

20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

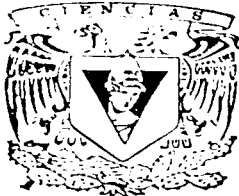
FACULTAD DE CIENCIAS

EVALUACION DE LA CALIDAD DE LODOS RESIDUALES DE MEXICO

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
B I O L O G A
P R E S E N T A :
ANA MARIA CASTREJON CORONADO

DIRECTOR DE TESIS: M. en I. JOSE ANTONIO BARRIOS PEREZ



FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

2002

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES



FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA

Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunico a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Evaluación de la calidad de todos residuales de México"
realizado por Ana María Castrejón Coronado

con número de cuenta 9419043-2 , quién cubrió los créditos de la carrera de: Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario M. en I. José Antonio Barrios Pérez.

Propietario Dra. María del Pilar Ortega Larrocea.

Propietario Biol. Noé Flores Hernández.

Suplente Dra. Lucía Almeida Leñero.

Suplente Biol. Claudia Vallejo Albarrán.

Ana María Castrejón Coronado

Noé Flores H.

Claudia Vallejo Albarrán

FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

Consejo Departamental de Biología

M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez.



DEPARTAMENTO
DE BIOLOGIA

AGRADECIMIENTOS

◆ A la Dra. Blanca Jiménez Cisneros, por la oportunidad de realizar la tesis en el Grupo de Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

◆ Al M. en I. José Antonio Barrios Pérez por su apoyo y consejos para el término de este trabajo.

◆ Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo a través del proyecto 27770-T.

DEDICATORIA

*A mi familia por impulsarme en todo lo que
emprendo y sobre todo por el cariño que me han
brindado siempre.*

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ANTECEDENTES.....	2
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	6
1.1. CARACTERIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES	
1.1.1 Definición de lodo.....	6
1.1.2. Caracterización de lodos.....	6
1.1.2.1. Características fisico-químicas.....	6
1.1.2.2 Características biológicas.....	12
1.2. TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES	18
2.1. Tratamientos preliminares.....	19
Cernido.....	19
Espesamiento.....	19
Acondicionamiento.....	20
2.2. Deshidratación.....	21
Filtración por vacío.....	21
Centrifugación.....	22
Filtro prensa.....	22
Lechos de secado.....	22
2.3. Estabilización.....	23
Digestión anaerobia.....	24
Digestión aerobia.....	27
Estabilización alcalina.....	27
Composteo.....	28
2.4. Supervivencia de patógenos en los tratamientos de lodos.....	30
2.5. Remoción de patógenos en el tratamiento de lodos.....	31
1.3. DISPOSICIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LODOS	33
3.1. Disposición de lodos.....	33
Incineración.....	33
Relleno sanitario.....	34
3.2 Aprovechamiento de lodos.....	36
Aplicación de biosólidos en suelos.....	36
3.3 Manejo de lodos residuales a escala mundial.....	43
1.4. LEGISLACIÓN	44
4.1. Proyecto de Norma (NOM-004 ECOL).....	44
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	47

3. METODOLOGÍA	48
3.1 Obtención de las muestras	48
3.2 Caracterización de lodos residuales	49
3.2.1 Sólidos totales	49
3.2.2 Sólidos volátiles	49
3.2.3 Análisis CRETÍ	50
3.2.4 Metales pesados	50
3.2.5 Coliformes fecales	50
3.2.6 <i>Salmonella</i> spp	50
3.2.7 Huevos de helmintos	51
3.3 Evaluación de la calidad de lodos residuales	51
3.4 Evaluación del manejo de lodos residuales	52
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1 Selección de las plantas de tratamiento	53
4.1.1 Ubicación geográfica	53
4.1.2 Niveles de contaminación en las regiones analizadas	54
4.1.3 Gastos de operación	55
4.1.4 Producción de lodos residuales	56
4.1.5 Procesos de tratamiento de aguas residuales	57
4.1.6 Procesos de tratamiento de lodos residuales	59
4.1.7 Presencia de altos índices de enfermedades intestinales	60
4.2 Caracterización de lodos residuales	61
4.2.1 Caracterización fisicoquímica	61
4.2.1.1 Sólidos totales	61
4.2.1.2 Sólidos volátiles	64
4.2.1.3 Análisis CRETÍ	65
4.2.1.4 Metales pesados	66
4.2.2 Caracterización microbiológica	68
4.3 Calidad de las muestras analizadas	73
4.4 Manejo de lodos en las plantas de tratamiento analizadas	75
4.4.1 Tratamiento de lodos residuales	75
4.4.2 Disposición y aprovechamiento de lodos analizadas	77
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
LITERATURA CITADA	83
ANEXOS	87
Anexo 1. Determinación de sólidos totales y volátiles	87
Anexo 2. Análisis CRETÍ	88
Anexo 3. Determinación de coliformes fecales	91
Anexo 4. Determinación de <i>Salmonella</i> spp	93
Anexo 5. Determinación y cuantificación de huevos de helmintos	96

ÍNDICE DE TABLAS

- ◆ Tabla 1. Tratamientos de agua residual y tipos de lodo que producen
 - ◆ Tabla 2. Constituyentes de lodos primarios y secundarios municipales
 - ◆ Tabla 3. Principales patógenos de interés presentes en agua y en lodos residuales
 - ◆ Tabla 4. Número de microorganismos en lodos residuales primarios y secundarios
 - ◆ Tabla 5. Número de microorganismos en lodos fisicoquímicos y primarios
 - ◆ Tabla 6. Número de microorganismos en lodos estabilizados
 - ◆ Tabla 7. Reducción de patógenos y estabilización de lodo con diferentes tratamientos
 - ◆ Tabla 8. Tiempos de supervivencia de huevos de helmintos y quistes de protozoarios en el ambiente
 - ◆ Tabla 9. Temperatura y tiempo de exposición requeridos para la destrucción de algunos patógenos comunes
 - ◆ Tabla 10. Eficiencia de diferentes procesos de tratamiento de lodos en la reducción de microorganismos indicadores y patógenos
 - ◆ Tabla 11. Concentraciones típicas de metales en lodos residuales municipales
 - ◆ Tabla 12. Fuentes que generan metales pesados y algunos de los daños que pueden causar al ecosistema
 - ◆ Tabla 13. Manejo de lodos a escala mundial
 - ◆ Tabla 14. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos mexicanos
 - ◆ Tabla 15. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en biosólidos mexicanos
 - ◆ Tabla 16. Parámetros evaluados en la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las muestras de lodos analizadas
 - ◆ Tabla 17. Gastos de operación (L/s) en los estados donde se realizó el muestreo
 - ◆ Tabla 18. Tratamiento de aguas residuales en las plantas analizadas
 - ◆ Tabla 19. Tratamiento de lodos residuales en las plantas analizadas
 - ◆ Tabla 20. Índice de enfermedades intestinales en los estados en donde ubicadas las plantas de tratamiento analizadas
 - ◆ Tabla 21. Resultados del análisis CRETÍ en las muestras de lodos residuales analizadas
 - ◆ Tabla 22. Concentración de metales pesados (mg/kg) en las muestras de lodos residuales analizadas.
 - ◆ Tabla 23. Calidad de las muestras analizadas.
-

ÍNDICE DE FIGURAS

- ◆ Figura 1 Calidad del agua en estaciones de medición de agua superficial
- ◆ Figura 2 Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales
- ◆ Figura 3 Caudal tratado de aguas residuales municipales
- ◆ Figura 4 Digestor convencional en el proceso de una sola fase
- ◆ Figura 5 Obtención de una muestra de lodo de una planta de tratamiento
- ◆ Figura 6 Centrifugación de muestras durante la técnica de huevos de helmintos
- ◆ Figura 7 Ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales analizadas
- ◆ Figura 8 Zonas críticas de contaminación del agua en México
- ◆ Figura 9 Gastos de operación (L/s) en las plantas de tratamiento
- ◆ Figura 10 Producción de lodos residuales (Ton/día) en las plantas de tratamiento
- ◆ Figura 11 Tipos de tratamiento de aguas residuales en las plantas analizadas
- ◆ Figura 12 Porcentaje de sólidos totales en las muestras de lodos analizadas
- ◆ Figura 13 Porcentaje de sólidos volátiles en las muestras de lodos analizadas
- ◆ Figura 14 Concentración de coliformes fecales en las muestras analizadas
- ◆ Figura 15 Concentración de *Salmonella* spp en las muestras de lodos residuales analizadas
- ◆ Figura 16 Concentración de huevos de helmintos (HH) totales en las muestras de lodos residuales analizadas
- ◆ Figura 17 Tratamiento y generación de lodos residuales en las plantas analizadas de acuerdo con el proceso de estabilización
- ◆ Figura 18 Disposición y aprovechamiento de lodos residuales en las plantas analizadas
- ◆ Figura 19 Porcentaje de disposición y aprovechamiento de los lodos residuales analizados

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- ◆ CNA. Comisión Nacional del Agua
 - ◆ SEMARNAT. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
 - ◆ SEMARNAP. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca
 - ◆ INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
 - ◆ CRETl. Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad e Inflamabilidad
 - ◆ EPA. Agencia de Protección al Ambiente
 - ◆ ST. Sólidos Totales
 - ◆ SSA. Secretaria de Salud
 - ◆ TPA. Tratamiento Primario Avanzado
 - ◆ L/s. Litros por segundo
 - ◆ Ton/día. Toneladas por día
 - ◆ NMP. Número Más Probable.
-

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad de 18 muestras de lodos residuales de diferentes plantas de tratamiento del país, para determinar la factibilidad de aprovecharlos benéficamente de acuerdo con lo establecido en el proyecto de Norma Oficial Mexicana, NOM-004. También se evaluó el manejo de los lodos en las plantas de tratamiento.

Se realizó una caracterización de las muestras de lodos, en donde se determinaron los parámetros: sólidos totales, sólidos volátiles, metales pesados, análisis CRETÍ, coliformes fecales, *Salmonella* spp y huevos de helmintos. En el análisis CRETÍ, únicamente una muestra se consideró residuo peligroso. En cuanto al contenido de metales pesados, todas las muestras cumplieron con los límites establecidos en el proyecto de norma NOM-004. Mientras que 14 muestras excedieron los límites microbiológicos. Se determinó que únicamente 3 de los 18 lodos analizados cumplieron con la calidad determinada en el proyecto de norma y que solamente éstos pueden ser aprovechados benéficamente.

El principal problema para poder reutilizar los lodos en México deriva del alto contenido microbiológico, lo cual requiere incrementar las eficiencias de destrucción de microorganismos, mediante la modificación de las condiciones de operación de los procesos existentes o añadiendo procesos complementarios. En cuanto al manejo de los lodos en las plantas de tratamiento se observó que es necesario el establecimiento de prácticas adecuadas con la calidad de los mismos.

ANTECEDENTES

En nuestro país actualmente el agua es considerada por el gobierno un asunto de seguridad nacional, debido a que existe una amenaza de desabasto en 35 ciudades y un nivel de contaminación entre 73 % (CNA, 2000) y 93 % (SEMARNAT, 2001). La mayoría de cuerpos de agua superficiales del país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento ya sea de tipo doméstico industrial, agrícola o pecuario, lo que ha ocasionado que sólo el 7 % de los cuerpos superficiales se consideren de calidad aceptable (Fig 1) (CNA 2000)

Es evidente que en el país existe una necesidad urgente de incrementar el tratamiento de las aguas residuales, ya que se estima que el 78 % de las aguas residuales municipales y el 85 % de las industriales se vierten a los cuerpos de agua sin recibir tratamiento alguno (SEMARNAT, 2001)

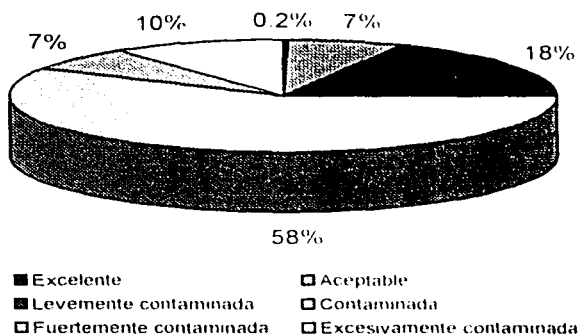


Figura 1. Calidad del agua en estaciones de medición de agua superficial (CNA, 1999)

Debido a esta problemática se están desarrollando acciones que fomentan el tratamiento de las aguas residuales, como es la entrada en vigor de la Norma Oficial Mexicana (NOM-ECOL-001) en enero del 2000 la cual obliga a todas las ciudades mayores de 50,000 habitantes que vierten sus descargas a cuerpos de agua o bienes nacionales a tratar sus aguas residuales para que cumplan con determinados parámetros de calidad La NOM-ECOL-002 obliga a depurar los efluentes antes de descargarlos a sistemas de drenaje urbano o municipal

Se estima que para 1998 el nivel de tratamiento de aguas residuales era del 22 % en el caso de los municipios y del 15 % en el de las industrias, con un total de 1354 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales y 914 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, de las cuales 727 se encontraban en operación, con un caudal tratado de $40.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig 2 y 3) (INEGI, 1999)

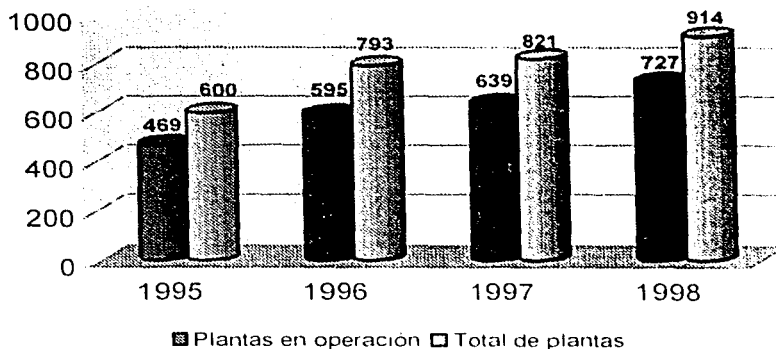


Figura 2. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales 1995-1998 (INEGI, 1999)

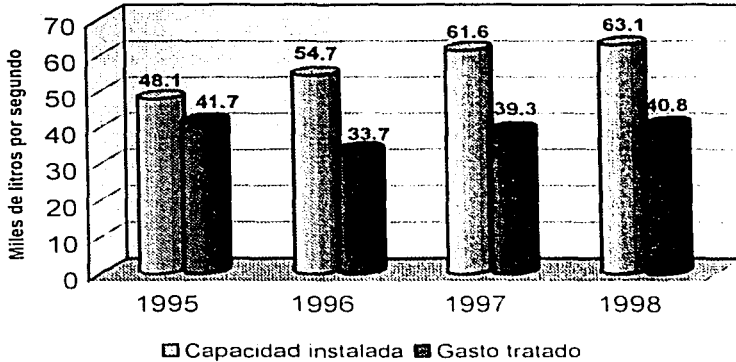


Figura 3. Caudal tratado de aguas residuales municipales 1995-1998 (INEGI, 1999)

Se calcula que en 1996 se generaron 224 mil toneladas de lodos provenientes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (INEGI, 1999), y se espera que esta cifra se incremente como resultado de las medidas antes mencionadas, por lo que ahora el manejo y la disposición de los lodos residuales representa un nuevo desafío. Hasta ahora los lodos residuales en nuestro país han sido dispuestos en lagunas y rellenos sanitarios, se han dispuesto sin tratamiento en presas, terrenos en las mismas fuentes de suministro y también han sido descargados al drenaje. Debido a que actualmente los lodos residuales en nuestro país se consideran residuos peligrosos, existe una preocupación seria por la salud humana y el ambiente relacionada con estos subproductos, y ante la demanda actual de prácticas de uso benéfico de los mismos, se considera prioritario el desarrollo de acciones que permitan un manejo adecuado de ellos. Una acción muy importante en este sentido fue el desarrollo del proyecto de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-ECOL la cual establece los límites permisibles de contaminantes para los

lodos que sean dispuestos o aprovechados, por lo que se espera un incremento de las prácticas enfocadas a su reúso benéfico

Debido a que existen pocos reportes de calidad de los lodos generados en nuestro país, se consideró prioritario un estudio a nivel nacional en cuanto a producción y calidad de los lodos generados. Estudios de esta índole pueden dar como resultado un esquema de la situación general en el país, que permitan sentar las bases del manejo y utilización de los lodos a escala nacional

1. MARCO TEÓRICO

1.1. CARACTERIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES.

1.1.1. Definición de lodo.

Como producto de los procesos de tratamiento de aguas residuales se obtienen residuos sólidos, semisólidos o líquidos, los cuales son llamados lodos. Los lodos pueden contener agua, sólidos, sustancias disueltas y diversos microorganismos. Las características y el volumen de los lodos producidos en los procesos de tratamiento de aguas residuales, varían en función de las características del agua residual y del tipo de tratamiento al que fueron sometidas (físico, físico-químico o biológico). En la Tabla 1 se describen las características de los procesos de tratamiento de aguas residuales y el tipo de lodos que producen.

1.1.2. Caracterización de lodos.

La caracterización de lodos por su fuente (primarios, secundarios y terciarios) está relacionada con el grado de procesamiento y provee únicamente información limitada acerca de sus propiedades. Se pueden determinar otros parámetros físicos, químicos y biológicos importantes para lograr un tratamiento y manejo adecuado de los lodos. Estos parámetros se describen a continuación.

1.1.2.1. Características físico-químicas.

Sólidos

La concentración de sólidos se refiere a la cantidad de materia suspendida o disuelta en el lodo. De acuerdo con sus características los sólidos se pueden dividir en las siguientes categorías:

Tabla 1. Tratamientos de agua residual y tipos de lodo que producen (EPA 1999)

TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	TIPO DE LODO GENERADO
TRATAMIENTO PRELIMINAR	
<p>Remoción del material grueso que puede interferir con el equipo mecánico Separación de sólidos inorgánicos arenosos que pueden asentarse en los canales o tuberías</p>	<p>Generalmente los materiales que se obtienen en este proceso se manejan como desechos sólidos y casi siempre son dispuestos en rellenos sanitarios Este material es excluido de la definición de lodo.</p>
TRATAMIENTO PRIMARIO	
<p>Usualmente implica la sedimentación por gravedad para remover sólidos suspendidos antes del tratamiento secundario y requiere de un periodo de almacenamiento</p>	<p>Los lodos producidos por tratamiento primario usualmente contienen de 3 a 7 % de sólidos. Son grises y viscosos y su contenido de agua puede reducirse fácilmente por espesamiento o deshidratación</p>
TRATAMIENTO SECUNDARIO	
<p>Generalmente recae en un proceso de tratamiento biológico, el cual puede ser de biomasa suspendida o fija (lodos activados, filtros percoladores y biodiscos en los cuales se utilizan microorganismos para reducir la materia orgánica) y se remueven los sólidos suspendidos por sedimentación.</p>	<p>Los lodos producidos por tratamiento secundario usualmente tienen un bajo contenido de sólidos (0.5 a 2 %). Presentan un color de café parduzco a oscuro y son más difíciles de espesar y de deshidratar que los lodos primarios</p>
TRATAMIENTO TERCIARIO	
<p>Se utiliza en plantas de tratamiento de agua residual que requieren una mayor calidad del efluente que la producida en un tratamiento secundario. Los tipos comunes de tratamiento terciario incluyen precipitación biológica, química y procesos que remueven nitrógeno y fósforo</p>	<p>El uso de cal, polímeros, hierro, o sales de aluminio usados en el tratamiento terciario producen lodos con características variables de absorción de agua. Usualmente son de color oscuro, aunque su superficie puede ser de color rojizo en caso de existir sales de hierro. Suelen presentar olor desagradable y su consistencia es viscosa. Altos niveles de precipitación de cal producen lodos alcalinos</p>

Sólidos totales

Son los materiales que permanecen en los lodos como residuo cuando son secados de 103 a 105 °C y se refieren a la suma de sólidos suspendidos y sólidos disueltos en el lodo. Son expresados en miligramos por litro o como porcentaje

El contenido de sólidos totales como medida de la materia seca es importante en el tratamiento y en las prácticas de manejo de lodos (Girovich, 1996)

Sólidos volátiles.

Es la cantidad de sólidos orgánicos totales presentes en los lodos que se volatiliza cuando éstos sufren combustión a 550 °C en presencia de aire en exceso. Los sólidos volátiles nos dan información acerca de la cantidad de materia orgánica en el lodo. Algunos lodos no estabilizados contienen de 75 a 80 % de sólidos volátiles en base seca, pero generalmente no es mayor al 50 % después de un tratamiento biológico.

El contenido orgánico de los lodos determinan su potencial de pestilencia durante el almacenamiento y aplicación al suelo, el valor del lodo como acondicionador del suelo y potencial de generación de gas metano durante el proceso de digestión anaerobia (Meyers, 1998)

Sólidos fijos.

Son aquellos residuos que permanecen en los lodos cuando éstos sufren combustión a 550 °C y con oxigenación excesiva. Los sólidos fijos nos dan información acerca de la cantidad de materia inorgánica en el lodo.

Naturaleza del agua en los lodos.

El agua presente en el lodo generalmente se categoriza de la siguiente manera

- ❖ Agua libre: no se encuentra adherida a las partículas del lodo y puede separarse fácilmente por sedimentación gravitacional.

- ❖ Agua flocular se encuentra atrapada dentro de los flocúlos del lodo y puede removerse solamente por fuerzas mecánicas, más fuertes que las gravitacionales
- ❖ Agua capilar se encuentra adherida a las partículas individuales del lodo y puede separarse también por fuerzas mecánicas, más fuertes que las gravitacionales
- ❖ Agua intracelular y químicamente unida: es parte del material celular y se encuentra química y biológicamente unida a la materia orgánica e inorgánica de los lodos (Girovich, 1996).

La proporción del agua libre y de agua intracelular es determinante en la aptitud del lodo para su deshidratación. Para la liberación del agua ligada, se necesita una energía bastante fuerte, por ello, especialmente el agua celular, sólo puede separarse por medios térmicos potentes (acondicionamiento térmico, secado o incineración) (Degremont, 1979)

Macronutrientes.

Los lodos contienen macronutrientes, los cuales son requeridos en cantidades relativamente grandes por plantas, animales y humanos. Entre estos nutrientes se encuentran el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y magnesio (Meyers, 1998). Los lodos se pueden aprovechar como mejoradores de suelo en parte debido a que presentan características benéficas para los mismos entre las que se encuentran el aporte de macronutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio que influyen en la fertilidad del suelo. Sin embargo, es necesario cuidar que este aporte de macronutrientes no sea excesivo, debido a que altos contenidos de estos pueden lixiviarse (acción de lavado por gravedad) y llegar a fuentes de agua superficial y subterránea donde pueden causar eutrofización (exceso de nutrientes que no son mineralizados en los ciclos biogeoquímicos)

Micronutrimientos.

Los lodos contienen cantidades variables de metales pesados, como cadmio, cobre, plomo, níquel, mercurio y zinc. Algunos de estos elementos son esenciales para las plantas, los animales y en la nutrición humana y son referidos como micronutrimientos debido a que son requeridos en cantidades relativamente pequeñas. Los fertilizantes comerciales contienen residuos de estos elementos como resultado de procesamiento y proveen una fuente complementaria de nutrientes. Si los lodos que son utilizados contienen cantidades de algunos de estos metales suficientes, pero no excesivas, plantas y animales se benefician y estos elementos no tienen que ser adicionados comercialmente en fertilizantes (Meyers, 1998). Sin embargo algunos de estos metales pueden causar daño a humanos, plantas y animales y cuando su concentración es elevada, se pueden acumular en los organismos ya que tienen un alto potencial de acumulación y biomagnificación en la cadena alimenticia. Es por esto que tienen que ser regulados en las prácticas de tratamiento y manejo de lodos. Este aspecto se describe con mayor detalle en la sección de aprovechamiento benéfico de lodos residuales.

En la Tabla 2 se observan algunos constituyentes de lodos primarios y secundarios de origen municipal.

Tabla 2. Constituyentes de lodos primarios y secundarios municipales (Girovich 1996)

Constituyentes	Primario	Secundario
Sólidos totales %	3 0-7 0	0 5-2 0
Sólidos volátiles %	60-80	50-60
Nitrógeno (N, % de ST)	1 5-4 0	2 4-5 0
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de ST)	0 8-2 8	0 5-0 7
Potasio (K ₂ O, % de ST)	0-1 0	0 5-0 7

Materia orgánica

Los lodos contienen materia orgánica en forma de proteínas, carbohidratos, polisacáridos, grasas, resinas, aminoácidos, peptidos, azufre y compuestos fosfóricos. Por lo tanto, el contenido de materia orgánica es otra característica que se considera benéfica cuando se utilizan lodos como mejoradores de suelo debido a que la materia orgánica determina en gran medida la productividad del suelo.

La materia orgánica mejora la estructura del suelo proporcionando mayor difusión de aire, de movimiento de agua, porcentaje de infiltración, drenaje y mayor penetración de raíces. La materia orgánica influye también en el aumento de la fertilidad del suelo debido a que almacena y suministra nutrientes, sirve como protección disminuyendo la erosión y proporciona condiciones adecuadas para la proliferación de microorganismos que participan en la mineralización (Girovich 1996).

Olor

En las estrategias de tratamiento y manejo de lodos es importante también tomar en cuenta que la materia orgánica tiene el potencial de producir olores desagradables. La mayoría de compuestos que causan el olor desagradable de los lodos son subproductos de la descomposición de la materia orgánica (Girovich 1996).

El control del olor desagradable de los lodos, es un problema que causa preocupación en las prácticas de tratamiento, manejo y principalmente de aprovechamiento de lodos, ya que se considera el principal factor que determina la aceptación pública del uso de los lodos, especialmente cuando éstos se aprovechan incorporándolos en los suelos.

Debido a esta problemática, se han desarrollado numerosos métodos para controlar los olores desagradables, entre los que se encuentran la adición de cal, la inyección directa de los lodos en el suelo, el manejo de los lodos lejos de asentamientos.

Los lodos bien estabilizados, así como los lodos secundarios generalmente no producen olores desagradables. Sin embargo, los lodos primarios crudos y los secados por calor son característicamente malolientes (Meyers, 1998).

1.1.2.2. Características biológicas.

Los lodos contienen diversas formas de vida. Entre los microorganismos más frecuentes que se pueden encontrar en los lodos están las bacterias, actinomicetos, virus, helmintos, protozoarios, rotíferos y hongos. Algunos de estos organismos pueden ser patógenos (causantes de infección) como son bacterias, virus, protozoarios y helmintos. Los patógenos en los lodos provienen de individuos enfermos o portadores asintomáticos quienes descargan huevecillos en las heces, por lo que llegan a los sistemas de tratamiento de aguas residuales en donde son removidos y concentrados en los lodos. La Tabla 3 muestra las principales especies de microorganismos patógenos presentes en lodos residuales.

Niveles de microorganismos patógenos en lodos residuales.

Las especies y la cantidad de patógenos presentes en los lodos residuales puede depender de varios factores como el origen y las características del agua residual tratada, la eficiencia de los sistemas de tratamiento, la época del año y el estado de salud de la comunidad.

Los patógenos en el agua residual se encuentran principalmente asociados con los sólidos insolubles. Los tratamientos primarios de aguas residuales concentran

Tabla 3. Principales patógenos de interés presentes en agua y en lodos residuales
(EPA, 1999b)

ORGANISMOS	ENFERMEDAD
BACTERIAS	
<i>Salmonella</i> spp	Salmonelosis, fiebre tifoidea
<i>Shigella</i> spp	Shigelosis, Disenteria
<i>Yersinia</i> spp	Gastroenteritis aguda
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis
VIRUS ENTÉRICOS	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosa
Norwalk y parecidos a Norwalk	Gastroenteritis epidémica con diarrea severa
Parvovirus	Gastroenteritis
Adenovirus	Enfermedades respiratorias, conjuntivitis
Rotavirus	Gastroenteritis aguda
Poliovirus	Poliomielitis
Coxsackie	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre
Ecovirus	Meningitis, parálisis, encefalitis, fiebre, diarrea
Heovirus	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
Astrovirus	Gastroenteritis epidémica
Calivirus	Gastroenteritis epidémica
PROTOZOARIOS	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amibiasis, enteritis aguda
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiosis, diarrea y disentería
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis
HELMINTOS	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis
<i>Ascaris suum</i>	
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricocetosis
<i>Toxocara canis</i>	Toxocaríasis
<i>Toxocara cati</i>	Toxocaríasis, Infecciones viscerales
<i>Necator americanus</i>	Uncinariasis
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Ancilostomiasis
<i>Ancylostoma braziliensis</i>	Infecciones de piel
<i>Ancylostoma caninum</i>	Infecciones de piel
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Strongiloidosis
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis
<i>Taenia solium</i>	Teniasis, Cisticercosis
<i>Hymenolepis nana</i>	Himenolepiasis
<i>Hymenolepis diminuta</i>	Himenolepiasis
<i>Echinococcus granulosus</i>	Hidiatosis
<i>Echinococcus multilocularis</i>	Enfermedad alveolar

estos sólidos en los lodos, por lo que los lodos primarios no tratados tienen altas cantidades de patógenos (Tabla 4) Se considera que el tratamiento primario avanzado es muy eficiente en la remoción de sólidos suspendidos del agua residual, por lo que este proceso alcanza una remoción de 97 % de huevos de helmintos, los cuales se concentran en los lodos

Los procesos de tratamiento secundarios (biológicos) pueden reducir sustancialmente el número de patógenos en el agua residual, creando condiciones adversas para su supervivencia Sin embargo los lodos generados en estos procesos contienen niveles suficientes para representar un riesgo como se puede observar en la Tabla 4 (EPA, 1999)

Tabla 4. Número de microorganismos en lodos residuales primarios y secundarios (Guzman 1996)

Microorganismo	Lodo primario	Lodo secundario	Dosis infectiva mínima
Coliformes totales	1.2×10^7	7.1×10^7	
Coliformes fecales	2.0×10^7	8.3×10^7	
Estreptococos fecales	8.9×10^6	1.7×10^7	
Bacteriófagos	1.3×10^7	..	
<i>Salmonella</i> spp	4.1×10^7	8.8×10^7	$10^4 - 10^7$
<i>Shigella</i> spp	Variable	Variable	$10^4 - 10^7$
<i>Pseudomonas</i> a	2.8×10^7	1.1×10^7	
<i>Ascaris</i> spp	7.2×10^7	1.4×10^7	1 - 10
<i>Trichuris trichiura</i>	1.1×10^7	1.0×10^7	
<i>Trichuris vulpis</i>	1.1×10^7	1.0×10^7	
<i>Toxocara</i> spp	2.4×10^7	2.8×10^7	
<i>Hymenolepis diminuta</i>	6.0×10^7	2.0×10^7	
Virus entéricos	3.9×10^7	3.2×10^7	1 - 10

En estudios relacionados con la cantidad de microorganismos indicadores y patógenos (Coliformes fecales, *Salmonella* spp y *Ascaris* spp) en lodos residuales de México, se ha observado que presentan altos índices de patógenos y principalmente de parásitos como *Ascaris* spp Los lodos provenientes de países como Estados Unidos, a diferencia de los lodos mexicanos, presentan niveles

bajos de microorganismos parásitos. En las Tablas 5 y 6 se pueden comparar el número de microorganismos en lodos mexicanos, con los de otros países

Tabla 5. Número de microorganismos en lodos fisicoquímicos y primarios (Watanabe *et al.*, 1997, Jiménez, 2001, Hall, 2000)

PAÍS	Coliformes Fecales NMP/g	<i>Salmonella</i> NMP/g	Huevos de Helmintos g/ST
Japón	10 ¹⁰	10 ¹⁰	-
Estados Unidos	10 ¹⁰	10 ¹⁰	1
México	10 ¹⁰	10 ¹⁰	50 - 160
África	-	-	735

Tabla 6. Número de microorganismos en lodos estabilizados (Watanabe *et al.*, 1997, Jepsen *et al.*, 1997, Hall 2000, Barrios *et al.*, 2001, Andreoli *et al.*, 1999)

País	Tipo de lodo	Coliformes F. NMP/g	<i>Salmonella</i> NMP/g	H. Helmintos g/ST
Japón	DANM	10 - 10000	0.45 - 7.5	
	DANT	1	0.45	
	C	1 - 10	0.25	
Dinamarca	DANM		5 - 50	
	DAE		100 - 10000	
	DAET		< 0.2	
	EAL		< 0.2	
	C		< 0.2	
Estados Unidos	C		25	
	DAE		0.8 - 33	
África	C	680		15
México	EA	< 100	< 10	< 6
Brasil	DAE			1.27 - 4.42
	DAN			0.87

(DAE) Digestion aerobia
(DAET) Digestion aerobia termofílica
(DANT) Digestion anaerobia termofílica
(EA) Estabilización acida
(EAL) Estabilización alcalina

(DAN) Digestion anaerobia
(DANM) Digestion anaerobia mesofílica
(C) Composteo
(ND) No determinado

Análisis microbiológicos de lodos residuales.

Bacterias coliformes fecales.

Las bacterias coliformes fecales pertenecen a un grupo de bacterias llamadas coliformes totales. estas son gram-negativas, aerobias facultativas anaerobias y no forman esporas. Los géneros *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Citrobacter* son miembros importantes del grupo de coliformes totales.

Las bacterias coliformes fecales son termo-tolerantes, por lo tanto pueden vivir en temperaturas elevadas. Las especies más abundantes en el grupo son *Klebsiella* spp. y *Escherichia coli*.

El análisis numérico para cada especie en los lodos residuales es poco práctico. Es por esto que los análisis microbiológicos de lodos se basan en el monitoreo de microorganismos indicadores. Las bacterias coliformes fecales son utilizadas como indicadores de desechos fecales, los cuales pueden contener patógenos. La determinación de la concentración de organismos indicadores se puede relacionar con el potencial de riesgo a la salud que representan. Las bacterias coliformes fecales son abundantes en heces humanas y por lo tanto están siempre presentes en lodos residuales no tratados.

Las bacterias coliformes fecales tienen las siguientes cualidades como organismos indicadores (Bitton, 1994)

- ❖ son relativamente fáciles de identificar y enumerar.
- ❖ usualmente se encuentran en grandes cantidades cuando hay contaminación fecal.

Huevos de *Ascaris lumbricoides* como indicadores.

La mayoría de autores coinciden en que los huevos de helmintos, particularmente *Ascaris* spp., son los indicadores más apropiados para estudios de inactivación de parásitos en agua y lodo residual, ya que generalmente se encuentran en concentraciones altas. Estos parásitos son capaces de permanecer en estado latente en suelos por periodos prolongados (hasta 7 años) bajo condiciones ambientales adversas (temperatura inferior a 10 °C) conservando su viabilidad durante meses. Además son resistentes a desinfectantes como el cloro y también a valores de pH extremos. (Silva y Martínez, 2000)

Bacteriófagos.

Los bacteriófagos (virus bacteriales) consisten de una cápside que contiene DNA de cadena simple o doble. Estos se adhieren a los receptores de lipopolisacáridos o de proteínas de la pared celular de las bacterias y tienen la capacidad de lisis la célula del hospedero en 20 o 30 minutos en condiciones óptimas.

Los bacteriófagos pueden ser utilizados como indicadores de la presencia de virus, ya que son similares a los virus entéricos pero se pueden detectar más rápida y fácilmente en muestras ambientales y se encuentran en números mayores. En los sistemas de lodos activados, los colifagos que forman placas mayores a 3 mm han sido significativamente correlacionados con enterovirus y con bacterias entéricas.

Los bacteriófagos de la especie *Bacteroides* muestran una correlación positiva con enterovirus y rotavirus, su persistencia es similar al virus de la hepatitis A. Sin embargo, se considera necesario realizar investigaciones que permitan desarrollar ampliamente la correlación entre los bacteriófagos y los virus entéricos (ISO, 1998).

1.2. TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES.

Los lodos concentran parte de los contaminantes separados en los procesos de tratamiento de aguas residuales, estos contaminantes pueden ser metales pesados, microorganismos patógenos y contaminantes orgánicos. Es por esto que los lodos pueden representar un riesgo a la salud y al ambiente y deben someterse a procesos de tratamiento que además de inactivar a los microorganismos patógenos reduzcan el volumen de los mismos para que su manejo sea práctico. Dependiendo de las características de los lodos y de su destino final, será el tipo de tratamiento al que serán sometidos.

Los tratamientos de los lodos, deben ser viables de acuerdo con la disponibilidad de tecnología, deben ser efectivos, fáciles de aplicar que no impliquen en lo posible elevados costos y que además permitan su uso benéfico o bien una disposición adecuada.

Para lograr estos objetivos en los procesos de tratamiento de los lodos, se pueden utilizar métodos físicos, biológicos o químicos.

De manera general los procesos de tratamiento de lodos se pueden dividir en dos procesos que tienen como objetivo la reducción del contenido de agua y la concentración de sólidos y los procesos de estabilización, los cuales tienen como objetivo la reducción de los niveles de organismos patógenos, la reducción o eliminación del potencial de putrefacción y la reducción del contenido de sólidos volátiles.

Las características de los lodos al final del tratamiento determinarán su posible aprovechamiento o disposición.

A continuación se describen los procesos de tratamiento de lodos comúnmente utilizados.

1.2.1. Tratamientos preliminares.

1.2.1.1. Cernido.

El lodo crudo es sometido a una etapa de cernido con el objetivo de separar el material grueso que pueda interferir con el equipo de tratamiento.

1.2.1.2. Espesamiento.

En este proceso se lleva a cabo la remoción de parte del agua que se encuentra unida a las partículas de los lodos, con el fin de incrementar la concentración de sólidos de los mismos. Se puede llevar a cabo por medios físicos como sedimentación por gravedad, flotación o centrifugación. Este proceso puede incrementar la concentración de sólidos de lodos primarios a aproximadamente 12 %, tomando en cuenta que la concentración de un lodo crudo puede ir de 0.25 % a 12 % de sólidos dependiendo de las operaciones y procesos utilizados. La reducción de volumen obtenida por la concentración de lodos es importante para los procesos subsecuentes como la digestión, deshidratación, secado y combustión. Esta reducción facilita el manejo de los lodos desde el punto de vista económico por lo siguiente:

- ❖ Capacidad de los tanques y del equipo requerido para el tratamiento
- ❖ Cantidad de químicos requeridos para el acondicionamiento de los lodos
- ❖ Cantidad de calor requerido por el digestor y cantidad de combustible auxiliar para el secado con calor o incineración

Esta operación reduce el costo de transporte del lodo al sitio de disposición (Bitton, 1994).

1.2.1.3. Acondicionamiento.

El objetivo de este proceso es mejorar las características de deshidratación de los lodos, facilitando la eliminación de agua e incrementando la concentración de sólidos, lo cual se puede lograr mediante dos métodos: adición de químicos y tratamiento con calor. En el acondicionamiento químico se puede reducir el contenido de humedad de un 90 a 99 % a un 65 u 85 %. Se logra utilizando acondicionadores químicos como cloruro férrico, cal, aluminio y polímeros orgánicos.

El agua contenida en los lodos impide la unión de las partículas mediante fuerzas electrostáticas. Los acondicionadores químicos contrarrestan los efectos de hidratación y repulsión electrostática y facilitan la separación de sólidos agregando las partículas pequeñas en masas grandes o floculos.

El proceso de acondicionamiento químico consta de 2 etapas: la primera consiste en la desestabilización, las superficies de las partículas son alteradas para que puedan adherirse entre sí, en la segunda sucede la floculación que consiste en facilitar el contacto de las partículas desestabilizadas por medio de una agitación lenta.

En el tratamiento con calor, el lodo es calentado en recipientes bajo presión a temperaturas mayores a 260 °C en periodos de tiempo cortos (aproximadamente 30 minutos). Durante este proceso la actividad térmica libera el agua adherida y se logra una coagulación de los sólidos, además ocurre una hidrólisis del material proteico con lo cual se logra una destrucción celular, liberación de compuestos orgánicos solubles y nitrógeno amoniacal. Como resultado se obtiene una estabilización y deshidratación del lodo, por lo que este proceso se puede considerar como estabilización o acondicionamiento. Por medio de este proceso se puede lograr una concentración de sólidos de 30 a 50 %.

Aunque es eficiente, este tratamiento no es ampliamente utilizado ya que presenta las siguientes desventajas: es un proceso costoso y complejo, se necesita utilizar materiales resistentes a la corrosión, se necesita de personal capacitado y una supervisión cuidadosa, se producen efluentes con altas concentraciones de orgánicos, nitrógeno amoniacal y color, se producen grandes cantidades de gases odoríferos que requieren tratamiento o destrucción.

1.2.2. Deshidratación.

En este proceso se disminuye el volumen de los lodos, lo cual se logra reduciendo el contenido de agua e incrementando la concentración de sólidos mediante operaciones mecánicas y no mecánicas. La selección de la técnica de deshidratación está determinada por los siguientes factores: tipo de lodo, características deseables del producto deshidratado y la disponibilidad de espacio. La deshidratación puede utilizarse antes o después de los procesos de estabilización de lodos. Se utiliza antes del composteo, de la disposición de lodos en rellenos sanitarios, secado con calor, o en algunas ocasiones para su aplicación en suelos. También se realiza antes de la incineración para prevenir daño a las calderas y para reducir la energía requerida para la combustión de lodos. Este proceso facilita el manejo de los lodos convirtiéndolos de líquidos en una pasta húmeda, por lo que reduce el costo de transporte de los mismos. A continuación se describen algunas técnicas:

1.2.2.1. Filtración por vacío.

Consiste en la utilización de un tambor cilíndrico que rota sumergido parcialmente en un tanque de lodo acondicionado. Dentro del tambor se aplica vacío, esto unido a la presión atmosférica logra la atracción del agua contenida en el lodo dentro del tambor, dejando fuera los sólidos. Las características del lodo a deshidratar determinan el resultado del proceso de filtración, el contenido óptimo de sólidos para la filtración es de 6 a 8 %, ya que un contenido mayor dificulta la

distribución y el acondicionamiento, mientras que un contenido menor requiere de filtros más largos de lo necesario. Con este método se puede obtener un porcentaje de contenido de sólidos de 12 a 22 %

1.2.2.2. Centrifugación.

En este proceso se hace girar a los lodos en un recipiente cilíndrico horizontal a altas velocidades, obteniendo de esta manera una concentración de los sólidos contenidos en el lodo fuera del recipiente. Con este proceso se puede lograr una concentración de sólidos de 25 a 35 %

1.2.2.3. Filtro prensa.

En este proceso se exprimen los lodos entre cinturones porosos opuestos que pasan a través de una serie de rodillos, se ejerce una presión sobre los lodos que obliga al agua a salir de ellos, con lo cual se obtiene una torta de lodos deshidratados.

Durante el proceso el lodo acondicionado es sometido a un drenaje por gravedad donde es espesado, posteriormente se aplica presión en una sección de presión baja, donde el lodo es exprimido entre los cinturones porosos opuestos.

En la mayoría de las plantas de tratamiento se utiliza una presión baja, pero en otras se puede utilizar otra sección de presión alta, en las cuales el lodo es sujeto a fuerzas que inducen la liberación de cantidades adicionales de agua del lodo. Se puede obtener un contenido de sólidos de 20 a 32 %

1.2.2.4. Lechos de secado.

En esta modalidad de deshidratación el lodo se pone en lechos que contienen una capa de arena de 230 a 300 mm. El lodo se deshidrata por evaporación del agua de la superficie expuesta al aire y por el drenaje a través de la masa del lodo y la

arena. La mayor parte del agua deja el lodo por drenaje por lo que el sistema cuenta con líneas de drenaje lateral. Es un proceso recomendable debido a que no implica costos elevados ni atención frecuente, además de que se puede obtener un producto de contenido de sólidos alto. La concentración final de sólidos provenientes de lechos de secado puede ser tan alta como el 80 % (Girovich 1996).

Después de ser deshidratado mediante esta técnica el lodo puede disponerse en rellenos sanitarios o puede ser usado como acondicionador de suelo.

1.2.3. Procesos de estabilización de lodos.

La estabilización se puede definir como un proceso o una serie de procesos que producen un lodo de alta calidad para que su último uso sea aceptable desde el punto de vista de impacto ambiental y salud pública.

Las características que pueden hacer a un lodo inaceptable son las siguientes (Vesilind, *et al.*, 1988)

1. Producción de olores desagradables.
2. Contenido de microorganismos patógenos.
3. Contenido de toxinas químicas.
4. Dificultad para deshidratarlo.

El éxito de los procesos de estabilización radica en sus efectos en la fracción volátil y orgánica del lodo, ya que la supervivencia de patógenos, la liberación de olores desagradables y la putrefacción ocurren cuando se permite el florecimiento de los microorganismos en la materia orgánica del lodo.

Para eliminar las condiciones que hacen a los lodos inaceptables se requiere (Metcalf & Eddy, 1991)

1. La reducción biológica del contenido orgánico
2. La oxidación química de la materia volátil
3. La adición de químicos al lodo para hacer inadecuadas las condiciones para la supervivencia de microorganismos y
4. La aplicación de calor para desinfectar o esterilizar el lodo

Es importante mencionar que los procesos de estabilización tienen diferentes eficiencias, mejorando una o varias características del lodo, como se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7. Reducción de patógenos y estabilización de lodo con diferentes tratamientos

Tratamiento	Reducción de volumen	Reducción de patógenos	Reducción de contaminantes	Potencial de putrefacción	Disminución de olores desagradables
Deshidratación	Significativa	No	No		
Secado al aire	Alta	Buena	No		
Digestión aerobia mesofílica	No	Buena	No	Bajo	Buena
Digestión aerobia termofílica	No	Excelente	No	Bajo	Buena
Digestión anaerobia	No	Buena	No	Bajo	Buena
Composteo termofílico	Incremento ligero	Excelente	Si	Bajo	Buena
Composteo mesofílico	Incremento ligero	Buena	Si	Bajo	Buena
Estabilización alcalina	Incremento ligero	Buena	Si	Medio	Buena

(Adaptado de Girovich, 1996)

A continuación se describen algunas técnicas de estabilización de lodos

1.2.3.1. Digestión anaerobia.

Este proceso depende de la acción de dos tipos de microorganismos anaerobios los formadores de metano y los de ácido, los cuales pueden consumir la materia orgánica de los lodos en ausencia de oxígeno. El proceso microbiológico ocurre en 3 pasos

- ❖ Transformación mediada por enzimas: ocurre una hidrólisis de los compuestos de alto peso molecular, como lípidos y polisacáridos en compuestos más accesibles para su uso como fuente de energía y carbono celular, como monosacáridos y aminoácidos
- ❖ Acidogénesis: ocurre una fermentación mediada por bacterias acidógenas de los compuestos resultantes del primer paso, en ácidos orgánicos simples, entre los cuales el más común es el ácido acético
- ❖ Metanogénesis: ocurre una conversión mediada por bacterias metanógenas del hidrógeno y del ácido acético a gas metano y dióxido de carbono

El proceso se lleva a cabo en un reactor cerrado (Fig. 4), en el cual el lodo se introduce de manera continua o intermitente y es retenido en periodos de tiempo variados. Los digestores anaerobios pueden ser

- ❖ Reactores de baja tasa: con tiempos de retención de 30 a 60 días en los cuales el contenido no es calentado
- ❖ Reactores de alta tasa: con tiempos de retención de 10 a 20 días y pueden ser mezclados o calentados a temperaturas mesofílicas (30 a 38 °C) o termofílicas (50 a 60 °C).

Los tiempos de retención más largos y las temperaturas altas logran eficiencias de estabilización mayores.

Para mantener un sistema de tratamiento anaerobio que establezca los desechos orgánicos eficientemente, se necesita un estado de equilibrio dinámico entre las bacterias acidógenas y metanógenas. Para establecer y mantener este equilibrio se necesita que las siguientes condiciones permanezcan:

- ❖ El contenido del reactor debe estar libre de oxígeno disuelto y libre de concentraciones de metales pesados que puedan inhibir el proceso

- ❖ El pH del ambiente acuoso debe estar entre 6.6 a 7.6, debe haber una alcalinidad suficiente para que el pH no baje de 6.2 ya que las bacterias no metabolizan por debajo de este punto
- ❖ Se necesita una cantidad suficiente de nutrientes como nitrógeno y fósforo que permitan el óptimo crecimiento de la comunidad biológica
- ❖ La temperatura óptima mesofílica es de 30 a 38 °C o de 49 a 57 °C termofílica

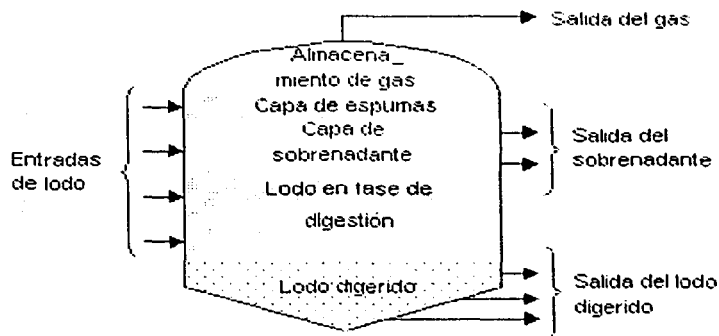


Figura 4 Digestor convencional en el proceso de una sola fase.

Al final del proceso de digestión anaerobia se obtiene una reducción del contenido orgánico, con reducciones de sólidos volátiles de 40 a 45 % reducción de olores desagradables, del número de patógenos, de la masa y de la capacidad de putrefacción del lodo. Como producto final se obtienen dióxido de carbono, metano y amoníaco. El metano producido puede utilizarse como fuente de energía, por lo cual esta técnica de estabilización es ampliamente utilizada. El lodo digerido puede utilizarse para elaborar composta, aplicarse directamente en suelos o disponerse en rellenos sanitarios.

1.2.3.2. Digestión aerobia.

El objetivo de este proceso es destruir los sólidos orgánicos volátiles suspendidos es decir, destruir los microorganismos que fueron crecidos para el propósito de uso en el sistema de lodos activados (Vesilind, 1988)

Durante el proceso se elimina el suplemento de alimento disponible para las bacterias, por lo que los microorganismos consumen su propio protoplasma, es decir, realizan una oxidación aerobia de los tejidos celulares para poder obtener energía para mantenerse, quedando como producto final del proceso dióxido de carbono, agua y nitrógeno

Se puede llevar a cabo en recipientes abiertos, cerrados o lagunas, en los cuales los lodos son aireados y sometidos a distintas temperaturas. El suplemento de oxígeno se puede dar por mezclado o por inyección de aire a presión. Las temperaturas pueden ser mesofílicas (37 °C) con tiempos de retención de 10 a 20 días o termofílicas, utilizando temperaturas mayores a 55 °C

Al final del proceso se obtienen reducciones de 40 a 60 % de sólidos volátiles con lo cual se obtiene una reducción en el contenido de patógenos, olores desagradables y se inhibe la putrefacción

1.2.3.3. Estabilización alcalina.

Consiste en la adición de algún material alcalino, como la cal, la cual es mezclada con el lodo en cantidades suficientes hasta alcanzar un pH de 12 o mayor por un periodo mínimo de 2 horas, lo cual hace que las condiciones sean inadecuadas para la supervivencia de los microorganismos.

Existen dos métodos por los que se puede llevar a cabo la estabilización alcalina puede adicionarse al lodo líquido o bien deshidratado, requiriendo dosis menores en este último caso

Con la estabilización alcalina se obtiene una reducción de patógenos y olores desagradables, además de que puede ser una fuente de cal que ayude a neutralizar a los suelos ácidos en caso de su aplicación

Recientemente se han desarrollado procesos de estabilización alcalina avanzados, en los cuales se utilizan otros aditivos químicos para reemplazar la cal, en parte o completamente. El objetivo de utilizar un proceso de estabilización alcalina avanzado consiste en incrementar el contenido de sólidos reducir la movilidad de metales pesados y obtener una reducción de microorganismos patógenos mayor. Como resultado de este proceso se obtiene un producto estable a largo plazo que permite su almacenamiento con un potencial mínimo de producción de olores y de recrecimiento de microorganismos patógenos.

Las técnicas de estabilización alcalina producen lodos que cumplen con los requerimientos mínimos de número de organismos patógenos y atracción de vectores, marcados en el apartado 503 de la EPA, por lo que estos lodos pueden ser usados como mejoradores de suelos o fertilizantes. Adicionalmente, estos lodos pueden ser empleados como cubierta de rellenos sanitarios.

1.2.3.4. Composteo.

Se basa en el mezclado de una pasta de lodo deshidratado con un agente abultante, con el fin de obtener una descomposición de la materia orgánica del lodo por acción de microorganismos.

El agente abultante es utilizado para reducir humedad, incrementar la porosidad y aumentar con ello la aireación, así como adicionar una fuente de carbono al sistema. Se pueden utilizar como agentes abultantes hojuelas de madera, corteza de árboles, paja o material previamente compostado.

El proceso consiste en acomodar la mezcla en pilas, camas o hileras, en las cuales se lleva a cabo un composteo activo que dura de 3 a 4 semanas y un proceso menos activo, llamado curado, que dura 1 semana

Los factores que deben cuidarse para tener un buen desarrollo del sistema de composteo son los siguientes.

- ❖ El tamaño y la porosidad de la pila
- ❖ Se debe alcanzar una temperatura homogénea de 55 a 60 ° C, lo cual permite la reducción de la mayoría de patógenos
- ❖ Se debe controlar la humedad y los niveles de oxígeno, lo cual permite controlar la producción de olores desagradables

Como producto del composteo se obtiene un material con un alto potencial para ser utilizado como mejorador de suelo, y de acuerdo al pH que presenta (6.5 a 8 unidades) puede ser benéfico para el crecimiento saludable de las plantas y para reducir la movilidad de metales pesados. En la composta el nitrógeno se libera más lentamente, comparado con otros biosólidos, lo cual lo hace disponible para las plantas en un mayor tiempo según las necesidades de las mismas. La liberación lenta del nitrógeno también reduce la lixiviación del mismo, que es un problema importante en suelos fertilizados mineralmente. La composta favorece a la microflora del suelo y puede ayudar a prevenir enfermedades de las plantas.

Si el producto del composteo cumple con los límites de microorganismos patógenos y de metales pesados establecidos en la EPA, puede utilizarse como cualquier otro fertilizante o acondicionador de suelo. Este producto es de excelente calidad y se puede utilizar en proyectos paisajísticos, se puede aplicar en parques, céspedes y jardines particulares, puede utilizarse como cubierta de rellenos sanitarios, puede aplicarse en canchas de golf para controlar la erosión del suelo, y puede utilizarse en restauración de tierras inundadas, en agricultura y en remediación de suelos contaminados.

1.2.4. Supervivencia de patógenos en los procesos de tratamiento de lodos residuales.

Como se mencionó anteriormente un objetivo muy importante del tratamiento de lodos residuales, es la reducción del número de microorganismos patógenos para evitar el riesgo a la salud humana y ambiental.

Como cualquier organismo vivo los patógenos sobreviven en ciertas condiciones de pH, temperatura, nivel de humedad, oxígeno, luz solar, proporción de nutrimentos, de contacto con el hospedero y de competencia con otros microorganismos.

Cada especie de patógeno tiene diferente tolerancia a diferentes condiciones, sin embargo, la reducción de patógenos se debe basar en la necesidad de disminuir al máximo todas las poblaciones de patógenos presentes en los lodos. Por ejemplo, el destruir o inactivar huevos de helmintos en los lodos es de vital importancia si se planea aplicarlos en suelos debido a su capacidad para sobrevivir por largos periodos de tiempo aún en condiciones adversas (Tabla 8) (Barrios *et al.*, 2000).

Tabla 8 Tiempos de supervivencia de huevos de helmintos y quistes de protozoarios en el ambiente (Andreoli *et al.*, 1999)

Parásito	Tiempo de supervivencia		Condiciones ambientales
	Medio	Máximo	
<i>Ascaris</i>	3 meses	7 a 14 años	verano / invierno
<i>Toxocara</i>	8 meses	7 años	25 °C / invierno
<i>Trichuris</i>	3 meses	2 años	25 °C / invierno
<i>Taenia</i>	60 días	1 año	verano / invierno
Protozoarios	2 días	15 días	20-30 °C

El tiempo de supervivencia de los microorganismos patógenos puede variar de algunos días hasta años. Se considera que los huevos de *Ascaris lumbricoides* son los más resistentes a los diferentes procesos de tratamiento y presentan los mayores tiempos de supervivencia en el ambiente (Tabla 8)

1.2.5. Remoción de patógenos en los procesos de tratamiento de lodos residuales.

Los procesos de tratamiento de lodos residuales están basados en investigaciones relacionadas con la supervivencia de patógenos bajo condiciones específicas de tratamiento. La efectividad de un proceso particular puede variar dependiendo de las condiciones bajo las que es operado. Por ejemplo, el tiempo y la temperatura son críticos para la efectividad de los procesos de tratamiento, como se muestra en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9. Temperatura y tiempo de exposición requeridos para la destrucción de algunos patógenos comunes (Andreoli *et al.*, 1999)

Organismo	Observaciones
<i>Salmonella typhosa</i>	Sin crecimiento alrededor de 46 °C, muerte en 30 min. entre 55-60 °C y en 20 min. arriba de 60 °C, destruidos en tiempo corto en la atmósfera del composteo
<i>Salmonella spp</i>	Muerte en 30 min. entre 55-60 °C y en 20 min. arriba de 60 °C
<i>Shigella spp</i>	Muerte en 1 hora a 55 °C
<i>Escherichia coli</i>	La mayor parte muere en 1 hora a 55 °C y entre 15-20 min. arriba de 60 °C.
<i>Entamoeba histolytica cystis</i>	Muerte en pocos minutos a 45 °C y en pocos segundos a 55 °C
<i>Taenia saginata</i>	Muerte en pocos minutos a 55 °C
Larva de <i>Trichinella spiralis</i>	Rapidamente muertos a 55 °C e instantáneamente muertos a 60 °C
<i>Micrococcus pyogenes var Aureus</i>	Muerte en 10 min. a 50 °C
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Muerte en 10 min. a 54 °C
<i>Corynebacterium diptheriae</i>	Muerte en 45 min. a 55 °C
<i>Necator americanus</i>	Muerte en 50 min. a 45 °C
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Muerte en menos de 1 hora a temperatura arriba de 50 °C

Tabla 10. Eficiencia de diferentes procesos de tratamiento de lodos en la reducción de microorganismos indicadores y patógenos (Watanabe *et al* 1997 Reimers *et al* 1986 Barrios *et al* 2000)

PROCESO	CONDICIONES temperatura / tiempo	EFICIENCIA	
		Bacterias Reducción en unidades log	Huevos de Helmintos
Digestión aerobia mesofílica	28 °C / 10-20 días	1 log	Inefectiva en la reducción de parásitos
	35 °C / 2 días		Reducción de 0.5 a 1.4 log
Digestión aerobia termofílica	45 °C o mayor		Reducción de 1 log de <i>Toxocara</i>
Digestión anaerobia		1 a 3 log	Mayor destrucción de parásitos
Digestión anaerobia mesofílica			Supervivencia de <i>Ascaris</i> , <i>Trichuris</i> y <i>Toxocara</i> spp
	35 °C / 14-15 días	1 a 2 log	
Digestión anaerobia termofílica	53 °C		Reducción de <i>Ascaris</i> , <i>Trichuris</i> y <i>Toxocara</i> spp a niveles no detectables
	55 °C / 15 min		Destrucción de <i>Ascaris</i> spp
Lagunas de almacenamiento	20 °C / 1 mes	1 log	
	20 °C / 6 meses		Reducción de 1 log
	20 °C / 6 meses	1 log	
	20 °C / 3 años		Reducción de 1 log
Pasteurización	55 °C / 2 hrs		Destrucción de <i>Ascaris</i> spp
	70 °C / 30 min		Destrucción de más del 99% de <i>Taenia saginata</i>
Composteo	55 °C	3 a 4 log	
	51 °C / 15 min		Reducción de 1 log de parásitos
	50 °C / 1 hr		Reducción de 3 log de <i>Ascaris</i> spp
Estabilización alcalina		1 a 7 log	
Estabilización ácida		5-7 log	Porcentaje de reducción de 88%

1.3. DISPOSICIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LODOS.

La disposición de lodos se refiere a su confinamiento espacial, como es el caso de los rellenos sanitarios o bien, puede referirse a colocar al lodo en lugares inadecuados como es el caso del vertido al mar. Dentro de la disposición también se consideran procesos como la incineración, la cual facilita la disposición de los lodos.

El aprovechamiento de los lodos se refiere al uso benéfico de los mismos, el cual incluye varios tipos de aplicación en suelo. En la actualidad los esfuerzos van enfocados a lograr un reúso o aprovechamiento de los lodos.

Generalmente los métodos de estabilización de lodos dan como resultado la producción de biosólidos, los cuales se pueden definir como los lodos residuales que han sido procesados para hacerlos apropiados para uso benéfico al aplicarlos al suelo (Lue-Hing *et al.*, 1998).

1.3.1. Disposición de lodos.

1.3.1.1. Incineración.

Es un método que logra una combustión completa de los lodos, con lo cual se reduce el volumen de los mismos en aproximadamente un 95% por lo que se facilita su disposición.

El proceso consta de dos etapas: en la primera se logra una deshidratación y en la segunda una combustión en donde se oxida completamente la materia volátil. Las características de los lodos afectan el proceso de incineración, en cuanto al contenido de materia volátil. Como producto final del proceso se obtienen cenizas las cuales pueden disponerse en relleno sanitario.

Las ventajas de utilizar este método de disposición se refieren a la reducción del volumen total del lodo, la destrucción de los sólidos volátiles y los patógenos y la degradación de la mayoría de los químicos orgánicos tóxicos.

Sin embargo, este método presenta desventajas importantes, ya que el proceso representa un alto costo de inversión, operación y mantenimiento, requiere de personal calificado y provoca contaminación atmosférica cuando no se cuenta con dispositivos que controlen las emisiones a la atmósfera. En este proceso no se logra la degradación de metales, por lo que se concentran en las cenizas y en los gases generados, y también se pueden formar dioxinas.

Debido a estas desventajas, este método no es ampliamente utilizado. Numerosas plantas que incineraban biosólidos han cerrado durante las décadas pasadas debido a que otras prácticas de manejo han tenido mayor aceptación pública y son menos costosas.

Algunas localidades optan por la incineración cuando el área de aplicación al suelo es escasa, o no es recomendable para aplicación de biosólidos en suelo (EPA 1999a).

1.3.1.2. Relleno sanitario.

Consiste en depositar el lodo en un sitio adecuado para este fin, se puede depositar solo, o bien, con otros residuos para posteriormente ser tapado con suelo.

Cuando los lodos son enterrados, se llevan a cabo una serie de procesos que descomponen los residuos, esta descomposición es una degradación anaerobia debido a que el oxígeno es insuficiente, también se lleva a cabo oxidación química, transporte de sedimentos y disolución de materiales.

Existen dos clases de relleno sanitario

- ❖ Trincheras o zanjas: las zanjas varían de 1 a 15 m de ancho. El lodo es depositado y cubierto con suelo el mismo día, con el fin de minimizar olores y prevenir el contacto del lodo con vectores.
- ❖ Codisposición: el lodo es dispuesto en un relleno municipal junto con basura. Consiste principalmente en esparcir encima de la basura el lodo, el cual es mezclado (aproximadamente 7 ton de basura por 1 ton de lodo). Otro método consiste en mezclar lodo y suelo, y después esparcirlo encima de la basura (Cardoso, 1993).

En un relleno sanitario se deben tomar en cuenta los siguientes factores (Ortiz 1994).

- ❖ Tamaño del sitio. Se selecciona de acuerdo con la cantidad de lodo producido por la planta de tratamiento.
- ❖ Topografía. Los sitios adecuados son los que presentan poca pendiente (entre 1 y 20 %).
- ❖ Agua superficial y subterránea. Se debe tener en cuenta el nivel freático para evitar contaminación por escurrimiento y lixiviación.
- ❖ Sitios de acceso. Para evitar tráfico de camiones.
- ❖ Uso del suelo.
- ❖ Costos.
- ❖ Suelos y topografía. En cuestión de suelos deben considerarse la textura, la estructura, profundidad, permeabilidad, pH y la capacidad de intercambio catiónico. La topografía es importante para el control de lixiviados.
- ❖ Las áreas sensibles, como suelos húmedos, suelos susceptibles de inundación, áreas de congelamiento permanente y zonas de recarga de acuíferos no son buenos candidatos para realizar rellenos sanitarios.
- ❖ La cobertura vegetal de los alrededores ayuda a diluir olores desagradables.

Este método de disposición no es muy recomendable ya que debido a la producción de lixiviados y gases representa una fuente de contaminación por lo que se requiere infraestructura para la captación y monitoreo de lixiviados al acuífero, de escurrimientos en el agua superficial y del control de gases generados durante la descomposición. A estos factores se le suma que el lodo algunas veces necesita ser deshidratado o estabilizado para poder disponerse incrementándose el costo del método, por lo que puede resultar más recomendable invertir en un método de aprovechamiento.

1.3.2. Aprovechamiento de lodos.

Las opciones de disposición de lodos se están haciendo cada vez más limitadas en el caso de la disposición en rellenos sanitarios son difíciles de implementar debido a la carencia de lugares en donde establecerlos, así como al incremento en las cuotas de disposición. En cuanto a la incineración requiere mucho capital y está sujeta a normas de emisiones atmosféricas cada vez más estrictas además de producir cenizas que suelen ser difíciles de manejar. En cambio la transformación de biosólidos en abono, que produce un acondicionador de suelos comercializable, está adquiriendo popularidad porque es un medio económico y flexible de reutilizar los nutrientes y la materia orgánica de los lodos (Henry *et al* 1999). Adicionalmente se están desarrollando tecnologías entre las que se encuentran la conversión de lodos en alimento para animales, tabiques, cemento, aceite y agregados para caminos.

1.3.2.1. Aplicación de biosólidos en suelos.

Consiste en la dispersión en la superficie o la incorporación o inyección de los biosólidos en el suelo con la finalidad de mejorar las características del mismo. Los biosólidos pueden aplicarse al suelo con objetivos de producción agrícola y forestal, como mejoradores o fertilizantes en áreas en rehabilitación que han sido perturbadas.

En todos los casos, la aplicación es diseñada con el fin de proveer tratamiento adicional a los biosólidos. La luz solar, los microorganismos del suelo y la desecación se combinan para destruir patógenos y algunas sustancias orgánicas potencialmente tóxicas. Se pretende que los metales traza sean neutralizados en la matriz del suelo y que los nutrientes sean tomados por las plantas y convertidos en biomasa útil (Metcalf & Eddy, 1989).

En el desarrollo de un sistema de aplicación de biosólidos en suelo se deben tomar en consideración los siguientes aspectos:

- ❖ Caracterización de la calidad y cantidad del lodo
- ❖ Revisión de la legislación federal, estatal y local
- ❖ Evaluación y selección del sitio
- ❖ Determinación de los parámetros de diseño del proceso (tasa agronómica, requerimientos del suelo, aplicación de metodología y agenda)

La aplicación de biosólidos en suelo puede proveer las siguientes ventajas:

- ❖ En la mayoría de los casos es menos costosa que los métodos de disposición
- ❖ Mejora la aptitud del suelo para el cultivo, aumenta la retención de agua y facilita el transporte de nutrientes
- ❖ En el caso de sustratos de vivero, evita la explotación de suelos naturales
- ❖ Los biosólidos pueden reemplazar la utilización de fertilizantes comerciales
- ❖ En tierras forestales acelera el crecimiento de los árboles
- ❖ En sitios en rehabilitación permite la introducción de vegetación en suelos de baja fertilidad, y sirve para controlar la erosión

Nutrientes

Aunque los biosólidos contienen relativamente niveles bajos de macro y micronutrientes, cuando se aplican en tasas adecuadas pueden suplementar

todo el nitrógeno y fósforo necesario, así como el calcio, magnesio y otros micronutrientes esenciales.

La dosis de aplicación de biosólidos se basa en un elemento requerido por los agricultores para la producción. Generalmente la tasa agronómica se basa en el requerimiento de nitrógeno del cultivo, con la finalidad de minimizar la lixiviación del mismo.

Materia orgánica

La materia orgánica del suelo consiste en cualquier sustancia de origen orgánico que está formada mayormente por carbono (aprox. 58 % del peso total) y contiene en menor proporción oxígeno, hidrógeno y otros elementos como nitrógeno, azufre y fósforo. Proviene de restos de vegetales, bacterias, hongos, protozoarios, lombrices, abonos animales y desechos del metabolismo animal.

La materia orgánica aplicada en forma de biosólidos contiene proteínas, carbohidratos, polisacáridos, grasas, resinas, nitrógeno, azufre y compuestos fosfóricos. Tiene una influencia significativa en las características del suelo proporcionándole condiciones físicas deseables y modificando varias relaciones químicas y biológicas, dando como resultado un aumento en la capacidad de productividad de los suelos.

La materia orgánica interviene en los siguientes procesos esenciales en el suelo:

- ❖ Formación y estabilización de agregados, lo que permite una mayor resistencia a la erosión.
- ❖ Adsorción e intercambio iónico.
- ❖ Suministro de nutrientes.
- ❖ Influencia en los organismos presentes en los suelos.

Sin embargo de la misma manera en que los lodos poseen características benéficas, también pueden concentrar contaminantes como organismos patógenos, parásitos y metales pesados. En el caso de organismos patógenos y parásitos diseminando enfermedades y en el caso de metales pesados causando toxicidad en la cadena trófica cuando se encuentran en niveles elevados. Por esta razón es prioritario dentro de una estrategia de aplicación de biosólidos en suelo realizar una caracterización que se asegure que los biosólidos tienen un contenido bajo o nulo de contaminantes, de manera que no representan un riesgo a la salud humana y al ambiente.

Patógenos

De todos los organismos patógenos y parásitos que albergan los lodos, se considera que el principal peligro lo representan la presencia de *Salmonella spp* y los huevos de parásitos, en particular de *Taenia saginata* y *Ascaris lumbricoides* debido a que los organismos parásitos son extremadamente resistentes a la mayoría de los tratamientos utilizados en la estabilización de los lodos (Pike *et al* 1988) (Ver pag 30)

Metales pesados

Los metales pesados en los lodos residuales provienen de las descargas domésticas y principalmente industriales en los sistemas de drenaje. Como resultado de los procesos de tratamiento, los metales del influente se convierten en parte de la masa del lodo (Tabla 11)

Cuando un lodo es aplicado en el suelo, una nueva fuente de metales pesados es introducida.

La EPA realizó estudios extensivos durante 1980 en metales pesados presentes en lodos residuales y evaluaron su concentración, toxicidad y los efectos perjudiciales que pueden causar en el humano y en el ambiente.

Tabla 11 Concentraciones típicas de metales en lodos residuales municipales
(Girovich 1996)

ELEMENTO	SIMBOLO	CONCENTRACIÓN (mg/kg base seca)
Arsénico	As	10
Cadmio	Cd	10
Cromo	Cr	500
Cobre	Cu	800
Mercurio	Hg	6
Molibdeno	Mo	4
Niquel	Ni	80
Plomo	Pb	500
Zinc	Zn	1700
Selenio	Se	5

De acuerdo con estos estudios se establecieron límites máximos permisibles para arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, selenio y zinc. El resto de los compuestos analizados no presentaron ningún riesgo potencial de acuerdo con los análisis realizados.

En la tabla 12 se describen las fuentes de donde provienen estos metales pesados y los daños que pueden causar a plantas o animales.

Las investigaciones de impacto ambiental conducidas para suelos en donde se han aplicado biosólidos sugieren que siempre y cuando se cuida que los niveles de metales pesados no sobrepasen los límites establecidos, existe un bajo riesgo a la salud humana, la producción del cultivo, la salud de los animales, la calidad del agua subterránea, la calidad del agua superficial y la calidad del aire en base general. Cuando se cumple con los límites máximos permisibles de metales pesados en aplicaciones de biosólidos en suelos de cultivo, se considera que virtualmente no existe ningún riesgo. Los metales adicionados en los lodos se

encuentran estabilizados, secuestrados químicamente en complejos órgano-minerales altamente estables y poco solubles, por tanto permanecen en esta forma aunque los biosólidos sean mezclados o no en el suelo y aunque la materia orgánica se degrade con el tiempo

Tabla 12 Fuentes que generan metales pesados y algunos de los daños que pueden causar al ecosistema

METAL	FUENTES	TOXICIDAD EN CONCENTRACIONES ELEVADAS	CARCINÓGENO
ARSENICO	Fundición de metales y combustión de carbon mineral. Presente en algunos pesticidas	Alteraciones de la piel con efectos secundarios en los sistemas nervioso gastro-intestinal y hematopoyetico irritación de los organos del aparato respiratorio.	Carcinogeno
CADMIO	Plataedura metálica y desechos de la mineria	Tóxico para plantas Daño a los riñones, hipertensión y destrucción de eritrocitos	Posible carcinogeno
CROMO	Plataedo o dorado metálico Desechos de la mineria	Tóxico para plantas y animales	Carcinogeno
COBRE	Descargas industriales. mineria	Toxico para plantas y no muy toxico para animales	No carcinogeno
PLOMO	Fuentes industriales y de la mineria, de la gasolina con plomo	Dislunción en los riñones, sistema reproductor, hígado, cerebro y sistema nervioso central.	Posible carcinogeno
MERCURIO	Combustión del carbón mineral, pesticidas, fungicidas, baterias y productos farmaceuticos	Daño al sistema nervioso	No determinado
MOLIBDENO	Descargas industriales y minerales	Toxico para animales	No determinado
NIQUEL	Descargas industriales y minerales	Toxico en niveles altos para plantas, animales y humanos	Posible carcinogeno
SELENIO	Fuentes minerales e industriales	Como en el anterior	No determinado
ZINC	Desechos industriales, plataedo metálico	Como en el anterior	No determinado

(Modificado de Girovich, 1996)

Debido a que el contenido de metales pesados se encuentra fuertemente influenciado por el pH se pueden tomar alternativas para disminuir la disponibilidad de metales pesados cuando se aplican biosólidos en suelo. Incrementando el pH de un suelo mejorado se puede reducir la disponibilidad y por tanto la absorción de metales por las plantas. La manipulación del pH del suelo es el método más efectivo y rápido para controlar la disponibilidad de metales pesados en suelos mejorados con biosólidos. Llevando al suelo a un valor de pH de 6.5 a 7 se puede reducir la fracción móvil de la mayoría de metales pesados en el suelo.

Compuestos orgánicos.

Los plaguicidas, los disolventes industriales, los colorantes, los plastificantes, los agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción tienden a acumularse en los lodos. Incluso pueden concentrar hidrocarburos aromáticos polinucleares, procedentes de la combustión de los combustibles fósiles.

La principal preocupación con los compuestos orgánicos no es la absorción por parte de las plantas sino la ingestión directa por parte de los animales, particularmente por el ganado. También existe evidencia de que los orgánicos pueden ser absorbidos en la superficie en los cultivos de raíz como las zanahorias. El grupo de trabajo de la Organización Mundial de la Salud sobre riesgos para la salud de los productos químicos presentes en los lodos residuales aplicados en suelos determinó que "la absorción total por el hombre de contaminantes orgánicos identificados procedentes de la aplicación de lodos a tierras de cultivo es poco importante y probablemente no causará efectos adversos para la salud".

Sin embargo, a pesar de que cada vez se investiga más el impacto ecotoxicológico de los contaminantes orgánicos en el sistema suelo-planta-agua y en la cadena alimenticia es aún poco claro (Bontoux *et al.*, 2000).

1.3.3. Manejo de lodos residuales a escala mundial.

Actualmente existe una tendencia mundial enfocada a proveer un destino adecuado a los residuos provenientes de los sistemas de tratamiento. En la Conferencia Mundial del Medio Ambiente, llevada a cabo en Río de Janeiro, Brasil en 1992, los países participantes establecieron en la Agenda 21 la necesidad de minimizar la generación de residuos y maximizar el reuso o reciclaje de los mismos.

En cuanto al manejo de lodos residuales, la tendencia mundial es el reuso benéfico, principalmente utilizando a los biosólidos como fertilizantes o mejoradores de suelo. En países desarrollados el reuso benéfico es exitoso. En el caso de la Unión Europea, el 45 % del total de biosólidos generados son aprovechados benéficamente en suelos agrícolas, mientras que en Estados Unidos se aprovecha un 60% (Tabla 13).

Tabla 13 Manejo de lodos a escala mundial

PAÍS	TRATAMIENTO	DISPOSICIÓN O APROVECHAMIENTO	LEGISLACIÓN
Egipto (Hall, 2000)	Deshidratación Composteo	Disposición <i>ex situ</i>	Limites parecidos a la US EPA
Estados Unidos (EPA, 1999)	Estabilización	Uso benéfico, 60 % Disposición, 40 %	Apartado 503 EPA
Reino Unido (Horan, 2000)	Pasteurización, Digestión mesofílica y termofílica. Estabilización alcalina	Aplicación en suelo, 47 % del total	Código de Prácticas Para Uso Agrícola de Lodos Residuales
Europa (Leschber, 1998)	Estabilización	Aplicación en suelos, 37 % Rellenos sanitarios, 40 % Vertido al mar, 6 % Incineración, 11 % Otros, 6 %	Comité Europeo de Estandarización
Brasil (Andreoli, 1999)	Estabilización	Vertido al drenaje, Disposición <i>in situ</i>	Programa Interdisciplinario de Investigación y Reciclaje Agrícola
China (Wang, 1997)	Estabilización	Aplicación en suelo, Vertido al mar, Rellenos sanitarios, Incineración	
Japón (Watanabe, 1997)	Estabilización	Aplicación en suelos agrícolas y forestales, 14 % del total	
Dinamarca (Jepsen, 1997)	Estabilización	Aprovechamiento benéfico, 68 % del total	EPA

Varios países Europeos y Estados Unidos cuentan con legislación que establece los límites de contaminantes para biosólidos que serán aprovechados en suelos de cultivo, de manera que no representen riesgo a la salud

En países en desarrollo se están implementando técnicas de estabilización adecuadas, así como estudios de calidad de lodos que permitan su disposición o aprovechamiento, dado los altos índices de microorganismos patógenos y principalmente parásitos en los mismos. Es importante destacar que se han realizado importantes avances en países en cuanto a manejo de lodos en México y Brasil.

1.4. LEGISLACIÓN.

1.4.1. Proyecto de Norma Oficial Mexicana (NOM-004-ECOL).

Con el objetivo de tener un manejo integral en el tratamiento de lodos residuales y una adecuada disposición de los mismos en nuestro país, se encuentra en desarrollo la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-ECOL) En el mes de abril de 2002 se cerró el periodo de consulta de este proyecto de norma, el cual establecerá los límites máximos permisibles de contaminantes en lodos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de los biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales para su adecuado aprovechamiento y disposición final

En esta Norma se establecen las siguientes especificaciones:

- ❖ Para que los lodos y biosólidos se puedan aprovechar o disponer se debe demostrar cada 2 años, que no son corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos o inflamables (análisis CRET1) de acuerdo con la normatividad vigente. Sin embargo, quedarán exentos de dicha prueba los que comprueben que el contenido de patógenos, parásitos y metales pesados es homogéneo. Estos

lodos y biosólidos podrán ser manejados y aprovechados o dispuestos en forma final como residuos no peligrosos

- ❖ Los biosólidos se clasifican en tipo excelente y bueno con base en su contenido de metales pesados y en Clase A y B en función de su contenido de patógenos y parásitos (Tablas 14 y 15)
- ❖ Para que los biosólidos puedan ser aprovechados, se debe comprobar un control de vectores y deben cumplir con los límites máximos permisibles de metales pesados, así como de patógenos y parásitos. Los límites máximos permisibles son los siguientes

Tabla 14 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos mexicanos (PROY-NOM-004-ECOL. 2000)

Contaminante (determinados en forma total)	Excelente mg/kg en base seca	Bueno mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	7,500

Tabla 15 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en biosólidos mexicanos (PROY-NOM-004-ECOL. 2000)

CLASE	PATOGENOS		PARASITOS
	Coliformes fecales NMP/g base seca	<i>Salmonella</i> spp NMP/g base seca	Huevos de helminto/g base seca
A	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
B	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

- ❖ Para el aprovechamiento de los biosólidos en áreas en donde exista contacto público directo, la calidad debe ser Excelente. Clase A con un contenido de humedad del 70 % o menor (30 % ST)
- ❖ Los biosólidos que se pretendan aprovechar en terrenos con fines agrícolas, mejoramiento de suelos y restauración de paisajes no deben aplicarse si los suelos están congelados, inundados, cubiertos por nieve o con un pH de 5 o menor y su aplicación estará sujeta a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal
- ❖ El aprovechamiento de biosólidos en terrenos comprendidos en zonas declaradas como áreas naturales protegidas solo podrá realizarse previa autorización de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- ❖ Para la disposición final de los lodos y biosólidos se deberá cumplir con el CRET1 y con los límites máximos permisibles en contenido de patógenos y parásitos establecidos para biosólidos Clase B
- ❖ Los sitios para disposición final serán los que disponga o permita la autoridad local competente
- ❖ Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la Norma podrán ser almacenados hasta por un periodo de 2 años. El predio en donde se almacenen, deberá contar con sistema de recolección de lixiviados
- ❖ Se permite la mezcla de dos o más lotes de lodos o biosólidos, siempre y cuando ninguno de ellos esté clasificado como residuo peligroso y su mezcla resultante cumpla con lo establecido en la presente Norma Oficial Mexicana

Finalmente la Norma establece las características de muestreo, análisis y los métodos de prueba para lodos y biosólidos

2. OBJETIVOS

1. Caracterizar las muestras de lodos residuales (crudos y estabilizados) de 18 plantas de tratamiento en diferentes localidades del país
2. Evaluar la calidad de 18 muestras de lodos residuales de diversas plantas de tratamiento del país, para determinar si cumplen con lo establecido en el proyecto de norma NOM-004 (análisis CRETl, metales pesados y microorganismos) y pueden ser aprovechados benéficamente
3. Evaluar el manejo de lodos residuales de 18 plantas de tratamiento del país

HIPÓTESIS

1. La estabilización de lodos permite producir biosólidos que cumplan con el proyecto de Norma NOM-004 para su aprovechamiento y disposición final

3. METODOLOGÍA

3.1. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS.

Para realizar el análisis de las muestras utilizadas en la caracterización de lodos residuales, se requirió que éstas provinieran del último proceso de tratamiento del lodo. En caso de que no se contara con el mismo se requirió que la muestra proviniera del sedimentador secundario o primario en su caso

Las muestras de las plantas de tratamiento que se encuentran fuera del Distrito Federal, fueron recibidas a través del servicio de paquetería. Las que se encuentran en la zona conurbada de la Ciudad de México, fueron obtenidas por personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Las muestras fueron obtenidas en recipientes de 1 litro desinfectados con cloro, lavados con agua potable a chorro y enjuagados con agua destilada. Para la conservación de las muestras durante su transporte al laboratorio, éstas fueron colocadas en hieleras con bolsas de hielo y fueron procesadas para las pruebas microbiológicas antes de 48 horas.

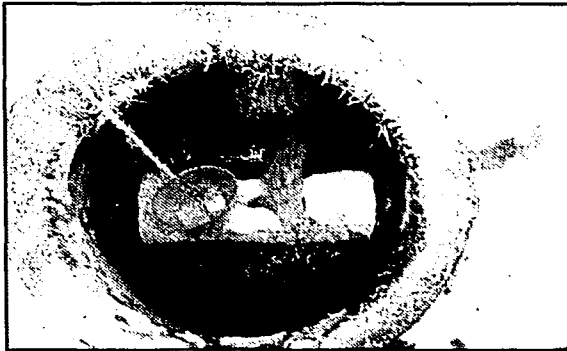


Figura 5 Obtención de muestras de lodo de una planta de tratamiento

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES.

Durante la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos residuales se evaluaron los parámetros que se observan en la Tabla 16

Tabla 16 Parámetros evaluados en la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las muestras de lodos analizadas

Parámetros	Unidades	Técnicas
Sólidos totales	%	Metodos Estandar 2540 B
Sólidos volátiles	%	Metodos Estandar 2540 E
Análisis CRÉTI		NOM-053-ECOL-1993
Metales pesados	mg/kg	EPA 6010
Coliformes fecales	NMP/ 4 g ST	Metodos Estandar 9221 A 1995
<i>Salmonella</i> spp	NMP/ 4 g ST	Metodos Estandar 9260 D 1992
Huevos de helmintos	HH / g ST	NOM-AA-113-SECOFI-1999

3.2.1. Sólidos totales.

Este parámetro permite medir la cantidad de materia seca en las muestras de lodos y fue determinado por el método gravimétrico referido en el Métodos Estándar, apartado 2540 B Este método se describe en el Anexo 1

3.2.2. Sólidos volátiles.

Este parámetro permite medir la cantidad de materia orgánica en las muestras de lodos y fue determinado por el método gravimétrico referido en el Métodos Estándar, apartado 2540 E Este método se describe en el Anexo 1

3.2.3. Análisis CRETI.

El análisis CRETI permite determinar si un lodo puede considerarse residuo peligroso o no mediante la determinación de la presencia de algunas de las siguientes características en los lodos: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad e inflamabilidad. Estas características son señaladas en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. El proyecto de norma NOM-004-ECOL obliga a realizar el análisis CRETI cada dos años para que los lodos puedan ser dispuestos o aprovechados. Para la realización del análisis de CRETI las muestras de lodo fueron enviadas a un laboratorio certificado. Este análisis se describe en el Anexo 2.

3.2.4. Metales pesados.

Para la realización del análisis de metales pesados, las muestras fueron enviadas a un laboratorio certificado (Laboratorios ABC). Los metales analizados fueron arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc, por ser los metales regulados en el proyecto de norma NOM-004-ECOL.

3.2.5. Coliformes fecales.

Este parámetro indica contaminación fecal en las muestras de lodos y fue determinado de acuerdo con la técnica de fermentación en tubos múltiples o Número Más Probable (NMP) referida en el Métodos Estándar, apartado 9221 A. Esta técnica se describe en el Anexo 3.

3.2.6. *Salmonella* spp.

Este parámetro indica la presencia de bacterias patógenas en las muestras de lodos y fue determinado por la técnica de tubos múltiples o Número Más Probable.

(NMP) referida en el Métodos Estándar, apartado 9260 D. Esta técnica se describe en el Anexo 4.

3.2.7. Huevos de helmintos.

Este parámetro nos indica la presencia de huevos de parásitos en las muestras de lodos y fue determinado por la técnica referida en la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-113-SECOFI-1999. Esta técnica se describe en el Anexo 5.



Figura 6. Centrifugación de muestras durante la técnica de huevos de helmintos

3.3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LODOS RESIDUALES.

Para la evaluación de la calidad de las muestras de lodos residuales analizadas se tomaron en cuenta los resultados en conjunto del análisis de metales pesados del análisis CRET1 y del contenido microbiológico que incluye coliformes fecales *Salmonella* spp y huevos de helmintos. De acuerdo con la calidad de las muestras, se determinó si son factibles de aprovecharse benéficamente conforme lo establecido en el proyecto de norma, NOM-004.

3.4. EVALUACIÓN DEL MANEJO DE LODOS RESIDUALES.

Para la evaluación del manejo de los lodos residuales se hicieron entrevistas dirigidas aplicando cuestionarios a los responsables de cada una de las plantas con el fin de obtener la siguiente información

En cuanto al tratamiento de aguas residuales

- ❖ Gasto de diseño
- ❖ Gasto de operación
- ❖ Tratamiento
- ❖ Disposición

En cuanto al tratamiento de lodos residuales

- ❖ Producción de lodos
- ❖ Porcentaje de sólidos totales y volátiles
- ❖ Tratamiento
- ❖ Disposición o aprovechamiento

Con esta información se calcularon porcentajes y se realizaron gráficos de generación, tratamiento, aprovechamiento y disposición de los lodos en las plantas analizadas

4.1.3. Niveles de contaminación en las regiones analizadas.

La mayoría de los estados donde se realizó el muestreo, se consideran zonas de contaminación crítica del agua. En la región donde se ubican el Estado de México, el Distrito Federal y Morelos, presenta extensa contaminación de cuencas y ríos, lo cual también se observa en la zona donde se ubica la ciudad de Monterrey. En el caso de Chihuahua, Durango y Guerrero se observa mayor contaminación de cuencas y algunos ríos contaminados (Fig. 8). En el caso de Aguascalientes solamente se observa contaminación de ríos (INEGI, 1999).

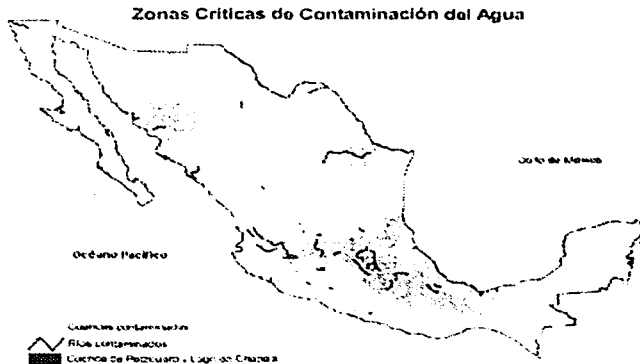


Figura 8 Zonas críticas de contaminación del agua en México (INEGI, 1999)

Algunas regiones, como el Distrito Federal y el estado de Nuevo León sobresalen por su aporte de aguas residuales municipales e industriales. Solamente en el Distrito Federal se genera un total de 1637 millones de m^3 de aguas residuales al año. Se calcula que del total de aguas residuales generadas en el país 57 % son generadas por las poblaciones localizadas en torno a las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara (SEMARNAP, 1999).

4.1.4. Gastos de operación.

La capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales fue un criterio importante en la selección de las mismas se eligieron plantas de tratamiento que sirvieran a grandes centros poblacionales y por lo tanto contarán con gastos de operación elevados. lo cual representa una generación constante de lodos residuales

Los estados donde se realizó el muestreo cuentan con los valores mas altos en cuanto a gastos de operación del país según datos del Inventario Nacional de Plantas Potabilizadoras y de Tratamiento de Aguas Residuales de la CNA. La Tabla 17 muestra que el gasto de operación total del estado de Nuevo Leon es el más alto a escala nacional ya que tratan 7123 L/s. cifra que representa el 15 % del total del país (CNA, 2000). También sobresale el Estado de Mexico (3952 L/s), Distrito Federal (2759 L/s), Durango (2058 L/s), Aguascalientes (1763 L/s), Guerrero (1459 L/s), Morelos (1037 L/s) y Quintana Roo (1011 L/s) los cuales representan los lugares 2, 5, 7, 10, 12, 14 y 16 respectivamente en cuanto a gastos de operación a escala nacional (CNA, 2000).

Tabla 17. Gastos de operación (L/s) en los estados donde se realizo el muestreo (CNA, 2000)

Estado	Gastos de operación (L/s)	Lugar a escala nacional	Porcentaje a escala nacional
Nuevo León	7123	1	15.5
Mexico	3952	2	8.6
D.F.	2759	5	6.0
Durango	2058	7	4.5
Aguascalientes	1763	10	3.8
Guerrero	1459	12	3.2
Morelos	1037	14	2.3
Quintana Roo	1011	16	2.2
Chihuahua	395	24	0.9

Los gastos de operación de las plantas residuales analizadas van de 28 a 4300 L/s. con un valor medio de 1045 L/s y se encuentran en los siguientes intervalos de 0 a 500 L/s se encuentran 9 plantas de 1000 a 1500 L/s se encuentran 4 plantas de 1500 a 2000 L/s se encuentran 3 plantas de 2000 a 2500 L/s se encuentra 1 planta al igual que en el intervalo mayor a 2500 (Fig. 9)

El gasto de operación total de las plantas de tratamiento analizadas es de 18803 L/s. lo cual representa un 40.9% del gasto de operación total a escala nacional considerando que el gasto total de operación total del país es de 45927 L/s (CNA 2000)

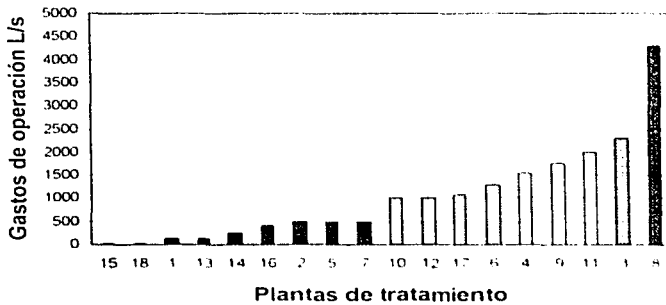


Figura 9. Gastos de operación (L/s) en las plantas de tratamiento

4.1.5. Producción de lodos residuales.

Una consideración fundamental en la elección de las plantas de tratamiento fue la generación constante de lodos residuales en las mismas

La Figura 10 muestra que los valores de lodos residuales generados en las plantas de tratamiento analizadas van de 0 a 81.1 toneladas de sólidos totales por día. con un valor medio de 16.4

Se toma en cuenta que las plantas de tratamiento analizadas generan un total de 108000 toneladas de lodos residuales al año, lo que representa un 48.2 % del total de lodos generados anualmente en el país, que para el año de 1997 se estimaba en 224000 toneladas de lodos (SEMARNAP, 1999)

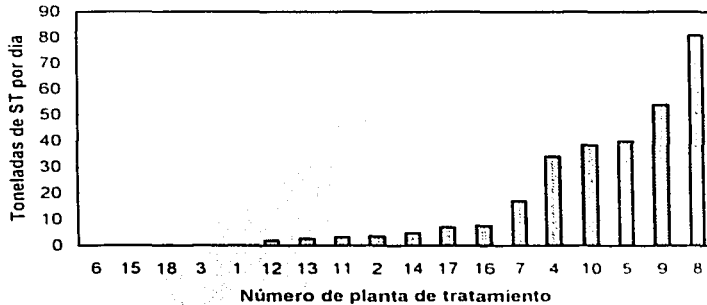


Figura 10. Producción de lodos residuales (Ton/día) en las plantas de tratamiento

4.1.6. Procesos de tratamiento de aguas residuales.

En el proceso de selección de las plantas de tratamiento se consideró importante elegir plantas que permitieran analizar los procesos de tratamiento de aguas residuales comúnmente empleados en el país

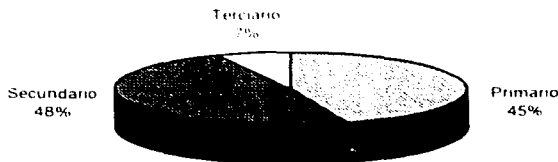


Figura 11. Tipos de tratamiento de aguas residuales en las plantas analizadas

La Tabla 18 muestra que 4 de las plantas analizadas aplican tratamiento primario avanzado. 5 aplican tratamiento secundario en el que se incluyen lodos activados filtros percoladores, lagunas aeradas y aireación extendida. 7 de las plantas aplican ambos tratamientos primarios y secundarios, mientras que únicamente 2 aplican tratamiento primario secundario y terciario utilizando filtros y procesos de nitrificación y desnitrificación en el tratamiento terciario. De acuerdo con estos datos, en 4 de las plantas analizadas se obtienen lodos primarios, en 12 plantas se obtienen lodos primarios y secundarios y solamente en 2 de las plantas se obtienen lodos químicos o terciarios (Fig. 11)

Tabla 18 Tratamiento de aguas residuales en las plantas analizadas

Planta	Pretratamiento	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario	Desinfección
1	3 Rejillas	2 Sedimentadores	2 Lodos activados		2 Cloración líquida
2	1 Rejilla 1 Desarenador	14 Sedimentadores	14 Sedimentadores 14 Lodos activados	32 Filtros	1 Cloración gaseosa
3	2 Rejillas	TPA			Cloración líquida
4	2 Rejillas 3 Desarenadores		3 Lagunas Aeradas		4 Cloración gaseosa
5	3 Rejillas 4 Rejillas finas	2 Sedimentadores	2 Filtro percolador		2 Cloración líquida
6	2 Rejillas gruesas 2 Desarenadores	TPA			2 Cloración gaseosa
7	2 Rejillas	TPA			2 Cloración gaseosa
8	2 Rejillas				2 Cloración gaseosa
9	2 Desarenadores	TPA			2 Cloración líquida
10	Rejillas 2 Rejillas 3 Desarenadores		Aeración extendida 3 Lodos activados		Cloración gaseosa 1 Cloración líquida
11	5 Rejillas 5 Desarenadores	5 Sedimentadores	5 Sedimentadores 5 Lodos activados		2 Cloración gaseosa
12	4 Rejillas Desarenadores	4 Sedimentadores 4 flotación	5 Lodos Activados		4 Cloración gaseosa
13	Rejillas y Desarenadores		Filtro percolador y Lodos activados		Cloración gaseosa
14	7 Rejillas 2 Desarenadores	4 Sedimentadores	4 Filtro percolador 4 Lodos activados		1 Cloración gaseosa
15	Rejillas	Desarenadores preaeración	Lodos activados	Nitrificación, desnitrificación	Cloración gaseosa
16			3 Lodos Activados 3 Filtros		Cloración gaseosa
17	4 Rejillas 2 Desarenadores	3 Sedimentadores	percoladores 3 Lodos Activados		Cloración gaseosa
18	5 Rejillas 8 Desarenadores		4 Lodos Activados		2 Cloración líquida

4.1.7. Procesos de tratamiento de lodos residuales.

Al igual que en los procesos de tratamiento de aguas residuales, se buscó que las plantas de tratamiento fueran representativas en cuanto a los procesos de tratamiento de lodos residuales que manejan, buscando los tratamientos comúnmente empleados en el país, como es el caso de los procesos de estabilización de las plantas analizadas en los que se incluyen estabilización alcalina, digestión aerobia y anaerobia (Tabla 19)

Aunque la mayoría de las plantas analizadas cuentan con procesos de tratamiento, se seleccionaron también plantas que no los manejan lo cual se considera importante para el análisis de lodos crudos

Tabla 19 Tratamiento de lodos residuales en las plantas analizadas

Planta	Espesamiento	Estabilización	Desaguado	Disposición
1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Drenaje
2	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Drenaje semptomático
3	1 Espesador	Ninguno	Ninguno	Drenaje
4	Ninguno	Ninguno	Ninguno	No hay datos
5	2 Espesadores	2 Estabilizadores con cal	Ninguno	Aplicación en suelo (líquido)
6	Ninguno	1 Estabilización con cal	2 Filtros banda	Relleno sanitario
7	Ninguno	1 Estabilización con cal	2 Filtros banda	Relleno sanitario
8	2 Espesadores	2 Estabilizadores con cal	2 Filtros banda	Relleno sanitario
9	Ninguno	Estabilización	Lechos de secado	Relleno superficial
10	3 Espesadores	3 Digestores anaerobicos	2 Filtros banda	Relleno sanitario
11	2 Espesadores	6 Digestores anaerobicos	6 Filtros banda	Relleno sanitario
12	3 Espesadores de banda			
13	4 Espesadores	4 Digestores anaerobicos	7 Filtros banda	Relleno sanitario
14	1 Espesador mecanico de banda	2 Digestores aerobicos	2 Filtros banda	Relleno superficial
15	2 Espesadores	2 Digestores aerobicos	4 Filtros banda	Aplicación en suelo (sólido)
16	Flotacion con aire	Digestión aerobia	Filtro de banda	Relleno sanitario
17	1 Espesador	1 Digestor aeróbico	2 Filtros banda	Relleno superficial
18	Con polimero	4 Digestores aerobicos	2 Filtros banda	Aplicación en suelo sólido y relleno superficial
19	2 Filtros espesadores	2 Digestores aerobicos	2 Filtros banda	Aplicación en suelo sólido y relleno superficial

4.1.8. Presencia de altos índices de enfermedades intestinales.

La presencia de altos índices de enfermedades intestinales en los estados donde se encuentran ubicadas las plantas de tratamiento analizadas fue determinante en la elección de las mismas (Tabla 20). Estos índices se pueden relacionar con varios factores, como pueden ser las condiciones climáticas, socioeconómicas y sanitarias.

Tabla 20 Índice de enfermedades intestinales en los estados en donde ubicadas las plantas de tratamiento analizadas
(Boletín de Epidemiología, SSA, 2000)

Estado	Enfermedades	Número de casos por 100,000 hab.	Porcentaje a escala nacional
Aguascalientes	Salmonelosis	86.9	2.7
	Fiebre tifoidea	18	0.6
	Helminthiasis	468.9	30.8
Chihuahua	Salmonelosis	208.2	6.5
	Fiebre tifoidea	18.4	6.2
	Helminthiasis	343.4	17.3
Distrito Federal	Salmonelosis	45.7	1.4
	Fiebre tifoidea	1.8	0.6
	Helminthiasis	72.4	4.7
Durango	Salmonelosis	12	0.4
	Fiebre tifoidea	9.3	3.2
	Helminthiasis	234.8	5
Estado de México	Salmonelosis	20.9	0.7
	Fiebre tifoidea	1.2	0.4
	Helminthiasis	748.5	5.9
Guerrero	Salmonelosis	87.7	2.7
	Fiebre tifoidea	13.5	4.6
	Helminthiasis	2202	20.1
Morelos	Salmonelosis	25.6	0.8
	Fiebre tifoidea	4.7	1.6
	Helminthiasis	1367.3	12
Nuevo León	Salmonelosis	125.0	3.9
	Fiebre tifoidea	16.6	8
	Helminthiasis	354.3	5.6
Quintana Roo	Salmonelosis	132.6	4.2
	Fiebre tifoidea	1.7	0.6
	Helminthiasis	2235	15.4

* Incluye los casos de Ascariasis, Teniasis, Cisticercosis y otras helmintiasis.

Otro factor importante puede ser la densidad poblacional, ya que entre los estados en donde se realizó el muestreo se encuentran los estados con mayor densidad poblacional de México. El Estado de México cuenta con la mayor densidad poblacional del país con un total de 13 096 686 habitantes, seguido por el Distrito Federal con un total de 8 605 239 habitantes. En el caso de los estados de Nuevo León, Guerrero y Chihuahua ocupan los lugares 9, 11 y 12 respectivamente en cuanto a número de habitantes a escala nacional (INEGI 2000).

Es importante resaltar que la mayoría de los estados donde se realizó el muestreo presentan altos porcentajes de helmintiasis. El estado de Aguascalientes presentó un porcentaje de 30.8 % de helmintiasis durante el año 2000, el estado de Guerrero presentó 20.1 %, Chihuahua 17.3 %, Quintana Roo 15 % y Morelos 12 % (tomando en cuenta 100,000 habitantes).

También es importante observar los índices de salmonelosis en los estados de Chihuahua, Quintana Roo y Nuevo León. En cuanto a número de casos de fiebre tifoidea es importante mencionar que los estados de Chihuahua, Guerrero y Nuevo León son los de mayor índice (Tabla 20).

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES.

4.2.1. Caracterización fisicoquímica.

4.2.1.1. Sólidos totales.

Las muestras analizadas indicaron porcentajes variables de sólidos totales (Fig. 12), los cuales fueron de 1 % en lodo crudo a 32 % en lodo estabilizado alcalinamente, presentando un valor medio de 17 %. Se observa que las muestras de lodo crudo presentaron la menor concentración de sólidos, donde las muestras provenientes de procesos biológicos mostraron concentraciones de 1 %, mientras que la muestra proveniente de un tratamiento primario avanzado (TPA) presentó

un valor de 4 %. En esta última muestra el contenido de sólidos esta dado por la dosis de coagulante así como por el tiempo de retención de los sólidos en el sedimentador lo cual permite su compactación. Únicamente la muestra de lodo crudo proveniente de la planta 4 presento un porcentaje de 20 % de sólidos debido a que proviene de una laguna de estabilización en la cual los sólidos permanecen un largo tiempo con lo cual se compacta el lodo en el fondo y se incrementa el contenido de sólidos totales.

Es importante mencionar que las muestras de lodo crudo se obtuvieron directamente de los procesos de tratamiento de agua, sin que recibieran ningún espesamiento adicional.

De las muestras de lodos estabilizados por varios procesos, los lodos provenientes de los procesos de digestión aerobia presentaron porcentajes de 15 a 20 %, debido principalmente a la dificultad para deshidratar este tipo de lodos por la naturaleza de la biomasa que lo conforma. Las dificultades de deshidratación de estos lodos se deben a la presencia de una fracción importante de coloides hidrófilos (Degremont, 1979) cuya afinidad por el agua, dificulta la separación de la fase sólida de la líquida.

Uno de los lodos provenientes del proceso de digestión anaerobia presento un porcentaje bajo de sólidos totales de 2 % ya que esta muestra fue recibida antes de ser sometida al proceso de deshidratación. Las dos muestras restantes provenientes de este proceso presentaron concentraciones de 23 y 24 %.

Los lodos provenientes del proceso de estabilización alcalina presentaron los porcentajes más altos de sólidos totales que fueron de 20 a 32 %. En este caso es importante mencionar que durante este proceso, se incrementa el porcentaje de sólidos por el aporte del material alcalino estando el valor final en función de la dosis de reactivo que se aplique.

De acuerdo con estos datos se puede observar que las muestras de lodo crudo presentaron un contenido de humedad muy alto, por lo que necesitan someterse a procesos de espesamiento y deshidratación con el objeto de reducir su volumen.

En cuanto a la mayoría de muestras provenientes de los procesos de digestión aerobia, anaerobia y estabilización alcalina, éstas presentaron porcentajes adecuados para los procesos subsecuentes de manejo, disposición y aprovechamiento de lodos en donde se presentaron los mayores porcentajes de sólidos en la mayoría de muestras provenientes de los procesos de digestión anaerobia y estabilización alcalina (Fig 12). Cabe mencionar que la sequedad de los lodos depende de diversos factores como el empleo de polímeros para el acondicionamiento, el origen del lodo (biológico, físico-químico, primario, etc.) y el tipo y la carga volumétrica de los equipos de deshidratación, entre otros.

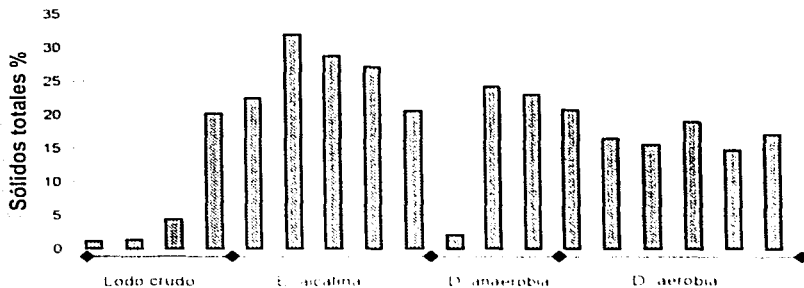


Figura 12 Porcentaje de sólidos totales en las muestras de lodos analizadas

En el proyecto de norma NOM-004-ECOL se hacen especificaciones con relación al porcentaje de sólidos en lodo. En cuanto al contenido de humedad, se especifica que en el aprovechamiento de biosólidos en sitios con contacto humano directo, el contenido de humedad debe ser del 70 % o menor. Por lo que en el caso de que algunos de estos lodos pudieran aprovecharse benéficamente, la

mayoría tendrían que optimizar su sequedad para este fin hasta alcanzar un porcentaje de sólidos totales de 30 %

4.2.1.2. Sólidos volátiles.

En las muestras analizadas los porcentajes de sólidos volátiles variaron de 8 % en lodo estabilizado alcalinamente a 72 % en lodo digerido aerobiamente presentando un valor medio de 54 % (Fig 13)

Las muestras de lodo crudo presentaron porcentajes variables de sólidos volátiles ya que dos muestras presentaron porcentajes bajos de 23 % y 29 % mientras que las otras dos presentaron porcentajes elevados de 66 % y 71 %. En el caso de la planta 4 (muestra con 29 % de sólidos) al provenir de un sistema de lagunas de estabilización hace que el lodo este en gran parte digerido debido a la actividad microbiana durante un periodo de almacenamiento prolongado lo que reduce el contenido de materia orgánica medida como sólidos volátiles. En el caso de la planta 1 (muestra con 23 % de sólidos) el proceso de tratamiento de agua consiste en un sistema de lodos activados de tipo aeración extendida en el cual los lodos permanecen en el sistema largo tiempo permitiendo un fenómeno similar al de la planta 4

Las muestras del proceso de estabilización alcalina presentaron porcentajes de 53% a 65 %. con excepción de una muestra la cual presentó un porcentaje de 8%. En esta muestra proveniente de la planta 5 existe una sobredosificación de cal la cual al estar constituida por sólidos inorgánicos (fijos) diluye el contenido de sólidos orgánicos reduciendo el porcentaje de sólidos volátiles lo cual se puede confirmar con el alto pH de la muestra (12.49)

Las muestras del proceso de digestión anaerobia presentaron porcentajes de 51% a 63 %. Estos valores coinciden con lo encontrado en la literatura del 62 % (WEF 1995) a pesar de carecer de sistemas de calentamiento que incrementen la

eficiencia en la conversión de materia orgánica a biogas. Por su parte las muestras de digestión aerobia presentaron los porcentajes más altos de sólidos volátiles, de 55 % a 72 % puesto que la reducción de este parametro es menor que en los procesos de digestión anaerobia (WEF 1995)

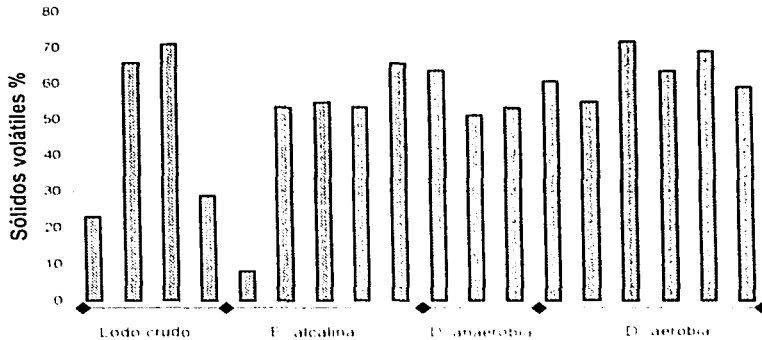


Figura 13 Porcentaje de sólidos volátiles en las muestras de lodos analizadas

En los datos se puede observar que la mayor parte de las muestras presentaron porcentajes elevados de sólidos volátiles. Lo que indica que las muestras analizadas contienen gran cantidad de materia orgánica lo cual es deseable desde el punto de vista del aprovechamiento ya que la materia orgánica en un lodo que es aprovechado benéficamente como mejorador de suelos puede tener un efecto positivo en las propiedades físicas del suelo (Girovich 1996). Además la materia orgánica permite la estabilización de los metales pesados en el suelo al mantenerlos secuestrados químicamente en complejos organo-minerales.

4.2.1.3. Análisis CRETÍ.

De los resultados del análisis CRETÍ (Tabla 21) se observó que éste no es una limitante para los lodos analizados, ya que 17 muestras se consideraron residuos

no peligrosos. y por lo tanto estos lodos pueden disponerse o aprovecharse benéficamente sin problemas de acuerdo con este criterio, siempre y cuando cumplan con los límites del proyecto de norma oficial mexicana NOM-004-ECOL.

Únicamente el lodo proveniente de la planta de tratamiento 11 presentó la característica de ser reactivo, debido a que excedió el límite de sulfuros liberables (500 mg/kg) presentando una concentración de 855.60 mg/kg. Por esta característica este lodo se considera residuo peligroso por lo que se descarta totalmente de ser aprovechado benéficamente o de ser dispuesto. Como residuo peligroso está sujeto a su disposición en un confinamiento controlado. En este caso, para disminuir la concentración de sulfuros y evitar la clasificación de estos lodos como residuos peligrosos, se deben aplicar o mejorar los programas de pretratamiento de descargas industriales que lleguen al sistema de drenaje.

Tabla 21 Resultados del análisis CRET1 en las muestras de lodos residuales analizadas

Característica	NOM-004	No. Planta																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Corrosividad	NO	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Reactividad	NO	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No	No
Explosividad	NO	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Toxicidad	NO	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Inflamabilidad	NO	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No

4.2.1.4. Metales pesados.

Del análisis de metales pesados, se puede observar que todas las muestras examinadas cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos en el proyecto de norma NOM-004-ECOL (Tabla 22)

De acuerdo con el contenido de metales pesados el 89 % de las muestras analizadas se consideraron de calidad excelente (plantas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)

10, 13, 14, 15, 16, 17 y 18), mientras que 11 % se consideraron de buena calidad (plantas 11 y 12)

Con base en el contenido de metales pesados los lodos de calidad excelente podrían aprovecharse benéficamente incluso en sitios con contacto público directo, siempre y cuando cumplan con los demás parámetros establecidos en el proyecto de norma, como son el análisis CRET1 y los límites de microorganismos para biosólidos Clase A. En el caso de los lodos de buena calidad podrían aprovecharse benéficamente como mejoradores de suelo o fertilizantes siempre y cuando cumplan con el análisis CRET1 y los límites de microorganismos para biosólidos Clase B (Ver pág. 45)

Tabla 22. Concentración de metales pesados (mg/kg) en las muestras de lodos residuales analizadas

Metal pesado	LMP Exc	LMP Buen	No. Planta																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Arsénico	41	75	*ND	0.1	0.1	10.0	1.4	2.8	2.0	1.8	0.8	0.5	1.5	1.4	0.4	4.0	ND	0.4	ND	1.1
Cadmio	39	85	ND	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	ND	0.3	1.5	0.8	0.5	ND	0.9	0.3	ND	0.3
Cromo	1200	3000	0.3	1.2	0.6	8.9	2.4	26.1	194.5	4.1	ND	3.4	328.2	232.7	7.0	22.3	50.9	3.7	14.2	3.4
Cobre	1500	4300	4.1	5.0	3.8	31.1	11.3	53.3	52.8	47.7	6.5	94.3	171.7	123.3	180.4	51.2	18.2	64.2	68.6	50.2
Plomo	300	840	1.0	1.7	1.0	33.2	3.3	18.6	8.5	21.5	ND	9.8	643.6	376.6	17.2	16.1	9.9	5.5	1.7	1.7
Mercurio	17	57	ND	ND	ND	0.7	ND	ND	ND	ND	0.1	0.1	6.4	1.4	0.3	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1
Níquel	420	420	0.2	0.6	0.4	3.6	1.4	2.8	36.1	2.9	ND	1.9	25.0	61.3	4.7	33.2	3.1	1.8	1.1	1.1
Zinc	2800	7500	5.8	19.5	10.3	127.8	19.5	220.8	144.2	102.3	17.8	152.2	2262.7	900.5	250.1	177.8	149.2	139.9	128.7	250.4

ND: No detectable

De acuerdo con estos resultados, los lodos analizados no representan riesgo para el medio ambiente ya que al entrar en el suelo los metales quedarían en la fracción inmóvil, por lo que no podrían ser biodisponibles. Sin embargo es importante destacar que este estudio es una primera aproximación a la calidad de los lodos y que es necesario realizar estudios posteriores que permitan confirmar que éstos no representan riesgo

Hay que tomar en cuenta que las muestras 11 y 12, las cuales se consideraron de calidad buena por exceder los límites de calidad excelente para plomo, pertenecen a plantas de tratamiento ubicadas en ciudades con un desarrollo industrial importante, y aun cuando existen programas de pretratamiento industrial, estos deben de ser reforzados, ya que el riesgo de presentar concentraciones que excedan los límites máximos permisibles existe y debe ser considerado.

4.2.2. Caracterización microbiológica.

Los coliformes fecales son comúnmente utilizados como indicadores de contaminación fecal en aguas residuales. Su uso en lodos y biosólidos usualmente indica la eficiencia de los procesos de tratamiento en la destrucción de bacterias, además regula la calidad de los biosólidos que pueden reusarse beneficiosamente.

Generalmente, también son indicadores de la concentración de *Salmonella* spp. bacterias que usualmente se relacionan con enfermedades gastrointestinales en humanos y por lo tanto, la reducción de coliformes fecales idealmente refleja un decremento en *Salmonella* spp.

Como se muestra en las Figuras 14, 15 y 16, las concentraciones de microorganismos están agrupadas por procesos de tratamiento de lodos, con el fin de visualizar mejor los resultados. El lodo crudo presentó concentraciones relativamente altas de coliformes fecales, aunque no tan altas como en reportes previos (Barrios *et al.*, 2001) e incluso una muestra cumplió con los límites para biosólidos clase B sin necesidad de un tratamiento posterior. Esta muestra corresponde al proceso de lagunas de estabilización aireadas donde los lodos se almacenan un tiempo considerable antes de ser dispuestos o aplicados, lo que permite un proceso de digestión en el que se reducen los niveles de coliformes fecales.

El 80 % de las muestras del proceso de estabilización alcalina presentaron concentraciones de coliformes que alcanzaron los límites clase A, con excepción

de la planta 9 en la cual el material adicionado al lodo disponible localmente no es tan básico como la cal cruda o hidratada por lo cual los biosólidos alcanzan únicamente un pH de 6.94. Ha sido demostrado (Farell *et al.* 1974, Jimenez *et al.* 2000) que el pH tiene un efecto directo en bacterias patógenas e indicadoras cuando se utiliza el proceso de estabilización alcalina y se pueden reducir varios órdenes de magnitud cuando se opera de manera apropiada.

Las muestras de biosólidos del proceso de digestión anaerobia no alcanzaron los límites clase B en dos de las tres plantas analizadas, por lo que estos lodos no son apropiados para su reúso. Usualmente la digestión anaerobia mesofílica reduce pocas unidades logarítmicas de coliformes fecales y *Salmonella* spp. por lo que este proceso de tratamiento presenta limitaciones cuando se estabiliza lodo con alto contenido de estos microorganismos. Se puede observar que la densidad de coliformes fecales en los biosólidos digeridos anaerobiamente son similares a los encontrados en lodos crudos. Un paso adicional al proceso de estabilización podría ser útil para reducir estos niveles si se planea su reutilización o bien la modificación de las condiciones de operación, como la temperatura o el tiempo de retención que podrían mejorar la remoción.

De los biosólidos digeridos aerobiamente únicamente los de la planta 17 alcanzaron los límites clase B, dejando a las 4 plantas restantes sin posibilidad de reusar los biosólidos en aplicaciones benéficas. Algunas investigaciones indican que se requieren tiempos de retención extendidos para reducir significativamente la densidad de microorganismos limitando la aplicabilidad de estos procesos en lodos con concentraciones elevadas de bacterias (Pedersen 1983). Se podrían obtener reducciones posteriores con la adición de procesos de estabilización complementarios (p.ej. estabilización alcalina en bajas dosis) sin embargo el costo adicional debe ser evaluado en cada caso para determinar su viabilidad. La muestra de la planta 14 fue analizada después de varios días de almacenamiento en el laboratorio por lo que los valores de esta muestra no se reportaron para ningún parámetro microbiológico.

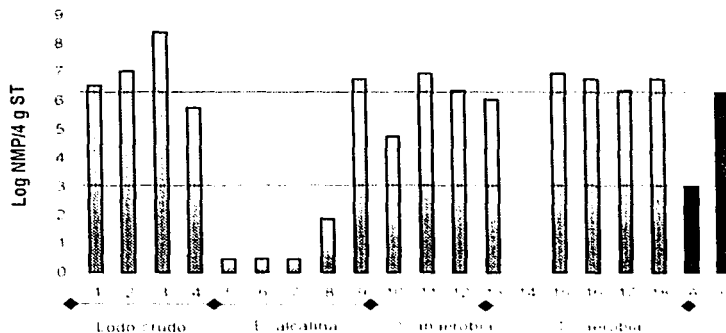


Figura 14 Concentración de coliformes fecales en las muestras analizadas

Comparando las Figuras 14 y 15, se puede observar que los niveles de *Salmonella* spp generalmente están 1 o 2 unidades logarítmicas por debajo de coliformes fecales, con excepción de las muestras que se acercan o que alcanzan el límite de detección. Si se observa que el límite de *Salmonella* spp en biosólidos clase B, es de 3.8 unidades logarítmicas menor que el límite para coliformes fecales (3×10^2 vs 2×10^6 NMP/g ST) esto indica que para cumplir con los límites, los niveles de bacterias indicadoras deben reducirse aproximadamente a 10^4 NMP/g ST para alcanzar los límites clase B, lo cual sugiere que los límites para *Salmonella* spp necesitan ser revisados.

La Figura 15 muestra que únicamente el proceso de estabilización alcalina cumplió con los límites propuestos, no solamente para biosólidos clase B sino también para clase A, con excepción de la planta 9, lo cual fue explicado anteriormente. El resto de las muestras, provenientes de los procesos de digestión aerobia y anaerobia, no cumplen con los niveles de *Salmonella* spp propuestos en el proyecto de norma, manteniendo concentraciones similares a las de lodo crudo.

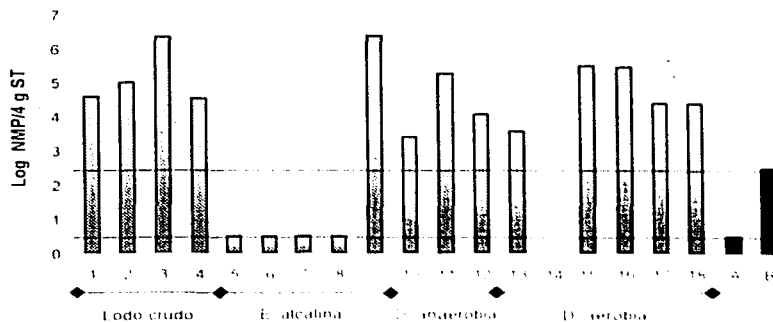


Figura 15 Concentración de *Salmonella* spp. en las muestras de lodos residuales analizadas

Los huevos de helmintos presentan un reto adicional para los procesos de tratamiento de lodos debido a que éstos son mucho más resistentes a cambios en los factores ambientales los cuales son estresantes para otros microorganismos particularmente el genero *Ascaris* que corresponde al 84 % de huevos encontrados. Varios autores indican que de los procesos convencionales únicamente los que aplican temperaturas altas de aproximadamente 50 °C (digestión termofílica -aerobia o anaerobia- y composteo) o estabilización alcalina reducen la densidad y la viabilidad de diferentes huevos de helmintos (Carrington and Harman, 1984, Kiff and Lewis-Jones, 1984, Morris *et al*, 1986, Pike *et al*, 1989).

De acuerdo con la Figura 16 la mayor concentración de huevos de helmintos en lodo crudo proviene del tratamiento primario avanzado (TPA) en el que se utiliza sulfato de aluminio para la coagulación (planta 3). Este proceso se enfoca en la remoción de los sólidos suspendidos del agua residual ya que estos incluyen a los huevos de helmintos, por lo que la concentración de los mismos generalmente es mayor que en otros procesos. Ha sido demostrado que la remoción de huevos de helmintos en los procesos de TPA puede alcanzar 97 % (Jimenez *et al*, 1999).

Por otra parte, los biosólidos tratados con cal tienen menos de 35 huevos/g ST con excepción de la planta 8 la cual dispone los biosólidos en rellenos sanitarios por lo que no adicionan suficiente cal hasta alcanzar un pH de 12 unidades resultando en un producto con un pH menor a 10 y una alta concentración de huevos que incluso no cumple con los límites clase B. Es interesante observar que la planta 5 produce biosólidos con huevos de helmintos no viables coliformes fecales y *Salmonella* spp. bajo los límites de detección demostrando la efectividad de la cal para reducir el contenido microbiológico en el lodo.

El proceso de digestión aerobia contrariamente a lo que establece la literatura produce un lodo que cumple con el criterio clase B para este parámetro.

Obviamente, los datos de lodo crudo en cada planta deben ser valorados para determinar la eficiencia de los procesos de estabilización para cada parámetro lo cual sugiere que se deben desarrollar estudios adicionales. Los biosólidos provenientes del proceso de digestión anaerobia cumplieron con los límites clase B en dos de las tres muestras, con excepción de la planta 10, reduciendo la posibilidad de aplicar éstos biosólidos a menos que el tratamiento sea mejorado.

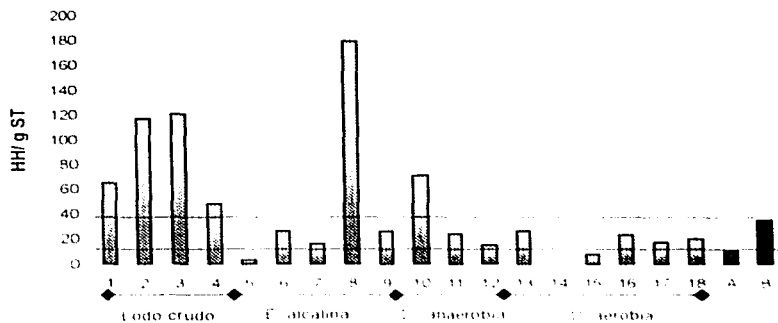


Figura 16 Concentración de huevos de helmintos (HH) totales en las muestras de lodos residuales analizadas

Es importante mencionar que el amoníaco es tóxico para los huevos de helmintos pero se presenta únicamente con valores de pH elevados y generalmente no se encuentra en los digestores anaerobios.

A pesar de que algunas muestras cumplieron con los límites clase B para huevos de helmintos en biosólidos, los lodos digeridos aerobios y anaerobios no alcanzaron los límites para *Salmonella* spp. y en algunas muestras producidas por estos procesos, incluso no cumplieron los estándares para coliformes fecales.

Este hecho debe tomarse en cuenta para permitir el correcto reuso o disposición de los biosólidos, reduciendo el riesgo a la salud y al ambiente. Es necesario mejorar las condiciones de operación en los procesos para reducir eficientemente los parámetros microbiológicos para permitir el cumplimiento con los estándares.

Además, los lodos clase A, como se definen en la regulación propuesta, no deben ser aplicados en sitios con contacto público directo debido al alto potencial de contaminación de huevos de helmintos. Se debe observar que menos de 10 huevos/g ST en biosólidos podrían ser una pequeña cantidad pero una vez que un bajo porcentaje de biosólidos es aplicado en sitios sin restricción, el número de huevos por metro cuadrado podría ser muy alto (10 ton secas/ha podrían aportar 5.9×10^3 huevos viables/m²) amenazando la aceptación de estas prácticas. Una alternativa podría ser regular inicialmente la aplicación de biosólidos únicamente en suelos agrícolas y en sitios en restauración con acceso restringido, como zonas mineras agotadas, requiriendo un producto clase B. En un futuro, una vez que el contenido microbiológico sea reducido o los procesos de tratamiento mejorados, el estatus clase A podría ser incluido en la regulación.

4.3. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS.

Tomando en cuenta el resultado de los análisis de metales pesados, CRET1 y microorganismos patógenos e indicadores en conjunto, se comprobó que el

principal factor que afecta la calidad de las muestras de lodo es el contenido microbiológico, mientras que el contenido de metales pesados y el análisis CRETI no representan problemas en la calidad de las muestras de lodo cuando estas provienen de plantas con poca contribución industrial (Tabla 23)

Tabla 23 Calidad de las muestras analizadas

Plantas	Tipo de lodo	Calidad de lodos*		
		Metales	CRETI	Microorganismos
1	Lodo crudo	Excelente	No peligroso	Deficiente
2	Lodo crudo	Excelente	No peligroso	Deficiente
3	Lodo crudo	Excelente	No peligroso	Deficiente
4	Lodo crudo	Excelente	No peligroso	Deficiente
5	Estabilizado alcalinamente	Excelente	No peligroso	Clase A
6	Estabilizado alcalinamente	Excelente	No peligroso	Clase B
7	Estabilizado alcalinamente	Excelente	No peligroso	Clase B
8	Estabilizado alcalinamente	Excelente	No peligroso	Deficiente
9	Estabilizado alcalinamente	Excelente	No peligroso	Deficiente
10	Digerido anaerobiamente	Excelente	No peligroso	Deficiente
11	Digerido anaerobiamente	Bueno	Reactivo	Deficiente
12	Digerido anaerobiamente	Bueno	No peligroso	Deficiente
13	Digerido aerobiamente	Excelente	No peligroso	Deficiente
14	Digerido aerobiamente	Excelente	No peligroso	NE
15	Digerido aerobiamente	Excelente	No peligroso	Deficiente
16	Digerido aerobiamente	Excelente	No peligroso	Deficiente
17	Digerido aerobiamente	Excelente	No peligroso	Deficiente
18	Digerido aerobiamente	Excelente	No peligroso	Deficiente

* El termino deficiente se refiere a que la muestra sobrepasa los limites maximos permisibles establecidos en el proyecto de norma NOM-004
 * NE no examinado

De acuerdo con estos resultados, los únicos lodos que son factibles de aprovecharse benéficamente son las muestras 5, 6 y 7. La muestra 5 se considera residuo no peligroso, de calidad excelente en cuanto al contenido de metales pesados, clase A de acuerdo con el contenido de microorganismos patógenos e indicadores, por lo que puede aprovecharse benéficamente, sin restricciones incluso en sitios en donde exista contacto público directo ya que de los 3 huevos de helmintos reportados, ninguno presentó viabilidad. Sin embargo es necesario mencionar que no todos los lodos clase A con respecto a microorganismos se consideran seguros para aplicarse en sitios con contacto público puesto que

pueden tener hasta 10 huevos de helmintos de acuerdo con la norma y un alto porcentaje de ellos puede ser viable, con lo cual el riesgo de infección permanece en este tipo de lodos, ya que 1 sólo huevo viable de parásitos como *Ascaris lumbricoides* puede causar infección en humanos

Las muestras 6 y 7 se pueden considerar residuos no peligrosos de calidad excelente, clase B siendo factibles de aprovecharse benéficamente

Las 14 muestras restantes no pueden disponerse ni aprovecharse benéficamente por exceder los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos y la muestra 11 adicionalmente por ser reactiva

4.4. MANEJO DE LODOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO.

4.4.1. Tratamiento de lodos residuales en las plantas analizadas.

De la información proporcionada por las plantas de tratamiento, se obtuvo que del total de las plantas de tratamiento analizadas, 4 no aplican ningún tipo de tratamiento a los lodos que generan, lo que representa un total de 6 ton de lodos no tratados al día (Fig 17) Esta situación resulta preocupante debido a que los lodos crudos con el alto contenido de microorganismos representan un riesgo a la salud humana y al medio ambiente. De acuerdo con esta problemática es de vital importancia el establecimiento de medidas que obliguen a todas las plantas a tratar sus residuos, en este caso los lodos y a disponerlos o aprovecharlos de manera adecuada

Del total de lodos generados en las plantas de tratamiento analizadas (304 ton/día) se reportó que la mayor parte son estabilizados mediante procesos de digestión, ya que 155.6 ton/día (51%) son tratadas mediante digestión anaerobia y 65 ton/día (22%) mediante digestión aerobia mientras que 76 ton (25%) son tratadas por el proceso de estabilización alcalina (Fig 17) Sin embargo el proceso de estabilización alcalina debe contemplarse como una opción para reducir significativamente el contenido microbiológico de los lodos en México

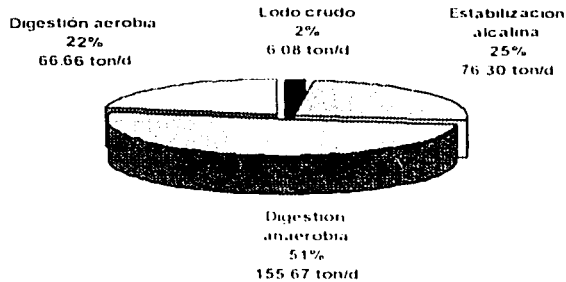


Figura 17. Tratamiento y generación de lodos residuales en las plantas analizadas de acuerdo con el proceso de estabilización

La calidad microbiológica deficiente de las muestras analizadas en este estudio podría atribuirse a que los métodos de estabilización aplicados en las plantas no son los más adecuados de acuerdo con las características de los lodos sobre todo debido al alto contenido microbiológico o bien a que las condiciones de operación o diseño del proceso no sean las adecuadas. Consecuentemente es necesario el establecimiento de procesos que se enfoquen principalmente en la reducción o inactivación del contenido microbiológico que permitan la obtención de lodos con mejor calidad de manera que puedan ser dispuestos y sobre todo que permitan enfatizar el aprovechamiento benéfico el cual es la mejor opción para cuidar el ambiente.

Es importante mencionar que de los tratamientos aplicados en las plantas analizadas, el método de estabilización alcalina en la mayoría de los casos permitió obtener lodos de calidad adecuada para el aprovechamiento benéfico.

4.4.2. Disposición y aprovechamiento de lodos en las plantas analizadas.

El destino final de la mayor parte de los lodos generados en las plantas de tratamiento analizadas es la disposición ya que 231 ton/día de lodos (76 %) son dispuestos en rellenos sanitarios los cuales son sitios adecuados para esta actividad. Sin embargo, 6 ton de lodos generados en las plantas analizadas son vertidos en el drenaje diariamente (Fig. 18)

En cuanto al aprovechamiento benéfico, sólo el 22 % de los lodos generados en las plantas analizadas utilizan a los lodos como mejoradores de suelo o como cubierta de rellenos superficiales, lo cual representa un total de 67 ton de lodos aprovechados por día (Fig. 19)

De acuerdo con los datos de calidad de lodos de las muestras analizadas en este estudio, se puede decir que el destino final de estos lodos no es el adecuado debido a lo siguiente

- Se reportó que en las plantas 1, 2, 3 y 4 no se da ningún tratamiento a los lodos, por lo que son vertidos al drenaje, lo cual resulta preocupante debido a la gran cantidad de microorganismos patógenos presentes en el lodo. Si consideramos que solo un 24 % del total del agua residual es tratada en nuestro país, éstos patógenos finalmente representarán un riesgo ya que retornarán al medio ambiente, ya sea en cuerpos de agua o en caso de que lleguen a la porción de aguas residuales que es tratada, concentrándose nuevamente en los lodos
- De los lodos provenientes del proceso de estabilización alcalina, solamente el de la planta 5 es aprovechado de manera adecuada, ya que de acuerdo con su calidad (Excelente, clase A) es utilizado benéficamente en suelo

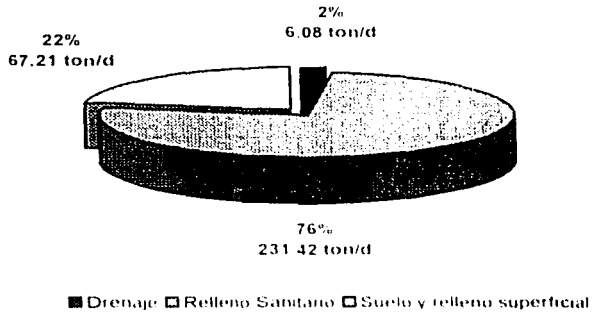


Figura 18. Disposición y aprovechamiento de lodos residuales en las plantas analizadas

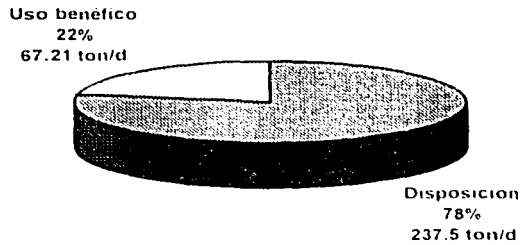


Figura 19. Porcentaje de disposición y aprovechamiento de los lodos residuales analizados

- Los lodos producidos en las plantas 6 y 7 son dispuestos en rellenos sanitarios por lo que éstos lodos no son manejados de manera adecuada ya que de acuerdo con su calidad (Excelente, clase B) lo más apropiado sería aprovecharlos benéficamente como mejoradores de suelo o fertilizantes
- Los lodos de las plantas 8, 10, 11, 12 y 15 son dispuestos en rellenos sanitarios lo cual es inadecuado ya que de acuerdo con lo establecido en el proyecto de norma por exceder los límites de microorganismos patógenos y por presentar adicionalmente reactividad (planta 11) estos lodos no pueden ser dispuestos o aprovechados
- Para los lodos de las plantas 17 y 18 la situación es preocupante debido a que estas muestras contienen una gran cantidad de patógenos y sin embargo están siendo aprovechados benéficamente en suelos y en rellenos superficiales
- En relación con esta problemática, se puede explicar que no solamente es necesario mejorar los métodos de estabilización que están siendo aplicados en las plantas de tratamiento, sino también resulta necesario establecer estrategias de manejo que permitan que el destino final de los lodos sea el más adecuado de acuerdo con su calidad
- Tomando en cuenta que en las 18 plantas de tratamiento analizadas se generan un total de 296 ton de lodos diariamente, lo cual equivale a un total de 108000 ton al año se considera muy importante darles un manejo adecuado a estos lodos ya que pueden representar un importante beneficio para la agricultura o la restauración de suelos

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

5. CONCLUSIONES.

- La mayoría de muestras de lodos residuales analizadas se consideraron residuos no peligrosos de acuerdo con el análisis CRET1 ya que únicamente una muestra se considero reactiva por lo cual prácticamente se puede asegurar que los lodos residuales municipales no son residuos peligrosos, siempre y cuando no exista contribución importante de aguas residuales industriales
- La cantidad de metales pesados no afectó la calidad de las muestras de lodos residuales analizadas, por lo que este factor no se considero una limitante para su disposición o aprovechamiento
- 14 de las 18 muestras de lodos residuales analizadas excedieron en el número de microorganismos patógenos e indicadores de acuerdo con los límites establecidos en el proyecto de norma, por lo que se considera el principal problema que afecta la calidad de los lodos residuales, para su disposición o aprovechamiento
- Tomando en cuenta el contenido de metales pesados, analisis CRET1 y el contenido microbiológico, se determinó que únicamente 3 de los 18 lodos analizados cumplieron con la calidad determinada en el proyecto de norma NOM-004 por lo que únicamente éstos pueden ser aprovechados benéficamente
- De acuerdo con la deficiente calidad de los lodos observada (77 % del total), es importante mencionar que se requiere establecer tratamientos adecuados a las características de los lodos de México, además de mejorar la operación de los ya existentes. Principalmente es importante considerar tratamientos que reduzcan el alto contenido microbiológico

- Con base en la calidad de los lodos analizados y la información del manejo de los mismos, se determinó que solamente 1 de las muestras se aprovecha de manera adecuada (5 % del total) por lo que es necesario el establecimiento de prácticas de manejo de lodos de acuerdo con la calidad de los mismos

5. RECOMENDACIONES

Dentro de las especificaciones del proyecto de norma es necesario revisar la utilización de biosólidos Clase A en sitios con contacto público directo ya que el contenido de parásitos (10 huevos/g ST) en estos biosólidos podría implicar riesgo a la salud humana ya que 1 sólo huevo viable de parásitos como *Ascaris lumbricoides* puede causar infección en humanos

Es necesario realizar estudios de esta índole en otras regiones relevantes del país en cuanto a producción y manejo de lodos residuales. Mediante la obtención de esta información se puede obtener un esquema general de la situación de manejo de lodos en México y se puede determinar si este manejo está siendo adecuado con las prácticas que preservan la salud humana y el medio ambiente

La información de manejo de lodos a escala nacional puede servir como base a posteriores investigaciones en el desarrollo de procesos de tratamiento que sean adecuados a las características de los lodos que se producen en el país principalmente al alto contenido microbiológico. Por medio del desarrollo de dichos procesos, se pueden obtener lodos de mejor calidad que pueden ser dispuestos y aprovechados sin riesgos

Esta información sería importante, para hacer más eficientes los procesos de tratamiento de lodos residuales y para establecer prácticas de disposición y sobre todo de aprovechamiento adecuadas de acuerdo con la calidad de los lodos generados en el país

LITERATURA CITADA

- 1 Andreoli C V, De Lara A I, Fernández F (1999) *Reciclagem de biosólidos transformando problemas em soluções* Sanepar Parana Brasil 288 pp
- 2 Barrios J A, Jiménez B, Rodríguez A, González A y Maya C (2000) *Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos fisicoquímicos por vía ácida* Memorias XII Congreso Nacional 2000 FEMISCA AIDIS Morelia, Mich. Mexico Año 1 No 1 Tomo 1 913 pp
- 3 Barrios J A, Jiménez B, Rodríguez A, González A and Maya C (2001) *Application of peracetic acid to physicochemical sludge to reduce its microbial content* Proceedings Aqua Enviro/CIWEM 6th European and Organic Residuals Conference Volume 1 Aqua Enviro Wakefield United Kingdom Nov 2001 ISBN 0 9539679-3-X
- 4 Bitton G (1994) *Wastewater microbiology* Wiley-Liss New York 478 pp
- 5 Bontoux L, Vega M, Papametiou D (2000) *Tratamiento de las aguas residuales urbanas en Europa el problema de los lodos* IPTS En <http://www.ipres/> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 6 Cardoso L (1993) *Elaboracion de composta a partir de lodos residuales* Maestria en Ciencias Edafologia Facultad de Ciencias UNAM Mexico 138 pp
- 7 Carrington E G y Harman S A (1984) *The effect of anaerobic digestion temperature and retention period on the survival of Salmonella and Ascaris ova* En Bruce A Sewage sludge stabilization and disinfection Ellis Horwood Limited UK 369-380 pp
- 8 CNA (1999) Estadísticas del medio ambiente. Estadísticas e indicadores selectos Agua en <http://www.semarnat.gob.mx/> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 9 CNA (2000) Estadísticas del medio ambiente. Estadísticas e indicadores selectos Agua en <http://www.semarnat.gob.mx/> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 10 Degremont G (1979) *Manual técnico del agua* Degremont Bilbao 1216 pp
- 11 DOF *Norma Oficial Mexicana (NOM-052-ECOL-1993)*
- 12 DOF *Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996)*
- 13 EPA (1999a) *Biosolids, generation, use, and disposal in the United States* Environmental Protection Agency Estados Unidos 81 pp
- 14 EPA (1999b) *Sewage sludge pathogens* Environmental Protection Agency Washington D.C
- 15 Farrell J B, Smith J E, Hathaway S W y Dean R B (1974) *Lime stabilisation of primary sludges* J. Water Pollution Control Federation 46 (1) 113-122
- 16 Girovich M J (1996) *Biosolids treatment and management* New York Estados Unidos 453 pp

- 17 Guzmán A (1996) *Caracterización de lodos residuales generados en las plantas de tratamiento de agua en la industria farmacéutica productora de betalactámicos* Tesis de Licenciatura FES Zaragoza UNAM Mexico 114 pp
- 18 Hall J (2000) *Sludge management in developing countries* In Lowe P and Hudson J A 5th European biosolids and organic residuals conference Proceedings of the Joint CIWEM Aqua Enviro Consultancy Services Vol 1 Aqua Enviro Consultancy Services UK Seminar 1- Paper 3
- 19 Hellstrom T (2000) *Los biosólidos y su aceptación en Suecia* In *Ingeniería y ciencias ambientales* FEMISCA AIDIS Año 12 Num 46 enero-febrero 2000 6-10 pp
- 20 Henry J G Heinke G W (1999) *Ingeniería ambiental* Prentice Hall 2a Ed Mexico 778 pp
- 21 Horan N (2000) *The survival of pathogens in sewage sludge* In Lowe P and Hudson J A 5th European biosolids and organic residuals conference Proceedings of the Joint CIWEM Aqua Enviro Consultancy Services Vol 1 Aqua Enviro Consultancy Services UK Seminar 1- Paper 3
- 22 INEGI SSA/DGE (1998) Secretaría de salud Dirección general de información en <http://www.ssa.gob.mx>
- 23 INEGI (2000) Estadísticas sociodemográficas de mediano plazo en <http://www.inegi.gob.mx> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 24 INE-Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (1994) *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente* 1993-1994 Mexico 108 128 pp
- 25 ISO (1998) *Water quality detection and enumeration of bacteriophages* International Organization for Standardization 1-17 pp
- 26 Jepsen S E Krause M Gruttner H (1997) *Reduction of fecal streptococcus and salmonella by selected treatment methods for sludge and organic waste* Water Science and Technology 36 (11) 203-210 pp
- 27 Jiménez B (2001) *La contaminación ambiental en México causas efectos y tecnología apropiada* Limusa Mexico 926 pp
- 28 Jimenez B Barrios J A 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 (9) 103-110
- 29 Jimenez B Chávez A y Hernandez C (1999) *Alternative treatment for wastewater destined for agricultural use* Water Science and Technology 40 (4-5) 355-362
- 30 Kiff R J and Lewis-Jones R (1984) *Factors that govern the survival of selected parasites in sewage sludges* In Bruce A M Sewage sludge stabilization and disinfection Ellis Horwood Limited 426-439 pp
- 31 Leschber R et al (1998) *Developments in sludge characterisation in Europe* Water Science and Technology 38 (2) 1-7
- 32 Lue-Hing C Zenz D R and Kuchenrither R (1998) *Municipal sewage sludge management a reference text on processing, utilisation and disposal* Technomic Publishing Company Pennsylvania Vol 4
- 33 Matthews P (1996) *A global atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal* IAWQ Chameleon Press Inglaterra 197 pp

- 34 Metcalf & Eddy (1981) *Tratamiento y depuración de las aguas residuales* Editorial Labor Barcelona 837 pp
- 35 Metcalf & Eddy (1991) *Wastewater engineering treatment, disposal and reuse* McGraw-Hill New York 1334 pp
- 36 Metcalf & Eddy (1996) *Ingeniería de aguas residuales Redes de alcantarillado y bombeo* McGraw-Hill México 461 pp
- 37 Meyers R A (1998) *Enciclopedia of environmental analysis and remediation* John Wiley & Sons Estados Unidos 769-813 pp
- 38 Miyazawa M (1999) *Efeito do lodo de esgoto nos teores de metais pesados no solo e na planta* In Cleverson V et al *Reciclagem de Biossólidos transformando problemas em Soluções* Sanepar Parana Brasil
- 39 Morris D L, Hughes D L, Hewitt R J y Norrington I J (1986) *Pathogens in sewage sludge* In *Effects of sludge stabilization and treatment processes on viability and infectivity of beef tapeworm eggs* Journal of the Institute of Water Pollution Control 85 (4) 476-481
- 40 NRC (1996) *Use of reclaimed water and sludge in food crop production* National Research Council National Academic Press Washington D C 73 pp
- 41 Ocampo G G. (1992) *La omnipresencia de las helmintiasis* Salud Publica de México Vol 34 357-360 pp
- 42 Ortiz M (1994) *Caracterización y propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de Civac estado de Morelos* Maestría en Ciencias Edafología Facultad de Ciencias UNAM México 146 pp
- 43 Pedersen D C (1983) *Effectiveness of sludge treatment processes in reducing levels of bacteria, viruses and parasites* In Wallis P M and Lehman D L *Biological health risks of sludge disposal to land in cold climates* University of Calgary Press Calgary Canadá 9-31 pp
- 44 Pike E B, Carrington E G and Harman (1988) *Destruction of salmonellas, enterovirus and ova of parasites in wastewater sludge by pasteurization and anaerobic digestion* Water Science and Technology 20 (11/12) 337-343
- 45 Prescott (1999) *Microbiology* McGraw-Hill Estados Unidos 962 pp
- 46 Reimers R S, Mc Donell D B, Little M D, Bowinan D D, Englande A J, Henriques W D, and Jr (1986) *Effectiveness of wastewater sludge treatment processes to inactivate parasites* Water Science and Technology 18 197-404
- 47 SEMARNAP (1999) Estadísticas del medio ambiente Estadísticas e indicadores selectos En <http://www.semarnat.gob.mx> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 48 SEMARNAP-CNA Agua (1999) Estadísticas del medio ambiente Estadísticas e indicadores selectos En <http://www.semarnat.gob.mx> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 49 SEMARNAP-INE (1999) Estadísticas del medio ambiente Estadísticas e indicadores selectos Residuos En <http://www.semarnat.gob.mx> Actualización 18 de septiembre de 2002

- 50 SEMARNAT 2001 Estadísticas del medio ambiente Estadísticas e indicadores selectos En <http://www.semarnat.gob.mx> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 51 Silva A E Martínez P (2000) *Determinación de huevos de helmintos en la operaciones unitarias de la planta de tratamiento de aguas residuales Chapultepec* Memorias XII Congreso Nacional 2000 FEMISCA AIDIS Morelia Mich México Año 1 No 1 Tomo 1 913 pp
- 52 SSA (2000) *Boletín de Epidemiología* Dirección General de Epidemiología Semana 52 México 31 pp
- 53 Upton S J (2001) *Parasitology Laboratory* Division of biology Kansas State University En <http://www.ksu.edu/parasitology/625tutorials/> Actualización 18 de septiembre de 2002
- 54 Vargas I. (2000) *Apuntes de la clase de parasitología molecular* Facultad de Ciencias UNAM
- 55 Vesilind P Hartman G C Skene E T (1988) *Sludge management and disposal* Lewis Publishers Michigan 545 pp
- 56 Wang M J (1997) *Land application of sewage sludge in China* The Science of the Total Environment 197 149-160
- 57 Watanabe H Tomokazu K Ochi S and Ozaki M (1997) *Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions* Water Science and Technology 36 (6-7) 25-32
- 58 Water Environment Federation (WEF) (1992) *Design of municipal wastewater treatment plants Manual of practice* WEF Nueva York
- 59 Water Environment Federation (1995) *Wastewater residuals stabilization Manual of practice* WEF Alexandria, Va Estados Unidos 244 pp
- 60 Wellcome Trust (WT) (1998) *Diarrhoeal diseases* Topics in International Health

ANEXO 1. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES.

1. Determinación del porcentaje de sólidos totales.

1.1 Procedimiento

- Preparar una cápsula de evaporación a peso constante en una estufa a 105 °C por 24 horas
- Posteriormente dejarla enfriar en el desecador por un periodo de 30 minutos. Pesar la cápsula obteniendo el peso 1 (P1)
- Agregar una alícuota no menor de 5 g de muestra
- Pesar la cápsula con la muestra para obtener el peso 2 (P2)
- Introducir la cápsula en la estufa a 105 °C durante 24 horas hasta la evaporación total del agua
- Después retirar la cápsula y dejarla enfriar en el desecador por espacio de 30 minutos y pesarla para obtener el peso 3 (P3)

1.2 Cálculos

Con los pesos obtenidos aplicar la siguiente fórmula

$$\% \text{ Sólidos totales} = \frac{P3 - P1}{P2 - P1} \times 100$$

2. Determinación del porcentaje de sólidos volátiles.

2.1 Procedimiento.

- A peso constante se colocan las cápsulas de evaporación (utilizadas anteriormente) en una mufla a 550 °C por 2 horas
- Posteriormente se coloca la cápsula en el desecador en atmósfera seca por 30 minutos y finalmente se pesa éste será el peso 4 (P4)

2.2 Cálculos

$$\% \text{ Sólidos volátiles} = \frac{P3 - P4}{P3 - P1} \times 100 \text{ (*)}$$

* El peso 3 y 1 son los obtenidos durante la determinación de sólidos totales

ANEXO 2. ANÁLISIS CRETl

Las características de corrosividad reactividad explosividad e inflamabilidad se describen en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 y se explican a continuación

Corrosividad propiedad de una sustancia capaz de descomponer a otras en función de la liberación de hidrogeno y que degrada químicamente a los materiales con los cuales entra en contacto Un residuo se considera peligroso por su corrosividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades

- En estado líquido o en solución acuosa presenta un pH sobre la escala menor o igual a 2.0 o mayor o igual a 12.5
- En estado líquido o en solución acuosa y a una temperatura de 55 °C es capaz de corroer el acero al carbono (SAE 1020) a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año

Reactividad una sustancia reactiva es aquella que al entrar en contacto con aire agua o a causa de un movimiento sufre cambios físicos o químicos que pueden estar acompañados por la liberación repentina de energía Esta liberación puede ir desde la efervescencia hasta una explosión violenta Un residuo se considera peligroso por su reactividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades

- Bajo condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera) se combina o polimeriza violentamente sin detonación
- En condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera) cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo-agua) de 5:1 5:3 5:5 reacciona violentamente formando gases vapores o humos
- Bajo condiciones normales cuando se ponen en contacto con soluciones de pH ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N) en relación (residuo-solución) de 5:1 5:3 5:5 reacciona violentamente formando gases vapores o humos

- Posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de HCN/kg de residuo o 500 mg de H₂S/kg de residuo
- Es capaz de producir radicales libres

Explosividad las sustancias explosivas son aquellas sustancias que de manera espontánea o por una reacción química pueden desprender gases a una temperatura, presión y velocidad tales que causen daños a los alrededores. Un residuo se considera peligroso por su explosividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades

- Tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del dinitrobenceno
- Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 °C y a 1.03 kg / cm² de presión

Toxicidad característica de una sustancia o residuo para el cual se ha encontrado que la exposición de seres humanos incluso a dosis bajas es fatal o bien que al ser inhalado, ingerido o al ingresar al organismo a través de la piel puede provocar efectos agudos o crónicos, incluyendo efectos cancerígenos. Un residuo se considera peligroso por su toxicidad al ambiente cuando presenta la siguiente propiedad

- Cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la norma oficial mexicana NOM-053-ECOL-1993, el lixiviado de la muestra representativa que contenga cualquiera de los constituyentes listados en las tablas 5, 6 y 7 (anexo 5) de la norma, en concentraciones mayores a los límites señalados en dichas tablas

Inflamabilidad esta propiedad tiene que ver con el grado de susceptibilidad de un material para arder al aumentar su temperatura, las sustancias más inflamables

son líquidos con punto de ignición por debajo de 60 °C. Un residuo se considera peligroso por su inflamabilidad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- En solución acuosa contiene más de 24 % de alcohol en volumen
- Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60 °C
- No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25 °C y a 1.03 kg / cm²)
- Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión

ANEXO 3. DETERMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES MEDIANTE LA TÉCNICA DE FERMENTACIÓN EN TUBOS MÚLTIPLES POR MEDIO DIRECTO (A-1).

La evaluación microbiológica de los lodos es permitida por medio de la fermentación o degradación anaerobia de los hidratos de carbono por los microorganismos. Dicha evaluación se realiza por medio de una serie de pruebas sistemáticas de cuantificación de indicadores bacteriológicos, principalmente del grupo coliforme fecal, cuya sola presencia demuestra que ha ocurrido algún tipo de contaminación.

3.1. Conservación de las muestras.

Las muestras una vez colectadas deben procesarse lo antes posible. De no ser así, se deben refrigerar sin exceder de 6 a 24 horas para muestras altamente contaminadas y con baja turbidez respectivamente. Tiempos superiores afectan la concentración microbiana y el resultado no es representativo.

En el medio A-1 se utiliza una incubación directa a 44 °C adecuada para muestras de agua con alta turbidez y lodos, lo cual requiere de mayor tiempo en su realización y medios de cultivo incrementando con ello su costo.

3.2. Reactivos.

- Lactosa 5 g
- Triptona 20 g
- Salicin 0.5 g
- Cloruro de sodio 5 g
- Triton X-100 1 ml
- Agua destilada 1 000 ml

El medio de cultivo consiste en la disolución de todos los reactivos ajustando el pH a 6.9. Agregar 10 ml de solución a cada tubo de ensaye, introducir un tubo Durham invertido, tapar los tubos, y esterilizar en el autoclave (120 °C por 10 minutos)

Adicionalmente se prepara agua de dilución constituida por fosfato monopotásico y magnesio a un pH de 7.2 ± 0.1 esta solución tiene una capacidad amortiguadora

Se agregan 9 ml en tubos con tapa y se esteriliza

3.3. Procedimiento.

- a) Colectar una cantidad de lodo en gramos de materia fresca que corresponda a 4 gramos de materia seca en un frasco estéril bien tapado
- b) Agitar la muestra e inocular 1 ml en un tubo con medio de cultivo o a un tubo que contenga agua de dilución. No pipetear con la boca
- c) Agitar esta agua de dilución con muestra (1/10) utilizando una nueva pipeta estéril, transferir 1 mL a cada uno de los tres tubos que contienen el tubo Durham invertido y 10 ml de medio A-1. Señalar los tubos de acuerdo a las diluciones que se hayan inoculado (1/10, 1/100, 1/1000 etc.)
- d) Transferir los tubos inoculados en un baño de agua manteniendo a 44 °C (+/- 0.25 °C)
- e) Después de la incubación por 24 horas, examinar a cada tubo la producción de gas. Contar el número de tubos positivos (aquellos con producción de gas) y determinar el NMP
- f) Para todos la densidad de los coliformes se expresa como NMP de coliformes por gramos de sólidos totales (base en peso seco) y se obtiene mediante el código formado por tres algoritmos correspondientes al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas aplicando la siguiente fórmula

$$\text{NMP} = (\text{NMP de tablas})(10) / \text{mayor volumen inoculado}$$

ANEXO 4. DETERMINACIÓN DE *SALMONELLA* SPP. MEDIANTE LA TÉCNICA DE TUBOS MÚLTIPLES O NÚMERO MAS PROBABLE (NMP).

A partir de un enriquecimiento con medios selectivos que contienen sustancias inhibidoras se favorece la multiplicación de *Salmonella* reconstituyendo a su vez la vitalidad de las células dañadas y de igual forma impidiendo el desarrollo de bacterias coliformes asociadas

4.1. Reactivos, Materiales, Aparatos e Instrumentos.

Reactivos

- Caldo de Tetracionato
- Caldo de Selenito Cistina
- Solución tampón de fosfatos (agua dilución)
- Alcohol etílico

Materiales

- Matraces Erlenmeyer de vidrio de 1 y 2 litros de capacidad
- matraz aforado de 1 litro
- Pipetas graduadas de vidrio de 1, 5 y 10 ml
- Tubos de ensayo (18 mm, 16 mm x 150 mm o de 12 mm x 120 mm)
- Tapones de acero inoxidable para tubos de ensayo (18 mm x 180 mm 16mm x 150 mm o 12 mm x 120 mm)
- Tubos de rosca (13 x 100 mm)
- Gradillas y canastillas de acero inoxidable
- Frascos de 1 litro de capacidad con tapa de cierre hermética
- Frascos de 100 ml de capacidad con tapa de cierre hermético y autoclaveables
- Portapipeteros de acero inoxidable
- Barras magnéticas
- Guantes de latex
- Tapabocas
- Bulbo de goma
- Espátula

Aparatos e instrumentos

- Parrilla con agitación

- Autoclave a una presión de 1.05 kg/cm² y una temperatura de 121 °C
- Balanza granataria con intervalo de medición de 0.1 a 100 g
- Balanza analítica con intervalo de medición de 0.0001 a 10.00 g
- Incubadora con capacidad para operar a una temperatura de 37 °C ± 0.2 °C
- Incubadora con capacidad para operar a una temperatura de 41 °C ± 0.2 °C
- Potenciómetro con intervalo de medición de 6.5 a 7.5 ± 0.2 pH
- Refrigerador con capacidad para operar entre 2 y 4 °C ± 0.5 °C

4.2. Enriquecimiento.

Suspender 4 gramos de sólidos totales en 36 ml de caldo de tetrationato obteniendo una dilución de 10⁻¹. Mezclar durante 2 o 3 minutos con la ayuda de una parrilla de agitación, a baja velocidad (800 rpm) hasta la completa disolución. Incubar durante 22 ± 2 horas a 37 ± 0.2 °C.

4.2.1. Preparación de diluciones.

Una vez transcurrido el tiempo de incubación, preparar las diluciones decimales seriadas transfiriendo 1 ml de caldo de tetrationato en 9 ml de agua de dilución (10⁻²) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada.

En cada dilución se debe homogeneizar perfectamente agitando 25 veces en 30 segundos haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba a abajo con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables y utilizar una pipeta estéril diferente para cada una de las diluciones decimales subsecuentes.

Aliquotar por triplicado 1 ml de cada una de las diluciones preparadas en tubo conteniendo caldo selenito cistina correctamente etiquetados. Para aferrar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de esta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical inclinando el tubo. Nunca se debe introducir en la muestra más de la tercera parte de la pipeta. Incubar durante 24 ± 2 horas a 41 °C ± 0.2 °C.

Realizar la observación del vire de coloración, considerando el color anaranjado intenso como positivo de la prueba correspondiente

4.3. Interpretación de resultados.

La densidad de *Salmonella* se expresa como NMP por g de materia seca el cual se obtiene a partir de tablas las cuales incluyen los límites de confianza al 95 % para cada una de las combinaciones de tres (o cinco) series de tubos positivos posibles

Para su utilización se proporcionan códigos formados por tres algoritmos correspondientes al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas

El NMP de *Salmonella* se obtienen a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el caldo de selenito cistina. Si se inoculan tres series de tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en tablas se obtiene el código formado por el número de tubos.

$$\text{NMP} = (\text{NMP de tablas}) \times (10/\text{mayor volumen inoculado})$$

ANEXO 5. TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE HUEVOS DE HELMINTOS.

Esta técnica utiliza la combinación de los principios del método diafasico y del método de flotación, obteniendo un rendimiento de un 90 %

4.1. Equipo.

Centrifuga	Con intervalos de operación de 1000 a 2500 revoluciones por minuto Periodos de operación de 1 a 3 minutos Temperatura de operación 20 a 28 °C
Bomba de vacío:	Adaptada para control de velocidad de succión 1/3 hp
Microscopio óptico:	Con iluminación Koheler Aumentos de 10 a 100X, platina móvil. Sistema de macrofotografía
Agitador de tubos	Automático Adaptable con control de velocidad
Parrilla eléctrica:	Con agitación
Hidrómetro:	Con intervalo de medición de 1.1. a 1.4 g/cm ³ Temperatura de operación 0 a 4 °C

4.2. Reactivos.

- Sulfato de zinc heptahidratado
- Ácido sulfúrico
- Éter etílico
- Etanol
- Agua destilada
- Formaldehido

4.3. Solución de sulfato de zinc, gravedad específica de 1.3.

Formula

- Sulfato de zinc 800 g
- Agua destilada 1000 ml

4.3.1. Preparación.

Disolver 800 g de sulfato de zinc en 1000 ml de agua destilada y agitar en la parrilla eléctrica hasta homogeneizar medir la densidad con hidrómetro Para lograr la densidad deseada agregar reactivo o agua según sea el caso

4.4. Solución alcohol-ácido.

Fórmula

Acido sulfúrico 0 1 N, 650 ml

Etanol 350 ml

4.4.1. Preparación.

Homogeneizar 650 ml del ácido sulfúrico al 0 1 N. con 350 ml de etanol para obtener un litro de la solución alcohol-ácida Almacenarla en recipiente hermético

4.5. Material.

- Garrafrones de 8 litros
- Tamiz de 160 μm (micras) de poro
- Probetas graduadas (1litro y 50 ml)
- Gradillas para tubos de centrifuga de 50 ml
- Pipetas de 10 ml de plástico
- Aplicadores de madera
- Recipientes de plástico de 2 litros
- Guantes de plástico
- Vasos de precipitado de 1 litro
- Bulbo de goma
- Magneto
- Cámara de conteo Doncaster

4.6. Procedimiento.

- a) Tomar 4 gramos de sólidos totales de la muestra que va ser tratada
- b) Pasar esta cantidad de muestra a una licuadora y agregar 1 litro de detergente Triton x y licuar durante 2 minutos.

- c) Una vez licuado la muestra se deposita en un recipiente de plástico de boca ancha y se deja sedimentar durante 3 horas o toda la noche
- d) Se retira el sobrenadante con ayuda de una bomba al vacío y una pipeta de plástico, filtrar el sedimento en Tamiz de 160 μ m
- e) Enjuagar el filtrado con 5 litros de agua y recuperar en el mismo recipiente
- f) Sedimentar 3 horas o toda la noche
- g) Decantar el sobrenadante y transferir el sedimento en tubos para centrifuga y centrifugar a 2000 rpm / 3 min
- h) Decantar el sobrenadante, resuspender la pastilla con 150 ml de sulfato zinc y centrifugar a 2000 rpm / 3 min
- i) Recuperar el sobrenadante en un recipiente de 2 litros y añadir 1 litro de agua destilada, sedimentar 3 h o toda la noche
- j) Decantar el sobrenadante y transferir el sedimento a 2 tubos de 50 ml centrifugar a 2.500 rpm / 3 min
- k) Decantar el sobrenadante y reagrupar el sedimento en un solo tubo con 15 ml de solución ácido-alcohol y 10 ml de eter etílico (permitiendo que el gas escape al homogenizar)
- l) Centrifugar a 3.000 rpm / 3 min Decantar el sobrenadante y dejar menos de 1 ml del líquido
- m) Resuspender el sedimento en 4 ml de ácido sulfurico 0.1 N e incubar a 26 °C durante cuatro semanas
- n) Leer al microscopio con ayuda de disco Doncaster y reportar número de huevos