los totales no fueron destruidos completamente. Sin embargo estos HH totales no son los requeridos para evaluar la eficiencia de un tratamiento en la desinfección del lodo, ya que únicamente los viables son los susceptibles de causar infecciones (NOM-004-ECOL 2002.) El material generado en los dos regímenes tiempo-temperatura evaluados adquiere características de biosólido clase A.

Estos resultados difieren de los encontrados por Keller et al (2004), quienes después de pasteurizar (aplicación de 70°C por 30 min) un lodo con contenido variable de sólidos (10 al 25%) no eliminaron totalmente los CF, y después de 48 horas estos microorganismos se reprodujeron; sin embargo, esto pudo deberse a diversos factores dentro de los cuales se pueden encontrar el aumento no uniforme de la temperatura debido a la mezcla, lo que pudo generar zonas sin tratar, o a la contaminación posterior al tratamiento de las muestras (Ward et al, 1999). Las reducciones alcanzadas en los CF coinciden con las encontradas en el estudio realizado por Gantzer et al (2001) en el cual se reportó una concentración final menor de 1 UFC / g BS.

A pesar de que los resultados encontrados en el lodo deshidratado para los CF y los FS, no permiten determinar cual de estos dos indicadores es más sensible al tratamiento térmico del lodo, en el trabajo realizado por Mocé-Llivina, et al (2004) se encontró que los CF son los microorganismos más fácilmente inactivados por los tratamientos térmicos. Esta diferencia pudo deberse a la naturaleza de cada biosólido, ya que a pesar de que se aplicó igual régimen de tiempo-temperatura (30 min-80°C) en los dos estudios, el biosólido de la PTAREI Salitre logró una destrucción total de los FS. Diferencias de este tipo se encuentran al comparar los resultados encontrados por varios autores que reportan altas eficiencias en la inactivación de los virus después de someter el biosólido a tratamientos de estabilización y deshidratación (Schwartzbrod et al, 1987); mientras que en otros estudios se encontraron resultados opuestos (Ahmed & Sorensen, 1997; Berg & Berman, 1980, citados por Guzmán y Campos, 2004).

Al comparar los resultados encontrados en el lodo líquido y en el lodo deshidratado, es claro que para lograr la desinfección del lodo líquido se podría requerir menos de 10 min como tiempo de tratamiento a 80°C, ya que diferentes estudios han comprobado que cuando se incrementa la concentración de ST, la transferencia de calor se dificulta, lo que hace más difícil alcanzar homogéneamente la temperatura deseada en toda la masa de lodo. (Silva et al, 2001; citado por Keller et al, op cit; Ward et al, op cit). Esta afirmación es sustentada por el estudio realizado por Foliguet et Doncoeur (1972), quienes al evaluar el efecto de una temperatura de 80°C por 10 min

en un lodo crudo encontraron que en un tiempo menor o igual al evaluado se inactivan los Poliovirus 1, los Coxsackievirus B3 y a la Salmonella paratyphi B.

El tiempo y la temperatura empleada en este trabajo, demuestran que no se requieren tiempos prolongados de tratamiento a tan elevadas temperaturas, como las evaluadas por Gantzer et al (2001) (10h-108°C), para sanear un lodo con contenido de sólidos mayores a 20%, ya que una temperatura de 80°C durante 10 min tiene un efecto significativo en la reducción de los microorganismos patógenos, y puede afirmarse que bajo las condiciones de trabajo evaluadas se logró su desinfección hasta lograr concentraciones adecuadas de indicadores bacterianos, de parásitos y de virus, para su utilización agrícola.

Con base en los resultados encontrados y en su análisis, se podría considerar como mejor opción la aplicación del tratamiento térmico al lodo deshidratado, ya que con un tiempo de 10 min a una temperatura de 80°C y con una mezcla constante, se alcanza un material desinfectado, que no requiere almacenamiento ni tratamiento posterior. De igual forma, es posible que debido a la susceptibilidad que ciertos microorganismos patógenos presentan ante las enzimas bacterianas producidas en la digestión, y a los químicos aplicados al lodo para su acondicionamiento previo a la deshidratación mecánica, se aumente la eficiencia del tratamiento térmico. También es importante tener en cuenta que esta alternativa puede llegar a ser menos costosa, ya que el material a tratar tiene un menor volumen, y no se corre el riesgo de contaminar nuevamente el material tratado por condiciones deficientes de almacenamiento; sin embargo, es importante realizar estudios a una mayor escala que aseguren la viabilidad técnica y económica del tratamiento.

Para determinar la temperatura y el tiempo adecuado para la desinfección del lodo líquido y del lodo deshidratado es necesario evaluar otras combinaciones tiempo-temperatura que garanticen la reducción microbiológica necesaria para utilizar agrícolamente el material y se logre un tratamiento efectivo en términos de costos. Según Gonçalves et al (1998), citado por Keller et al (2004), el tratamiento térmico es económico si se utiliza el biogás producido en la PTAR como fuente de energía.

**5.2.3 Recrecimiento de indicadores bacterianos:** Diversos estudios han encontrado que después de someter un lodo a un tratamiento térmico, las bacterias patógenas, como la Salmonella, pueden volver a crecer hasta concentraciones mayores que las iniciales, debido a que ciertas condiciones pueden propiciar un ambiente adecuado para su desarrollo (USEPA, 2003, Keller et al, op cit). Sin embargo, el estudio de Ward et al (1999) concluye que las únicas razones por las que se podría presentar recrecimiento de bacterias es por la aplicación deficiente de un tratamiento de desinfección, y no mantener las condiciones adecuadas de almacenamiento en el material tratado.

En este estudio se trabajó con el lodo espesado o crudo siguiendo las recomendaciones de la EPA. Sin embargo, por costos es más efectivo tratar el lodo digerido, ya que la cantidad de sólidos a tratar es menor y puede alcanzarse la desinfección con temperaturas inferiores a las necesarias por un lodo crudo, como lo indica el estudio realizado por Foliguet et Doncoeur (1972), quienes encontraron que un lodo digerido sólo requirió de 59°C para inactivar a los virus que contenía, mientras que el lodo crudo requirió una temperatura de 71°C para lograr los mismos resultados. Esto indica que en el lodo digerido puede producirse una reacción sinérgica que acelera la inactivación de los virus (Foliguet et Doncoeur, 1972), o como se explicó anteriormente, las enzimas generadas en la digestión anaeróbica pueden intervenir en la resistencia de los virus.

Los resultados encontrados respecto al recrecimiento de CF en el lodo tratado (véase Tabla 12) coinciden con los reportados por Ward et al (1999), ya que en condiciones apropiadas de tratamiento, y sin inocular sustrato o microorganismos que pudieran promover el recrecimiento, no se presentó aumento en la concentración de CF en los 7 días de almacenamiento. En el estudio de Ward et al (1999) también se monitoreó la Salmonella, la cual tampoco se reprodujo.

En el estudio de Keller et al (2004), se evidenció que después de 48h de finalizado el tratamiento térmico se presentó recrecimiento de bacterias, lo cual difiere de lo encontrado en el presente estudio, en el cual se almacenaron 12 muestras tratadas y no se presentó recrecimiento bacterial en ninguna de ellas. Con el fin de encontrar las razones de estas diferencias es necesario realizar un análisis más detallado y específico en el que se facilite la reproducción de las bacterias mediante la variación de factores como: mezcla, adición de sustrato, adición de microorganismos anaerobios, adición de Salmonella y de CF, y tiempo y temperatura de incubación adecuados

Según autores como Ganzter et al (2001), el recrecimiento es observado particularmente en tratamientos de compostaje cuando se adicionan materiales ricos en azúcares solubles los cuales actúan como fuente de nutrientes para las bacterias, y las temperaturas adecuadas para la desinfección no son alcanzadas (Giraldo y Delgado, 2001).

Tabla 12. Concentraciones de CF en el lodo almacenado

Muestra	Tratamiento	CF (UFC/g BS)
Espesado	60°C-30 min	<1*
	80°C-30 min	<1*
Deshidratado	80°C-10 min	<3.3E+01*
	80°C-30 min	<3.6E+01*

\* Dato correspondiente al límite de detección de la técnica.

Con base en los resultados encontrados, y en concordancia con Ganzter et al (2001), se concluye que la temperatura es un factor determinante en la desinfección de los lodos, y combinando la temperatura y el tiempo adecuado se consigue la desinfección del lodo hasta niveles adecuados para su utilización en terrenos agrícolas y pecuarios.

El tratamiento térmico puede clasificarse, según The Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI), citada por Gattie, D & Lewis, D (2004), y según los resultados de los estudios presentados anteriormente, como un proceso de desinfección con un nivel de eficiencia de intermedio a alto, ya que este tratamiento reduce las concentraciones de virus, helmintos, protozoos, y bacterias vegetativas. Según su clasificación, puede extrapolarse que los hongos y las mycobacterias también son inactivadas por este tratamiento. No es posible clasificar el tratamiento térmico evaluado como un proceso de alta eficiencia según la clasificación realizada por AAMI (1994), ya que no se encontraron datos publicados de su eficiencia en la destrucción del único microorganismo que requiere este nivel de tratamiento (Endoesporas Bacterianas).

5.2.4 Monitoreo de otros parámetros: Los datos de ST, SV y humedad del material tratado, confirmaron que mediante el equipo empleado, estas características no fueron modificadas (véase Tabla 13).

Los equipos de secado térmico, utilizados a escala real, aumentan la concentración de sólidos hasta un 95%, debido a la separación que se da entre el vapor de agua y las partículas sólidas del lodo deshidratado, en la etapa de calentamiento. Mediante el equipo piloto implementado en este trabajo, sólo se simuló el efecto de la temperatura y el tiempo de exposición, en la desinfección del lodo. Con el fin de aumentar la sequedad del material, es necesario introducir un equipo adicional posterior al tanque de secado que permita separar las fases sólida y gaseosa.

Tabla 13. Características físicas del material tratado.

Muestra	Sólido Total	Sólido volátil	Humedad (%)
Espesado	43000 mg/l	27600 mg/l	97
Deshidratado	-	-	71

### 5.3 TRATAMIENTO ALCALINO

Los resultados encontrados en el tratamiento realizado a escala banco permitieron determinar los factores a tener en cuenta en el desarrollo del tratamiento a escala piloto. A continuación se presenta el análisis de cada factor evaluado y los resultados encontrados en las dos escalas trabajadas.

El efecto de la temperatura en la eficiencia del tratamiento alcalino se analizó en función de tres factores: cobertura, relación A/V y dosis de CaO. Se observó que en pilas con características similares (igual dosis e igual relación A/V), la temperatura en aquellas que estuvieron cubiertas se conservó por más tiempo (véase Figura 9). Respecto a la relación A/V, se encontró que en pilas de características similares (igual dosis e igual sistema de cobertura), la temperatura disminuyó más lentamente en aquellas que tuvieron menor relación A/V (véase Figura 10). Este comportamiento es más apreciable en las pilas descubiertas, sin embargo en las cubiertas también se conservó este patrón. Los resultados encontrados eran esperados, ya que a menor relación A/V se tiene menor superficie expuesta.

Las diferencias encontradas en los perfiles de temperatura, demuestran que los factores cobertura y relación A/V influyen en el mantenimiento de las temperaturas alcanzadas, por lo cual la incorporación de estos factores podría afectar de forma positiva el proceso de tratamiento, y hacerlo más eficiente respecto al consumo de cal.

Al evaluar la influencia de la dosis, se observó que el decaimiento de la temperatura se da de manera exponencial, y que a mayor dosis se alcanza una mayor temperatura inicial (Tabla 14); sin embargo, no se observó diferencia en el tiempo de enfriamiento (véase Figura 11). Este fenómeno se apreció tanto en las pilas cubiertas como en las descubiertas. Las pilas que mantuvieron por más tiempo el calor generado fueron las cubiertas con relación A/V menor.

Las temperaturas iniciales alcanzadas están de acuerdo con las reportadas por Keller et al (2004) para dosis entre 25 y 45% CaO, pero difieren de las reportadas para las dosis 50 y 60%, las cuales fueron mayores de 60°C, y se mantuvieron por más de 30 minutos. En el estudio realizado por Mignotte-Cardiergues et al (2001) sólo se alcanzaron incrementos de 9°C en el lodo después de utilizar una dosis de 45% CaO. Estas variaciones pudieron deberse a las condiciones experimentales, tales como la mezcla, el tipo de mezclador, el almacenamiento y el tipo de cal utilizada (contenido de CaO y grado de hidratación). Los resultados de Capizzi-Banas et al (2004), corroboran lo anterior, ya que para alcanzar temperaturas entre 50 y 60°C requirieron dosis de CaO que variaron desde 47% hasta 96%.

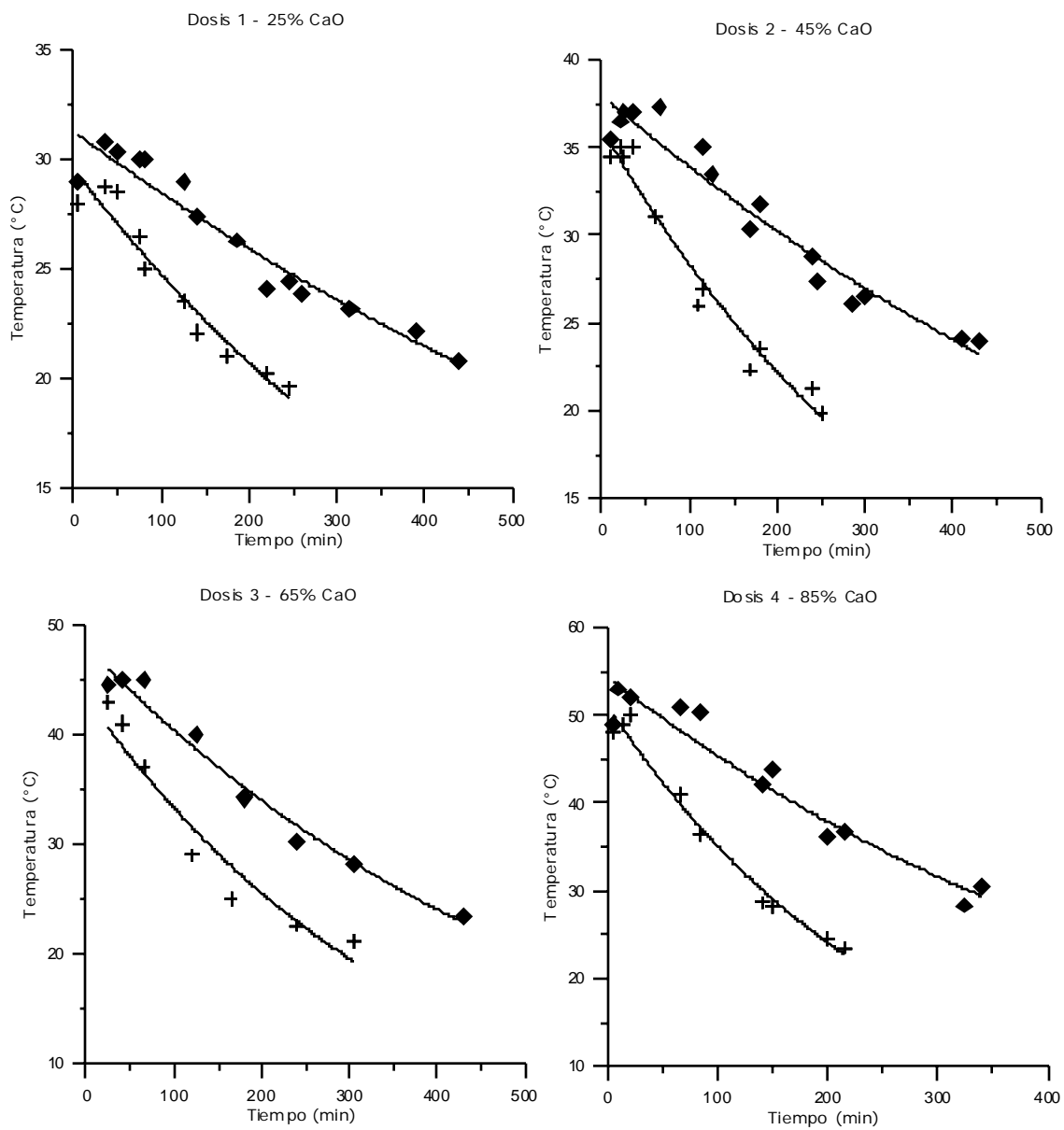


Figura 9. Efecto de la cobertura en la temperatura.

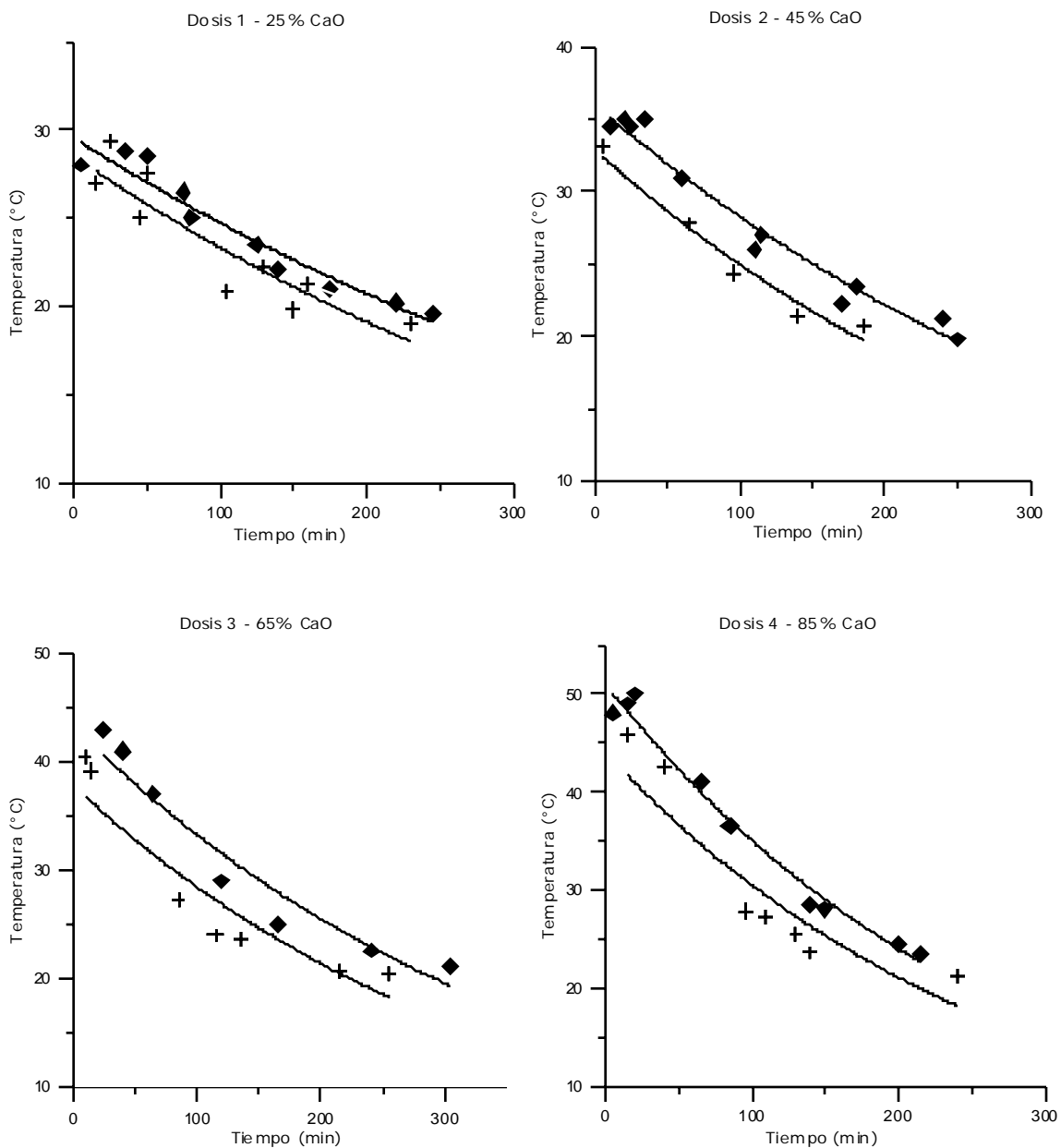


Figura 10. Efecto de la relación A/V en la temperatura.

Aunque en el estudio a escala banco se alcanzaron temperaturas mayores de 50°C, el tiempo de exposición del lodo deshidratado a estas temperaturas fue menor que el reportado por diversos autores para lograr la desinfección. (Reimers et al, 1998 y Plym-Forshell et al, 1995; citados por Gantzer et al 2001). Sin embargo, es importante tener en cuenta que aunque la temperatura alcanzada no desinfecta el material por sí sola, los valores altos de pH sí logran este objetivo.

Tabla 14. Registro de temperaturas iniciales.

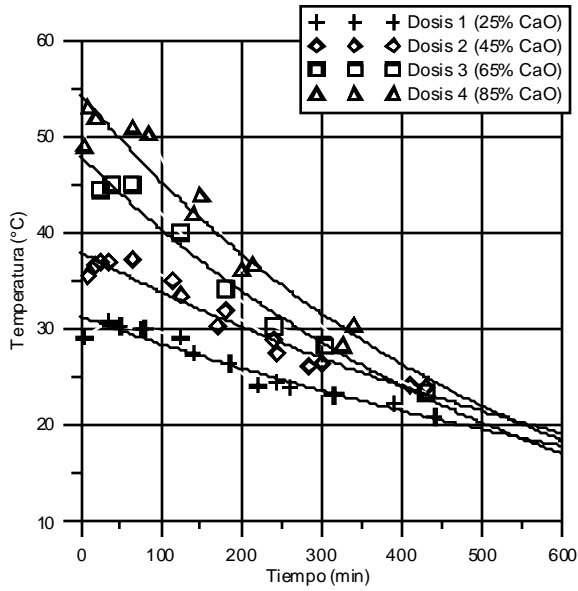
Dosis (%)	Temperatura máxima (°C)	Incremento (°C)
25	30	10
45	36	16
65	44	24
85	52	32

En el ensayo realizado a escala piloto, se observó que el volumen del material influye en el mantenimiento de la temperatura, ya que al utilizar una dosis de 25% CaO, la temperatura alcanzada ascendió hasta 42°C en algunos puntos centrales de la pila, y se mantuvo en promedio en 38°C por 4 horas, mientras que en el estudio realizado a escala banco la temperatura sólo llegó hasta los 30°C (véase Tabla 13). La variación observada entre las temperaturas alcanzadas está de acuerdo con los resultados de Ericksen et al (1995), quienes no alcanzaron temperaturas suficientes para la desinfección en su estudio a escala banco, pero dejaron claro que al aplicar el tratamiento a gran escala pueden alcanzarse temperaturas que inactivan ciertos microorganismos patógenos.

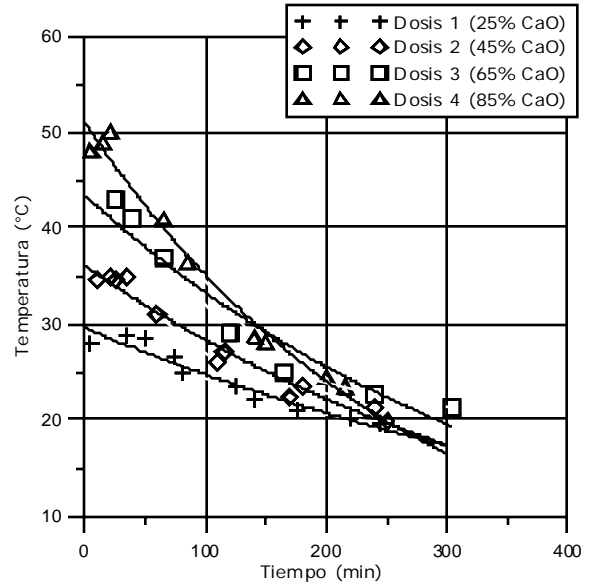
El monitoreo de la temperatura en diferentes puntos de las pilas construidas a escala piloto, permitió conocer que la temperatura no se distribuye homogéneamente en todo el material, ni se incrementa uniformemente (véase Figura 12).

En el estudio a escala banco se registraron valores de pH > 12.5 en todas las pilas, y su valor se mantuvo sobre 12 durante 16 y 58 días en las pilas con dosis 25% y 45% respectivamente. Las dosis 65% y 85% conservaron un pH sobre 12 por más de 70 días.

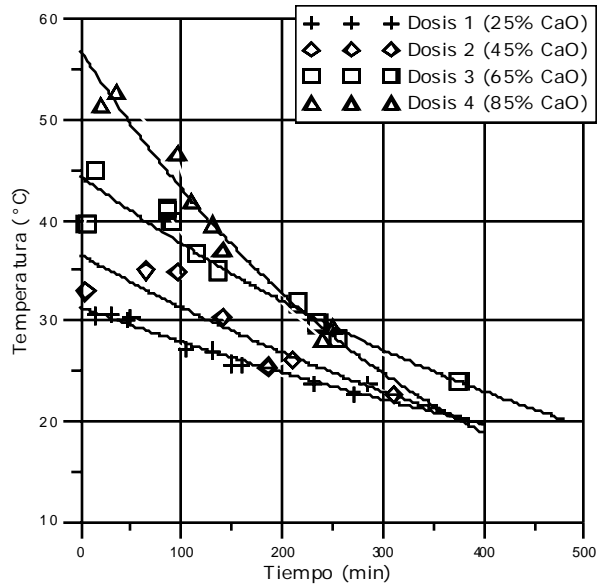
En el ensayo a escala piloto (25% CaO) se esperaba encontrar un comportamiento similar al observado a escala banco respecto al mantenimiento del pH (véase Figura 13); sin embargo, este parámetro se conservó sobre 12 por más de 30 días (véase Figura 14). Esta diferencia pudo deberse a la mayor tasa de hidratación que sufrieron las pilas a escala banco, ya que debido a su menor tamaño, la humedad ambiente tuvo mayor influencia en la rapidez con la que se generó el hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) (encargado de subir el pH), lo cual disminuyó la duración de la actividad de encalado (Mignotte-Cardiergues et al, op cit). De igual forma, el grado de hidratación inicial de la cal (Jiménez et al, 2000) y el tamaño de las partículas utilizadas en el tratamiento a escala banco (menor de 2mm) son factores que pudieron afectar el tratamiento, ya que la cal viva tiende a hidratarse rápidamente, y esta tasa de hidratación se acelera a menor tamaño de partícula (Christy, R., 1990).



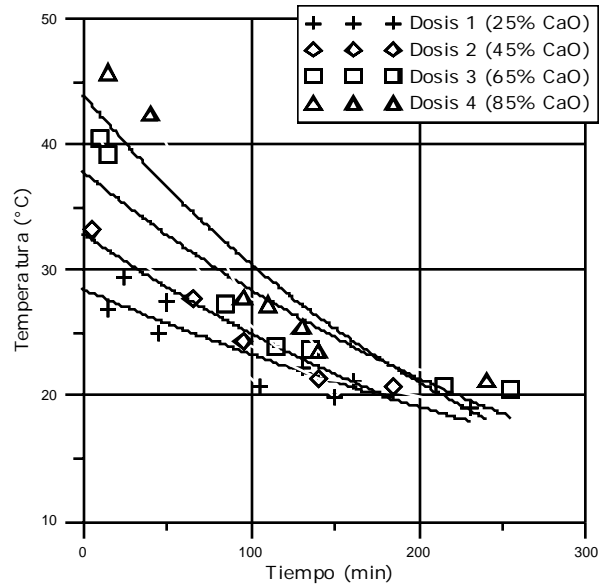
Pilas cubiertas con relación A/V 0.3



Pilas descubiertas con relación A/V 0.3



Pilas cubiertas con relación A/V 0.5



Pilas descubiertas con relación A/V 0.5

Figura 11. Efecto de la dosis en la temperatura.



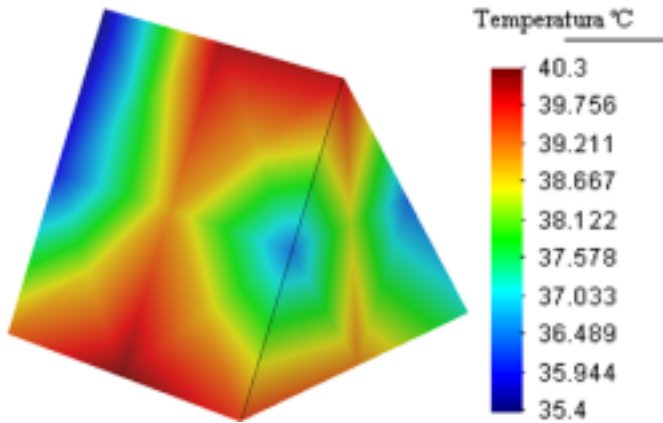


Figura 12. Distribución de la temperatura a escala piloto.

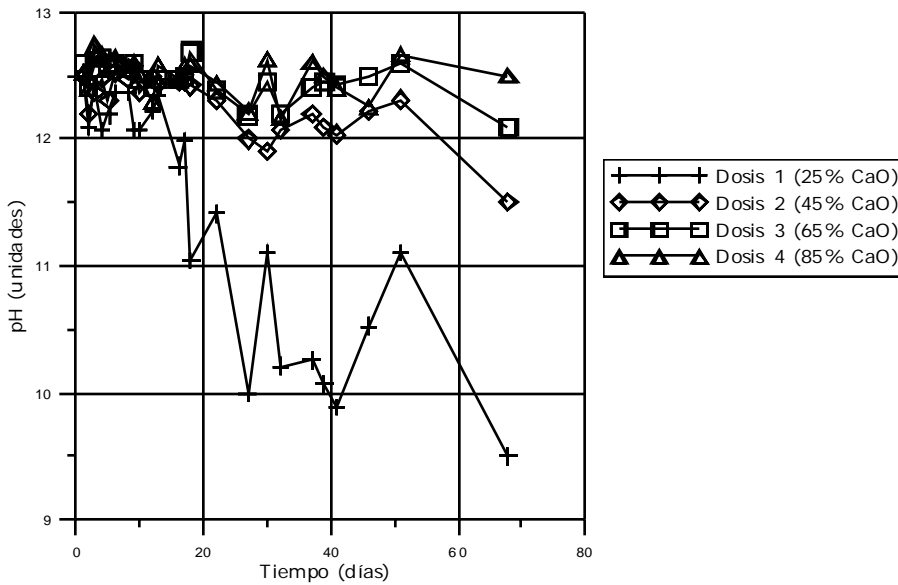


Figura 13. Comportamiento del pH a escala banco.

El volumen de la pila y su interacción con el ambiente también influyeron en la humedad final del material. A escala banco, después de 30 días de tratamiento, la humedad de todas las dosis evaluadas no superó el 15%, mientras que a escala piloto, la humedad de la dosevaluada fue de 54%; sin embargo, la tendencia de pérdida de humedad se sigue conservando, aunque con una pendiente menos pronunciada (véase Figura 15). Este comportamiento también fue reportado por Mignotte-Cardiergues et al (2001) en su tratamiento alcalino; sin embargo, el aumento de la sequedad reportado fue mucho menor que el logrado en el presente estudio a escala piloto. Estas diferencias pudieron deberse a las condiciones de almacenamiento (humedad relativa) y al tipo de lodo. La pérdida de humedad afecta la viabilidad de los microorganismos patógenos, ya que estos necesitan un ambiente adecuado para prolongar su supervivencia; varios estudios han demostrado

que la desecación es un factor letal para los patógenos (Hannan, 1981, citado por Guzman y Campos, 2004).

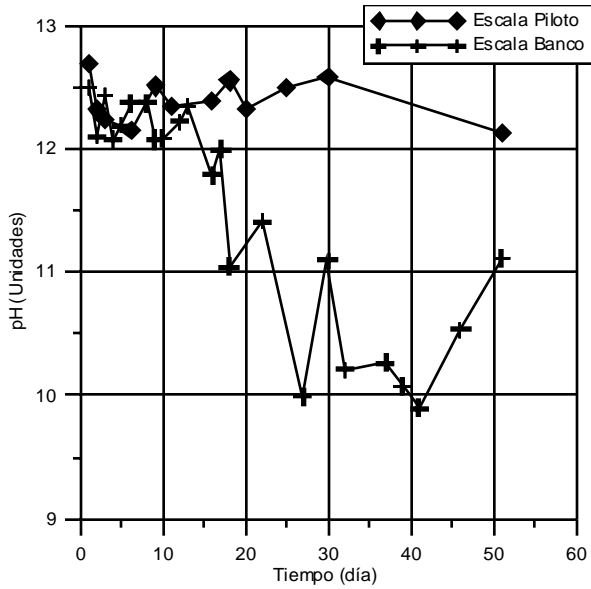


Figura 14. Comportamiento del pH a escala banco y piloto (25% CaO).

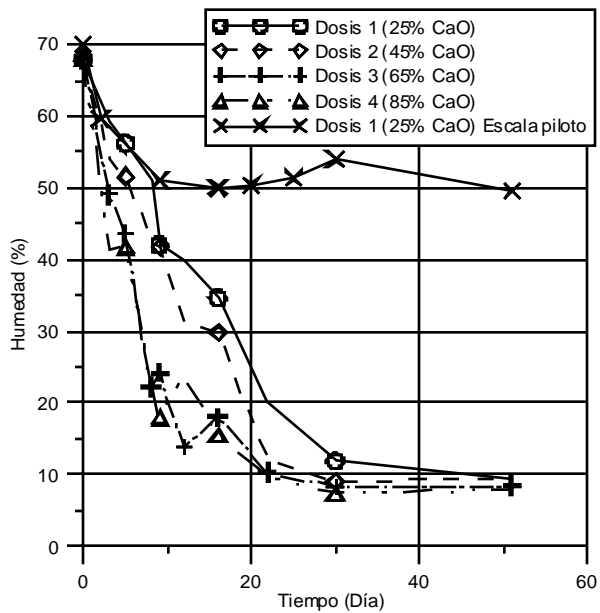


Figura 15. Reducción de la humedad a escala banco y piloto.

5.3.1 Coliformes fecales: La concentración de CF fue disminuida en 24 h hasta niveles no detectables, y no se observó recrecimiento de estos microorganismos durante 43 días de monitoreo (véase Figura 16). Estos resultados están de acuerdo con los reportados por Keller et al (2004), ya que con un pH > 12 y con las temperaturas iniciales alcanzadas se logró la eliminación de los CF, y sólo se observó recrecimiento de estos microorganismos con una dosis de 10% CaO. El estudio de Mignotte-Cardiergues et al (2001) demostró que el tratamiento alcalino también afecta significativamente la viabilidad de la Salmonella, cuando se alcanzan valores de pH > 10.7 durante 24h. Ellos no observaron recrecimiento de esta bacteria patógena después de 60 días de tratamiento. En este estudio también se concluyó que aunque el indicador bacteriano Enterococci es más resistente que la Salmonella, también fue destruido por el tratamiento alcalino. Jiménez et al (2000) y Ganzter et al (2001) encontraron resultados similares.

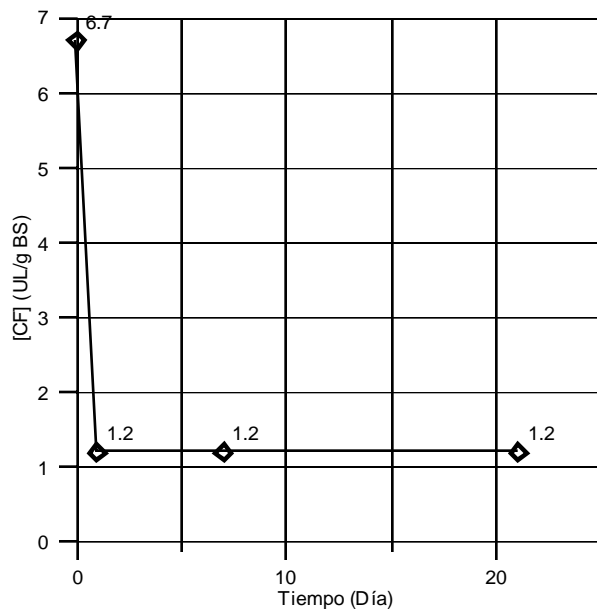


Figura 16. Variación de la concentración de coliformes fecales – Escala piloto.

A pesar de que se ha comprobado que el tratamiento alcalino es más eficiente cuando se aplica a lodos con mayor contenido de materia seca, en el trabajo realizado por Méndez et al (2002), se encontró que el tratamiento de un lodo líquido con un 20% CaO logró disminuir, hasta valores inferiores a los requeridos por la EPA, la concentración de CF. Lo cual indica la alta eficiencia de este tratamiento químico en la destrucción de este indicador bacteriano.

Con base en los resultados obtenidos, es posible afirmar que para el parámetro CF se genera un lodo saneado en menos de 24h de tratamiento cuando el pH se mantiene sobre 12,5. Y si las condiciones de almacenamiento del material son adecuadas, a pesar de que el pH disminuya, este indicador bacteriano no presenta recrecimiento en 43 días.

Debido a que este microorganismo fue destruido en el primer día de tratamiento, en todas las dosis evaluadas a escala banco, no fue posible relacionar la dosis con la reducción de este microorganismo; sin embargo, estos resultados dejan claro el alto poder bactericida de los materiales alcalinos (Ramírez et al, 2002). Las reducciones obtenidas en la concentración de CF están de acuerdo con las obtenidas por Meckes & Rodhes (2004), quienes encontraron que estos

indicadores se redujeron 3 órdenes de magnitud por debajo de los límites exigidos después del tratamiento alcalino aplicado.

Con el fin de hacer más efectivo el tratamiento alcalino en términos de costos, es importante estudiar menores dosis de CaO, las cuales garantizan la reducción total de los CF y eliminan cualquier riesgo de recrecimiento, además de disminuir la concentración de los demás indicadores de contaminación fecal. Varios estudios han encontrado que con dosis menores de 25% CaO la concentración de CF disminuye hasta niveles menores que los requeridos por estándares internacionales (Jiménez et al, op cit; Mendez et al op cit).

Es importante, en estudios posteriores, evaluar el efecto del tratamiento alcalino en otras bacterias patógenas, como las bacterias formadoras de endoesporas, las cuales han demostrado ser muchos más resistentes al tratamiento alcalino que los CF, E. Coli y Salmonella, ya que son capaces de sobrevivir en condiciones ambientales severas (Meckes & Rodhes, 2004). Sin embargo, con base en el estudio realizado por Meckes & Rodhes (2004), es posible concluir que al emplear cal viva en el tratamiento alcalino, se reducen en mayor porcentaje estos microorganismos, ya que el efecto combinado de la temperatura y el pH reduce estas bacterias aunque en menor porcentaje que el logrado en los indicadores bacterianos más utilizados.

5.3.2 Fagos somáticos: Los FS, contrario a los CF, requirieron de un mayor número de días para disminuir su concentración hasta niveles no detectables, lo que indica que este indicador es más resistente al tratamiento alcalino. Las condiciones de tratamiento evaluadas permitieron lograr la disminución de FS hasta niveles no detectables en 21 días de tratamiento a un pH > 12 (véase Figura 17).

En la prueba a escala banco se alcanzaron valores no detectables de FS en 7 días en todas las pilas, mientras que a escala piloto se logró la misma reducción sólo después de 21 días. La humedad es un factor que pudo influir en esta diferencia, ya que a escala banco su decaimiento fue mucho más rápido que a escala piloto, y este es un factor importante en la supervivencia de los microorganismos.

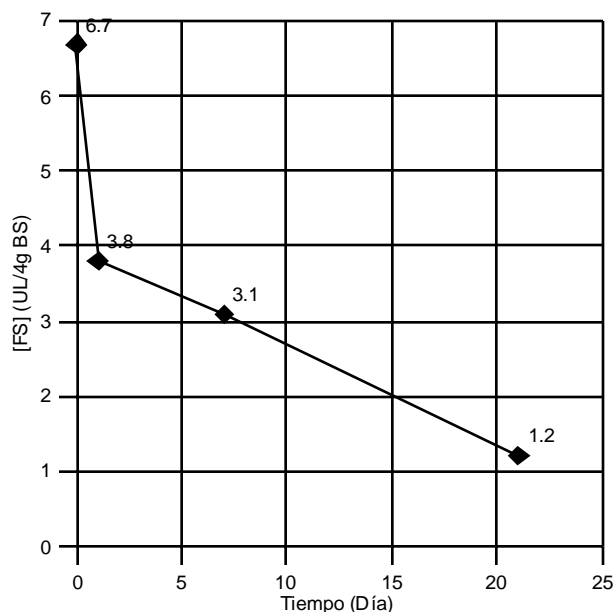


Figura 17. Variación de la concentración de Fagos somáticos - Escala piloto.

5.3.3 Huevos de helminto: El tratamiento evaluado permitió obtener un lodo saneado (<1 huevo viable / 4g BS) en 21 días, manteniendo un pH > 12 con una dosis de 25% CaO (véase Figura 18). Los resultados encontrados están de acuerdo con los reportados por Jiménez et al (2000), quienes indican que los HH son reducidos por el tratamiento alcalino que utiliza CaO; de igual forma, Keller et al (2004) observaron la destrucción de los HH viables con dosis de cal similares a las evaluadas en el presente estudio. No se observaron diferencias significativas en el decaimiento de los HH viables entre los tratamientos a escala banco y piloto.

Aunque Mignotte-Cardiergues et al (2004), demostraron que los huevos de helminto son los microorganismos más resistentes al tratamiento alcalino, no es posible concluirlo mismo a partir de este estudio, ya que debido al distanciamiento entre los días de monitoreo, no se conoce el tiempo de destrucción de estos microorganismos respecto al requerido por los FS, y los dos indicadores a los 21 días de tratamiento disminuyeron su concentración significativamente. Sin embargo, sí se encontró que su rapidez de inactivación fue directamente proporcional a la cantidad de cal adicionada (véase Figura 19), sin embargo este comportamiento pudo haber sido influido por otros factores adicionales al pH, ya que en todas las dosis evaluadas a escala banco se alcanzaron valores de pH mayores que 12; dentro de estos factores pueden contemplarse la disminución de la humedad, la temperatura inicial alcanzada, y el amonio liberado. Este último ha sido objeto de estudio en diversos trabajos, y se ha encontrado que las dosis de cal pueden ser optimizadas al utilizar el amonio que se libera en el tratamiento, ya que este compuesto es particularmente tóxico para los microorganismos patógenos presentes en el lodo (Mendez et al op cit, Bowman, D. et al, op cit).

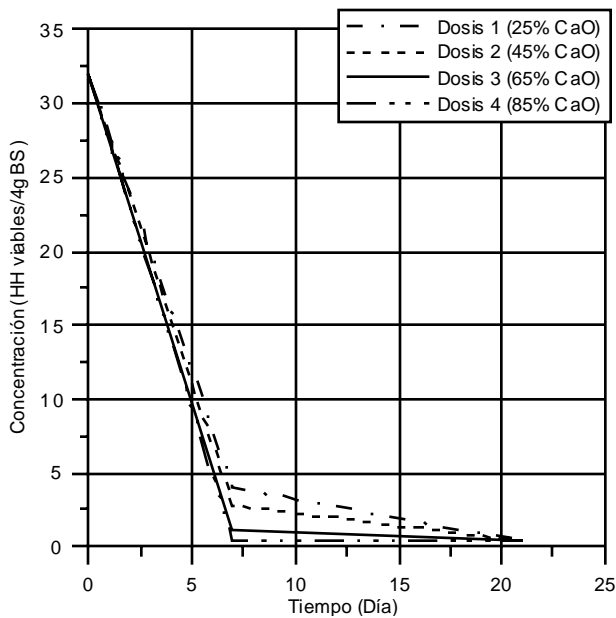


Figura 18. Variación de la concentración de huevos de helminto para varias dosis de CaO.

En el estudio realizado por Farzadkia y Mahvi (2004), no se disminuyó completamente la concentración de HH viables, a pesar de las dosis de cal utilizadas (40 y 60%), y del pH alcanzado (> 12 por 30 días). Estos resultados pudieron deberse a las altas concentraciones iniciales de huevos de helminto viables y a las condiciones de encalado (Ganzter et al op cit). De igual forma, es probable que estas altas concentraciones de huevos de helminto generen un efecto protector tipo pantalla, que no permita que las condiciones adversas afecten a todos los huevos presentes

Se comprobó que el efecto del almacenamiento en la destrucción de los HH viables es fundamental en el tratamiento alcalino (Figura 19). Estos resultados son confirmados con los encontrados por Gantzer et al (2001), quienes no reportaron resultados satisfactorios respecto a la disminución de HH viables al utilizar una dosis de 25% CaO después de un solo día de tratamiento. Sin embargo, no es posible coincidir con los resultados reportados por Mignotte-Cardiargues et al (2001), ya que en su estudio, el almacenamiento no influyó en la destrucción de los HH, y en sólo 24 horas con un pH de 12.5 se logró la desinfección del lodo deshidratado.

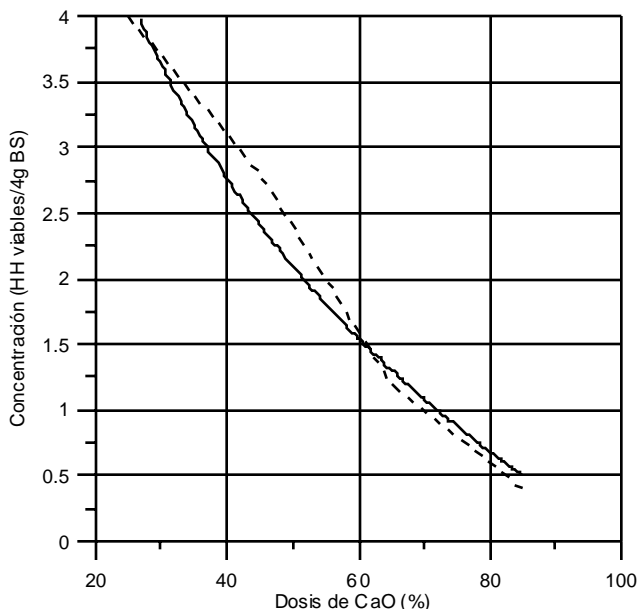


Figura 19. Decaimiento de los HH en función de la dosis para el día 7 de tratamiento.

Los resultados encontrados garantizan que para el lodo evaluado no es necesario mantener valores de pH sobre 12 por más de 10 semanas, como lo reporta Ericksen et al (1995), ya que en 21 días de tratamiento con una dosis de 25% CaO se destruyeron todos los huevos de helminto viables.

El efecto del almacenamiento optimizó el tratamiento, ya que todas las dosis evaluadas a escala banco permitieron alcanzar un biosólido tipo A, y aunque se requiere mayor tiempo de almacenamiento a menores dosis, los costos del tratamiento disminuyen. De igual forma, el tiempo de almacenamiento a pH > 12, influye en la habilidad de los huevos para embriónary desarrollarse a pH neutro (Ericksen et al op cit).

A pesar de los buenos resultados obtenidos respecto a la eficiencia del tratamiento alcalino en la desinfección del biosólido, estos datos no deben extrapolarse a otros lodos, ya que los efectos de la adición de cal dependen de varios factores como condiciones de almacenamiento, y tipo de lodo y de cal. Esta situación es reportada por Mignotte-Cardiargues et al (2001), quienes afirman que el incremento del pH no es estrictamente proporcional a la cantidad de cal adicionada, y depende principalmente de la naturaleza del lodo.

El costo de utilizar un tratamiento alcalino a escala real, según la Asociación Nacional de la Cal, citada por Farzadkia, M. y Mahvi, A. (2004), es mucho menor que el de utilizar otras tecnologías como el secado térmico y el compostaje; sin embargo, es importante tener en cuenta que al implementar este tratamiento a gran escala sin industrializarlo, entran a jugar un gran número de variables que podrían interferir en la eficiencia del tratamiento (intensidad y duración de la mezcla y condiciones de almacenamiento).

Los resultados en este estudio coinciden con los de Gantzer et al (2001) ya que se encontró que la temperatura y el pH tienen un efecto significativo en la desinfección del lodo.

5.3.4 Variación del nitrógeno y materia orgánica: Debido a que en el tratamiento alcalino se incrementa el pH a valores superiores de 9, y en estas condiciones, el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) se volatiliza en forma de amonio ( $\text{NH}_3$ ), se evaluó la variación de este parámetro en los primeros días de tratamiento, debido a que la pérdida de este compuesto afecta el valor nutricional que tiene el lodo deshidratado. En la Figura 12 se presenta esta variación.

Después del día 21 de tratamiento (tiempo en el que se alcanzó la desinfección del lodo), se midió el nitrógeno amoniacal, y su concentración disminuyó desde 0.4% BS hasta 0,01% BS. La concentración de nitrógeno orgánico también se vio afectada (disminuyó desde 2.3% BS hasta 1,2% BS) (véase Figura 20). Estos valores indicaron que el potencial fertilizante del lodo disminuye a medida que el tiempo de almacenamiento se incrementa, sin embargo este tiempo es fundamental para la desinfección del material.

El contenido inicial de materia orgánica del material (30.8% BS) disminuyó hasta 23.7% BS, este valor se considera alto para un clima frío (ICA, 1992), lo que indica que este material es fuente de nutrientes; sin embargo, los altos valores de pH impiden su utilización en todo tipo de suelos ya que valores muy alcalinos inhiben el crecimiento de la mayoría de cultivos (ICA, 1992). Para aplicar el material tratado en terrenos agrícolas, es necesario que el pH disminuya, lo cual se logra con el aumento del tiempo de almacenamiento.

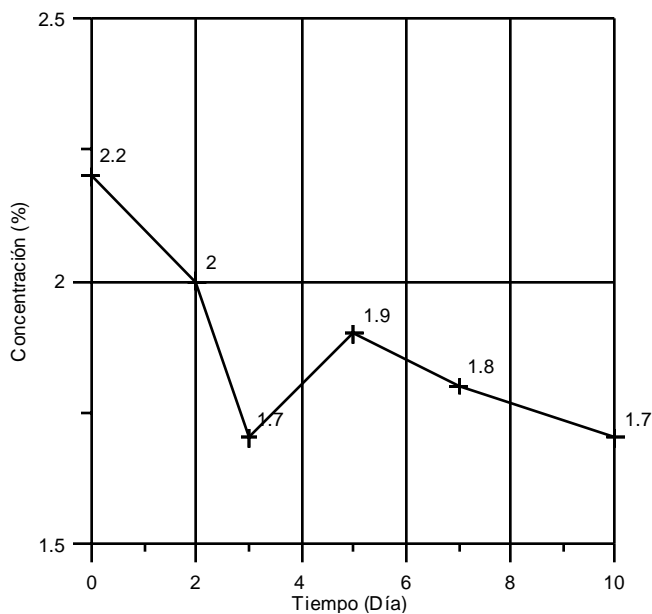


Figura 20. Variación de la concentración de NTK a escala piloto.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados indican que los tratamientos térmico y alcalino desinfectan el lodo respecto a los indicadores de contaminación fecal evaluados, y generan un material apto para utilizarlo agrícolamente sin ningún tipo de restricción. Sin embargo es importante evaluar la inactivación de otros microorganismos patógenos, como las bacterias formadoras de endoesporas (*Clostridium perfringens*), las cuales pueden presentar mayor resistencia a los tratamientos evaluados.

La temperatura es un factor determinante en la desinfección de los lodos, y aunque los resultados indican que el régimen tiempo-temperatura de 10min-80°C es adecuado para desinfectar el material, es necesario evaluar a mayor escala este tratamiento y comparar sus resultados, de tal forma que se garantice el saneamiento del lodo para su utilización agrícola.

La EPA reglamenta que un tratamiento alcalino produce un biosólido clase A cuando mantiene el pH sobre 12 por 3 días, junto con una temperatura mayor de 52°C por 12h. Y seguido a este proceso se requiere un secado con aire que permita obtener un material con un contenido de sólidos de al menos el 50% (USEPA, 2000). Mediante este estudio se comprobó que el tratamiento alcalino, a pesar de no cumplir el requisito de temperatura exigido por la EPA, permitió obtener un material completamente saneado (biosólido clase A) que puede ser utilizado sin ningún tipo de restricción.

La eficiencia del tratamiento alcalino que utiliza CaO puede ser optimizada por la cobertura de las pilas y la elección de una la relación A/V adecuada, ya que estos factores permiten conservar por más tiempo las temperaturas alcanzadas en el tratamiento. En el estudio se comprobó que el almacenamiento de las pilas tratadas es un factor que permite reducir la dosis de CaO utilizada para la desinfección.

Teniendo en cuenta las restricciones respecto a valores altos de pH en un suelo, es necesario evaluar las consecuencias de aplicar un material tratado por métodos alcalinos a un terreno agrícola, ya que a pesar de que este material haya sido esterilizado, sus condiciones químicas podrían perjudicar los cultivos. Es importante que el material disminuya su pH hasta valores menores de 9 antes de utilizarlo agrícolamente, sin embargo en suelos ácidos podría mejorar las características del terreno, como varios estudios lo reportan.

El tratamiento alcalino, a pesar de sus excelentes resultados en términos de desinfección microbiológica, puede generar problemas de olores al aplicarlo a gran escala, y si su procedimiento no se industrializa, pueden influir en su desempeño ciertas variables, como las condiciones del lugar de almacenamiento y las condiciones de la mezcla.

Aunque en ninguno de los dos tratamientos evaluados se presentó recrecimiento de indicadores bacterianos, es necesario realizar pruebas que simulen condiciones ambientales favorables para la reproducción de las bacterias, de esta forma se conocerá la eficiencia del tratamiento cuando se realice a mayores escalas y sea afectado por diversas situaciones.



## BIBLIOGRAFÍA

Andreakis, D., Mamais, E., Gavalaki, E. & Kampylafka, S. Sludge utilisation in agriculture: possibilities and prospects in Greece. *Sludge Management: regulation, treatment, utilisation and disposal. Acapulco, 25-27 October 2001.*

Arboleda, J. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá: Mc Graw Hill.

Banas, S., Stott, R., Battle, C., Forman, A., & Schwartzbrod, J. 2002. Sludge hygienization: helminth eggs destruction by lime treatment *Ascaris* eggs as model. *7th European biosolids and organic residuals conference.*

Bowman, D., Reimers, R., Dale, M., Jenkins, M., Bankston, W. & Atique, M. 2000. Assessment and comparison of *Ascaris* eggs and cryptosporidium oocyst inactivation with respect to biosolids processing. *Water Environment Federation.*

Campos, C. y Beltrán, M. 2005. Informe del análisis microbiológico y parasitológico de lodos espesados, lodos digeridos y biosólidos en la planta El Salitre durante Julio y Agosto de 2005. Departamento de microbiología Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana.

Cappizi-Banas, S., Deloge, M. & Schwartzbrod, J. 2004. Liming as an advanced treatment for sludge sanitisation: helminth eggs elimination- *Ascaris* eggs as model. *Water Research* 38: 3251-3258.

Christy, R. 1990. Treatment processes, sludge disposal using lime. *Water Environment & technology.* In <http://www.rdpotech.com/tchdwet.htm>

Del Campo, M., Vaca, R., Lugo, J., Esteller, M., Gómez, G. & Garrido, S. Application of municipal sewage sludge in broad beam cultivation (*vicia faba*) in agricultural lands in the valley of Toluca, Mexico. *Sludge Management: regulation, treatment, utilisation and disposal. Acapulco, 25-27 October 2001.*

Eriksen, L., Andreassen, P. & Ilsoe, B. 1995. Inactivation of *Ascaris suum* eggs during storage in lime treated sewage sludge. *Water Research* 30: 1026-1029.

Farzadkia, M. & Mahvi, A. 2004. Comparison of extended aeration activated sludge process and activated sludge with lime addition meted for biosolids stabilization. *Pakistan Journal of Biological Science* 7:2061-2065.

Foliguet, J. & Doncoeur, F. 1972. Inactivation assays of enteroviruses and salmonella in fresh and digested wastewater sludge by pasteurization. *Water Research* 6: 1399-1407.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1999. Current trends in the production, trade and consumption of chemical fertilizers. Statistical analysis service, statistics division.

Gaspard, P., Wiart, J. & Schwartzbrod, J. 1997. Parasitological contamination of urban sludge used for agricultural purposes. *Waste Management & Research* 15: 429-436.

Gaspard, P. & Schwartzbrod, J. Helminths and protozoa in stabilized sludge for agricultural use: search for and indicator of parasite contamination. *Sludge Management: regulation, treatment, utilisation and disposal. Acapulco, 25-27 October 2001.*

Gantzer, C., Gaspard, P., Galvez, L., Huyard, A., Dumouthier, N., & Schwartzbrod, J. 2001. Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge. *Water Research* 35: 3763-3770.

Gattie, D. & Lewis, L. 2004. A high –level disinfection standard for land-applied sewage sludge (Biosolids). *Environmental Health Perspectives* 112: 126-131.

Gepsen, S., Kraus, M. & Grüttner, H. 1997. Reduction of fecal estreptococcus and salmonella by selected treatment methods for sludge and organic waste. *Water Science and Technology* 36: 203-210.

Gerba, C., Pepper, I. & Whitehead, L. A risk assessment of emerging pathogens of concern in the land of biosolids. *Sludge Management: regulation, treatment, utilisation and disposal. Acapulco, 25-27 October 2001.*

Giraldo, E y Delgado, E. 2001. Evaluación del potencial agronómico de los biosólidos de la planta El Salitre – primera etapa – DAMA – ASOCOLFLORES – UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes.

Guzmán, C. y Campos, C. 2004. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en la agricultura. *Universitas Scientiarum* 9: 59-67.

Ingallinella, A., Sanguinetti, G., Koottatep, T., Montangero, A. & Strauss, M. The challenge of faecal sludge management in urban areas- strategies, regulations and treatment options *Sludge Management: regulation, treatment, utilisation and disposal. Acapulco, 25-27 October 2001.*

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) (Produmedios ediciones) 1992. *Fertilización en diversos cultivos- Quinta aproximación.* Bogotá: ICA.

Jimenez, B., Barrios, J. & Maya, C. 2000. Class B biosolids production from wastewater sludge with high pathogenic content generated in an advanced primary treatment. *Water Science and Technology* 42: 103-110.

Jimenez, B., Maya, C., Sanchez, E., Romero, A. & Lira, L. Comparison of the quantity and quality of the microbiological content of sludge in countries with low and high content of pathogens *Sludge Management: regulation, treatment, utilisation and disposal. Acapulco, 25-27 October 2001.*

Jurado, P., Luna, M. y Barretero, R. 2004. Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Tec. Pec. Mex* 42: 379-395.

Keller, R., Passamani-Franca, R.F., Cassini, S.T. & Goncalves, F.R. 2004. Disinfection of sludge using lime stabilisation and pasteurisation in a small wastewater treatment plant. *Water Science and Technology* 50: 13-17.

Meckes, M. & Rhodes, E. 2004. Evaluation of bacteriological indicators of disinfection for alkaline treated biosolids. *Journal of Environmental Engineering and Science* 3: 231-236.

Mendez, J.M., Jimenez, B.E. & Barrios, J.A. 2002. Improved alkaline stabilization of municipal wastewater sludge. *Water Science and Technology* 46: 139-146.

Mignotte-Cardiergues, B., Maul, A., Huyard, A., Capizzi, S. & Schwartzbrod, L. 2001. The effect of liming on the microbiological quality of urban sludge. *Water Science and Technology* 43: 195-200.

Mocé-Llivina, L., Muniesa, M., Pimienta-Vale, H., Lucena, F. & Jofre, J. Survival of bacterial indicator species and bacteriophages after thermal treatment of sludge and sewage. *Applied and Environmental microbiology* 69: 1452-1456.

Olaya, N. & Ramirez, A. Environmental impact assessment (EIA) guidelines for sludge management & disposal in Latin American wastewater treatment projects. *Sludge Management regulation, treatment, utilisation and disposal. Acapulco, 25-27 October 2001.*

Ponugoti, P.R., Dehab, M.F. & Surampalli, R. 1997. Effects of different biosolid treatment systems on pathogen and pathogen indicator reduction. *Water Environment Research* 69: 1195-1206.

Ramirez, E., Lopez, S., Mijaylova, P., Cardoso, L. & Moeller, G. Transformaciones en la digestión alcalina de lodos residuales municipales. *XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental. 2002.*

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SERMANAT-2002, Protección ambiental-Lodos y biosólidos-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Schwartzbrod, J., Mathieu, C., Thévenot, T., Baradel, J. M. & Schwartzbrod, L. 1987. Wastewater sludge: parasitological and virological contamination. *Water Science and Technology* 19: 33-40.  
Sort, X. & Alcañiz, J. 1999. Modification of soil porosity after application of sewage sludge. *Soil and Tillage Research* 49: 337-345.

Suh, Y. & Rosseaux, P. 2001. An LCA of alternatives wastewater sludge treatment scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*. Article in press.

Swanson, R., Bortman, M., O'Connor, T. & Stanford, H. 2004. Science, policy and the management of sewage materials. The New York City experience. *Marine Pollution Bulletin* 49: 679-687.

Unidad de Planeación Minero-Energética, Subdirección de planeación minera. 2003. Mercado de los insumos minerales para la producción de fertilizantes.

U.S. Environmental Protection Agency. A guide to biosolids risk assessments for the EPA part 503 rule. 1995.

U.S. Environmental Protection Agency. Biosolids technology fact sheet- Alkaline stabilization of biosolids. 2000.

U.S. Environmental Protection Agency. Control of pathogens and vector attraction reduction in sewage sludge. 2003.

Ward, A., Stensel, D., Ferguson, J., Ma, G. & Hummel, S. 1999. Preventing growth of pathogens in pasteurized digester solids. *Water Environment Research* 71: 176-182.

Whitmore, T. & Robertson, L. 1995. The effect of sewage sludge treatment processes on oocyst of *Cryptosporidium parvum*. *Journal of applied bacteriology* 78: 34-38.