

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**CALIDAD DE BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES (PTAR) BOSQUE URBANO DE TORREÓN, COAH. PARA USO
AGRÍCOLA**

POR

HUMBERTO DE JESÚS MORENO SOLANO

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO
EN IRRIGACIÓN**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2014.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**CALIDAD DE BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES (PTAR) - BOSQUE URBANO DE TORREÓN, COAH. PARA
USO AGRÍCOLA**

Realizado por:

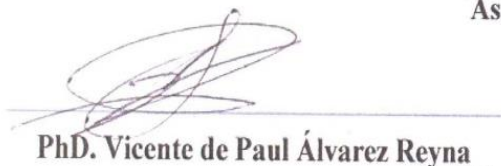
HUMBERTO DE JESÚS MORENO SOLANO

**Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para
obtener el título de:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

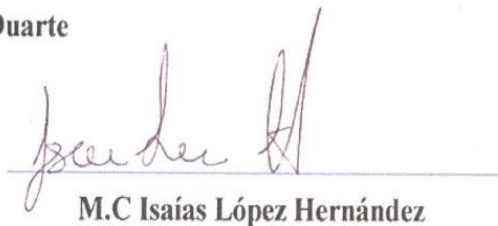


Dra. Manuela Bolívar Duarte
Asesor principal



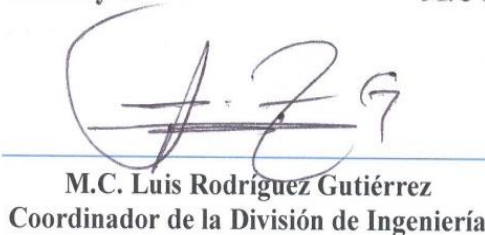
PhD. Vicente de Paul Álvarez Reyna

Asesor



M.C. Isaías López Hernández

Asesor



M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Junio de 2014

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por darme el privilegio de vivir y por haberme acompañado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo mucha felicidad.

*A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi Alma Terra Mater
Por haberme brindado la oportunidad de continuar con mi formación y hacer de mí un profesionalista de provecho.*

A la Dra. Manuela Bolívar Duarte, asesor principal de mi tesis, por sus consejos y apoyo que dedicó a mi formación. A mis asesores el PhD. Vicente de Paul Álvarez R. y M.C. Isaías López Hernández por sus valiosas sugerencias al presente trabajo.

A la QFB Ana Paola Moreno Garza, la Biol. Silvia Guerrero y a la Lic. Ma. Del Socorro Mireles por apoyarme constantemente durante la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo, Alejandro González (Viejo), Daniel Calvo (Gato), Cupertino Aguilar (Che), Ángel Ruiz (Moris), Eloy Vásquez (Cuch), Domingo García (Joven), Fernando Mendoza (Ñoñin), Luis Martínez (Chito), el burro, el wero, a Mosqueda, a toky, a mane, a nacho, el beno, a Inés (la prima), a Yazmin, a Norma, a Honey, a Mary, a todos y cada uno de ustedes.

Sobre todo a aquellas personas que de una u otra forma participaron en la ejecución del presente trabajo.

DEDICATORIAS

A mis Padres:

Guadalupe Solano Gómez

Humberto Félix Moreno Ramírez

Por todos los sacrificios que hicieron para formarme como un ser humano responsable y comprometido con la vida y conmigo mismo y de quienes he aprendido a tener fortaleza en los momentos más difíciles de la vida, con todo mi amor, cariño y admiración para ustedes.

A mis Hermanos:

Jhonatan Moreno Solano (Chaparro)

Elsy Guadalupe Moreno Solano (Wera)

Cruzy Estrella Moreno Solano (Flaquita)

Le agradezco a cada uno de mis hermanos por haberme brindado siempre su apoyo incondicional, por la confianza que depositaron en mí, por los buenos y malos momentos que hemos vivido juntos, por estar conmigo cuando más los he necesitado; hoy, mañana y siempre les estaré eternamente agradecidos.

A mis Familiares:

Abuelos, tíos, Padrinos, Primos: Agradezco sinceramente a todos y cada uno de ustedes que me brindaron su apoyo incondicional, a pesar de estar muy lejos de ustedes siempre los llevo conmigo en mi corazón. Agradezco sus palabras de aliento y sus sabios consejos que me brindaron, el cual me fueron de mucha ayuda para superar día a día los obstáculos que se me presentaron, con toda mi admiración y respeto les dedico mi logro.

A la mujer que durante este tiempo ha compartido conmigo momentos felices y tristes, a quien ha sido más que mi novia, es ahora y será siempre el amor de mi vida. Gracias por tu apoyo y comprensión, por las risas, por los llantos y por tantas otras cosas. Te amo mi amor Martha Maribel Zúñiga Cárdenas.

A mi amigo:

Juan Antonio Hidalgo Morales (Sury): Porque has sido como el hermano mayor que no tuve, por ser más que mi amigo. Gracias por apoyarme en todo momento en las buenas y en las malas, en momentos de tristezas y de alegrías gracias por todo, con todo mi cariño y respeto te dedico mi logro que también es tuyo.

A todas aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron a seguir soñando Gracias de todo corazón les dedico este logro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos:.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Biosólidos: Concepto y su aprovechamiento.....	3
2.1.1. Tratamiento preliminar.....	3
2.1.2. Tratamiento primario.....	3
2.1.3. Tratamiento secundario.....	3
2.1.4. Tratamiento terciario.....	3
2.1.5. Lodo primario.....	4
2.1.6. Lodo secundario.....	4
2.1.7. Lodo terciario.....	4
2.2. Aprovechamiento de los biosólidos.....	5
2.3. Características de los biosólidos.....	6
2.3.1. Características físicas.....	6
2.3.2. Características químicas.....	6
2.3.3. Características biológicas.....	6
2.4. Parámetros importantes.....	7
2.4.1. Cantidad del lodo residual (biosólido).....	7
2.4.2. Contenido de sólidos totales.....	8
2.4.3. Contenido de sólidos volátiles.....	8
2.4.4. pH.....	10
2.4.5. Conductividad eléctrica (CE).....	11
2.4.6. Materia orgánica.....	11
2.4.7. Patógenos.....	11

2.4.8.	Nutrientes	13
2.4.9.	Metales	17
2.4.10.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	18
2.4.11.	Demanda química de oxígeno (DQO)	18
2.4.12.	Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF)	18
2.5.	Valor Agronómico	18
2.6.	Métodos de Aplicación.....	19
2.6.1.	Aplicación del lodo líquido	20
2.6.2.	Aplicación de lodo deshidratado.....	21
2.6.3.	Época de aplicación.....	22
2.7.	Ventajas y desventajas de la aplicación de los biosólidos en los terrenos Agrícolas.....	23
2.8.	Beneficios y riesgos de la utilización de biosólidos en suelos agrícolas	24
	Beneficios:	24
	• Materia Orgánica.....	24
	• Nitrógeno.....	24
	• Fósforo.....	25
	• Micronutrientes.....	25
	Riesgos:.....	25
	✓ Microcontaminantes	25
	✓ Microorganismos patógenos	26
	✓ Nutrimientos en exceso (N, P y sales)	26
	✓ Otros	26
2.9.	Normatividad.....	27
2.9.1.	Especificaciones.....	27
2.10.	Muestreo y análisis de lodos y biosólidos.....	30
3.	MATERIALES Y METODOS	31
3.1.	Características y Ubicación de la Planta de Tratamiento.....	31
3.2.	Primera etapa (Muestreo)	32
3.3.	Segunda etapa (Análisis de Laboratorio).....	32

3.3.1.	Parámetros de observación:.....	33
3.3.1.1.	Conductividad eléctrica (CE).....	33
3.3.1.2.	Potencial de Hidrogeno (pH).....	33
3.3.1.3.	Aniones (CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2+}).	34
	Carbonatos (CO_3^-)	34
	Bicarbonatos (HCO_3^-).....	34
	Cloruros (Cl^-)	35
	Sulfatos (SO_4^{2+})	35
3.3.1.4.	Cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{2+}).....	36
	Calcio (Ca^{2+})	36
	Magnesio (Mg^{2+})	37
	Sodio (Na^{2+})	37
3.3.1.5.	Metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, y zinc).	38
3.3.1.6.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).	38
3.3.1.7.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	39
3.3.1.4.	Sólidos totales suspendidos (TSS)	40
3.3.1.9.	Sólidos totales volátiles (TSV).....	42
3.3.1.10.	Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF).	43
3.3.1.11.	Determinación de huevos de helmintos	50
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
6.	LITERATURA CITADA.....	57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Lodos generados por cada nivel de tratamiento de las aguas residuales.	5
Cuadro 2. Efecto de los procesos de tratamiento del lodo residual sobre las prácticas de aplicación.	9
Cuadro 3. Escala de valores de pH.	10
Cuadro 4. Principales patógenos en el lodo y agua residual.	12
Cuadro 5. Niveles de calcio en suelos agrícolas	16
Cuadro 6. Niveles de magnesio en suelos agrícolas.	17
Cuadro 7. Escenarios típicos de aplicación de biosólidos.	23
Cuadro 8. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos .	28
Cuadro 9. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.	29
Cuadro 10. Aprovechamiento de biosólidos.	29
Cuadro 11. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos.	30
Cuadro 12. Resultados obtenidos en el laboratorio.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicación superficial del lodo líquido mediante un camión cisterna...	20
Figura 2. Tractor equipado con sistema de inyección de lodos.	21
Figura 3. Aplicación de lodo deshidratado.	22
Figura 4. Ubicación geográfica del lugar de trabajo	31
Figura 5. Procedimiento y análisis de los resultados de los coliformes totales y fecales.	47
Figura 6. Índice del NMP y límite confiable de 95% para varias combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se usan: 5 tubos con porciones de 10 cm ³ en cada uno, 5 con porciones de 1cm ³ y con 5 porciones de 0.1 cm ³ ...	49
Figura 7. Cuadrícula de la cámara de Neubauer.	51

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más importantes a nivel mundial de los últimos años, ha sido el abasto de agua para las comunidades en general, en algunos casos, esto se ha debido a la falta de uso racional por parte de la población. El panorama en todo el planeta es que el agua dulce de buena calidad va a seguir disminuyendo, cada vez va a ser un bien más escaso, por lo cual tenemos que dedicarle gran parte de nuestro compromiso a mantener las fuentes de agua limpia. Para solventar estos problemas se introdujo la evacuación separada de las aguas residuales y de las aguas pluviales.

Desde el inicio de la agricultura, se han utilizado los desperdicios generados por los hombres y la de los animales para fertilizar las tierras. En la actualidad, la aplicación de lodos ha aumentado considerablemente gracias a las modernas tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales las cuales hacen que esto sea posible, mejorando algunos factores para la reutilización de dichos "lodos", los que en estos últimos años han pasado a denominarse biosólidos.

Los lodos residuales, conocidos más recientemente como biosólidos, provienen de las aguas residuales, cuyo origen principal son las fuentes domésticas. Los tratamientos a los que son sometidos generalmente estos desechos son el tratamiento primario (físico y químico) y el tratamiento secundario (biológico), aunque si se requiere de un agua más limpia será necesario un tratamiento terciario (Flores y Flores, 2005).

El uso de estos biosólidos está ganando aceptación mundial y es fomentado tanto por la Agencia de Protección Ambiental (U.S. EPA, 1995a) como también por distintos organismos e instituciones tanto de los EE.UU como de los principales países desarrollados.

Para Martínez (1998) la aplicación al suelo se diseña con el objetivo de conseguir un tratamiento adicional del lodo. La luz solar, los microorganismos del suelo y la desecación, se combinan para destruir los organismos patógenos y muchas de las sustancias tóxicas presentes en el lodo.

Los nutrientes los consumen las plantas y los convierten en biomasa útil, los lodos tratados se pueden utilizar como un sustituto parcial de fertilizantes químicos costosos y pueden actuar como mejoradores o acondicionadores del suelo para facilitar el transporte de nutrientes, aumentar la retención del agua y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo (Pissani, 1990).

En algunos estados del país, como Coahuila, existen sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales municipales y la industria de esta zona ha reutilizado dichas aguas desde 1955. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Bosque Urbano (PTAR- Bosque Urbano) de Torreón, Coah, se encuentra situada en la colonia Miguel de la Madrid en la zona centro de torreón, la planta fue diseñada y construida para que su capacidad actual pueda ser fácilmente expandida al doble de su valor cuando sea requerido.

La problemática que existe actualmente es que los lodos que ahí se producen son depositados en el relleno sanitario en el mismo lugar y sin ningún reúso, por tal razón se ha tomado la iniciativa de analizar y estudiar dichos lodos con la finalidad de darles un uso en los suelos agrícolas de la región o bien para el mismo bosque urbano, por lo anteriormente expuesto, los objetivos planteados fueron:

Objetivos:

- ✓ Determinar la calidad de los biosólidos de la PTAR- Bosque Urbano de Torreón, Coah.

- ✓ Clasificar los biosólidos producidos en la PTAR- Bosque Urbano de Torreón, Coah.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Biosólidos: Concepto y su aprovechamiento.

El lodo residual, conocidos más recientemente como biosólidos, se define como los residuos sólidos, semisólidos o líquidos, removidos en los procesos de tratamiento primario, secundario o avanzado del agua residual. El lodo incluye escorias o sólidos removidos en los procesos de tratamiento y cualquier material derivado del lodo (por ejemplo, una mezcla de lodo fertilizante) pero no incluye a los granitos de arena, cribados y cenizas generadas por la combustión del lodo en un incinerador (U. S. EPA, 1995a) mencionado por Carmona (2006).

Los niveles de tratamiento del agua residual, según Flores y Flores (2005):

- 2.1.1. Tratamiento preliminar. Tratamiento básico que se le da a los vertidos con el fin de remover sólidos gruesos y objetos que puedan impedir el funcionamiento de bombas y equipos.
- 2.1.2. Tratamiento primario. Conjunto de operaciones utilizadas en la separación de los sólidos sedimentables o de materiales flotantes, por medios gravitacionales o mecánicos. En algunos casos se requiere de ayudas físicas o químicas para remover los sólidos sedimentables o el material flotante y aumentar su eficiencia.
- 2.1.3. Tratamiento secundario. Se utiliza para la reducción de la carga orgánica y de sólidos en suspensión del vertido, por métodos bioquímicos.
- 2.1.4. Tratamiento terciario. Es aquél requerido después del tratamiento secundario, cuando el agua va a ser reutilizada. Elimina un 99 por ciento de los sólidos y además se emplean varios procesos químicos para garantizar que el agua esté libre de impurezas.

Por su origen (fase o proceso de tratamiento del agua en que se generaron) los lodos se clasifican en primarios, secundarios o terciarios.

2.1.5. Lodo primario. Lodo que resulta del tratamiento primario del agua residual, que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento, usualmente contiene de 93 a 99.5 por ciento de agua, así como los sólidos y sustancias disueltas que estuvieron presentes en el agua residual (U.S. EPA, 1984).

2.1.6. Lodo secundario. Los tratamientos secundarios del agua residual generalmente involucran un proceso de clarificación primario seguido de un tratamiento biológico y una clarificación secundaria (U.S. EPA, 1990). El lodo generado por procesos de tratamiento secundarios del agua residual, tales como los sistemas biológicos activados y filtros percoladores, tienen un contenido de sólidos bajo (0.5 a 2 por ciento) y son difíciles de espesarse y deshidratarse que los lodos primarios.

2.1.7. Lodo terciario. Son producidos por procesos de tratamiento avanzados del agua residual, tales como la precipitación química y filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzados del agua residual, tales como aluminio, fierro, sales, cal o polímeros orgánicos, incrementan la masa del lodo y usualmente el volumen del lodo. Generalmente, si la cal o polímeros son usados, las características del espesamiento y deshidratación del lodo serán mejores, mientras si fierro o sales de aluminio son usadas, la capacidad de la deshidratación y espesamiento del lodo comúnmente será reducida.

Según Robledo (2012) los lodos generados por cada nivel de tratamiento son como se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Lodos generados por cada nivel de tratamiento de las aguas residuales (Robledo, 2012).

Parámetro	Unidad	Nivel de tratamiento		
		Primario	Secundario	Terciario
Cantidad de lodos generada	Lodo/10 ⁶ L agua tratada	2500-3500	15000 - 20000	10000
% de sólidos totales (ST)	%	3.0 – 7.0	0.5 – 2.0	0.2 – 1.5
Materia orgánica (M.O)	% en base seca	60 - 80	50 - 60	35 - 50

2.2 . Aprovechamiento de los biosólidos

Los biosólidos son principalmente materiales orgánicos producidos durante el tratamiento de aguas residuales, los cuales pueden ser utilizados en diversos usos benéficos. Un ejemplo de tales usos es la incorporación de biosólidos al terreno para abastecerlo de nutrientes y para renovar la materia orgánica del terreno, los cuales pueden ser terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo o en terrenos alterados que necesitan recuperación (Merli y Ricciuti, 2009).

Por otro lado, los biosólidos son considerados mejoradores de las propiedades físicas de los suelos según lo relatan los autores anteriores, lo cual se hace evidente cuando se usan como enmienda en suelos degradados. La degradación del suelo se vincula con la pérdida de la estabilidad estructural, el encostramiento y las densificaciones, a lo cual se une la reducción de la actividad biológica y procesos de degradación química (disminución del contenido de materia orgánica y agotamiento de nutrientes).

El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo (según el contenido de metales pesados) y clase (según el contenido de patógenos y parásitos), como se especifica en la norma (DOF, 2003).

2.3. Características de los biosólidos

Las características físicas y químicas de los lodos varían considerablemente aunque algunas propiedades pueden ser semejantes, en muchos de ellos las características son determinantes para su uso en el suelo, estas pueden agruparse en tres categorías: físicas, químicas y biológicas según el autor (Flores y Flores, 2005):

2.3.1. Características físicas

El contenido de sólidos y de materia orgánica son las características físicas más importantes, el contenido de sólidos afecta el método de aplicación y el crecimiento de las plantas, mientras que el contenido de materia orgánica puede afectar la disponibilidad y la acumulación de nutrientes y elementos traza.

2.3.2. Características químicas

Las propiedades químicas afectan el crecimiento de las plantas, de igual manera cómo influyen las características químicas y físicas del suelo. Las características químicas más importantes son el pH, las sales solubles, los macro y los micronutrientes para los vegetales.

2.3.3. Características biológicas

Las aguas residuales contienen una flora y una fauna variadas que se encuentran en parte en los lodos. Los patógenos son la propiedad biológica más importante de los biosólidos, aunado a ellos también existen poblaciones microbianas indígenas que incluyen bacterias, hongos, actinomicetos y protozoarios, los cuales mejoran y ayudan a la descomposición de la materia orgánica.

Considerando todas las propiedades, se puede señalar que el contenido de materia orgánica, la cual mejora la estructura del suelo, la retención de la humedad y la capacidad de intercambio catiónico. El contenido de nutrientes

vegetales y las propiedades biológicas; hacen de este subproducto un recurso muy valioso para agricultura, la silvicultura y la restauración de los suelos.

2.4. Parámetros importantes

Por otra parte también se deben de considerar los siguientes parámetros según los autores (Martínez, 1998), (Bolívar y Moreno, 2012) y (Bolívar y Guerrero, 2013), para caracterizar más a fondo los biosólidos:

- Cantidad del lodo residual
- Contenido de sólidos totales
- Contenido de sólidos volátiles
- pH
- CE
- Materia orgánica
- Patógenos
- Nutrientes
- Metales
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF)

2.4.1. Cantidad del lodo residual (biosólido)

La cantidad de lodo que se aplica al suelo, afecta la evaluación del terreno y el diseño en varios aspectos importantes, incluyendo la superficie de suelo necesaria, tamaño del equipo de transportación, instalaciones de almacenamiento y costos. La cantidad de lodo disponible, también afecta la selección de las prácticas de aplicación (p.e. aplicación a suelos agrícola, forestales, sitios de contacto público o recuperación de terrenos), así como las dosis de aplicación y la agenda de operación (U.S. EPA, 1984).

2.4.2. Contenido de sólidos totales

El contenido de sólidos totales (ST) del lodo residual, incluye a los sólidos suspendidos y sólidos disueltos, usualmente expresado como el porcentaje de los sólidos totales presentes en un lodo residual. Típicamente, el lodo líquido tiene un contenido de sólidos de 2 a 12 por ciento de sólidos, mientras el lodo deshidratado tiene un contenido de sólidos de 12 a 40 por ciento de sólidos (incluyendo aditivos químicos). El lodo seco o composteado típicamente tiene un contenido de sólidos superior al 50 por ciento. El contenido de sólidos totales depende, del tipo de lodo residual (primario, secundario o terciario) si el lodo ha sido tratado previo a la aplicación al suelo y tratamiento. Los procesos de tratamiento tales como espesamiento, acondicionamiento, deshidratación, composteo y secado pueden bajar el contenido de agua y así incrementar el porcentaje de sólidos como se muestra en el cuadro 2 (U.S. EPA, 1984).

2.4.3. Contenido de sólidos volátiles

Los sólidos volátiles del lodo (SV), son compuestos orgánicos que son reducidos cuando el lodo es calentado a 550°C bajo condiciones de oxidación. El contenido de sólidos volátiles del lodo, da una estimación del contenido del material orgánico. El contenido de sólidos volátiles es comúnmente expresado como el porcentaje de los sólidos totales que son sólidos volátiles. Los sólidos volátiles son un determinante importante de problemas potenciales de olores para los sitios de aplicación. La reducción de los sólidos volátiles es una opción para satisfacer los requerimientos de reducción de atracción de vectores (Martínez, 1998).

Cuadro 2. Efecto de los procesos de tratamiento del lodo residual sobre las prácticas de aplicación (U.S. EPA, 1984).

Proceso de tratamiento y definición	Efecto sobre el lodo	Efecto sobre las prácticas de aplicación
<p>Espesamiento: Separación por gravedad del agua y sólidos, flotación o centrifugación. (Los espesadores del lodo pueden ser usados como tanques para igualar flujos, para minimizar los efectos de las fluctuaciones de las cantidades de lodo en procesos de tratamiento subsecuentes).</p>	<p>Incrementa la concentración de sólidos en el lodo, debido a la remoción de agua, por medio de esto, baja el volumen del lodo. Puede suministrarse una función mezclada en combinación y mezclar lodo primario y lodo secundario.</p>	<p>Costos de transportación del lodo más bajos para todas las prácticas (agrícolas, forestales, recuperación de terrenos, sitios de contacto público).</p>
<p>Acondicionamiento: Alteración de las propiedades físicas del lodo para facilitar la separación del agua en el lodo. El acondicionamiento puede realizarse de diferentes maneras, por ejemplo, la adición de químicos inorgánicos tales como cal y cloruro férrico; agregando químicos orgánicos tales como polímeros.</p>	<p>El acondicionamiento puede incrementar la masa de los sólidos secos que serán manejados sin incrementar el contenido orgánico del lodo. El acondicionamiento también puede mejorar la compactibilidad y estabilización del lodo. Generalmente, el lodo tratado con polímeros tiende a ser pegajoso, y menos manejable que otros lodos.</p>	<p>El lodo tratado con polímeros puede requerir consideraciones especiales de operación para aplicarlos al suelo.</p>
<p>Deshidratación: Separación del agua y sólidos. Los métodos de deshidratación incluyen: filtros de vacío, centrifugadoras, filtros prensa, cintas prensa, lagunas y camas de secado de arena.</p>	<p>Incrementa la concentración de sólidos del lodo mediante la remoción de agua, por medio de esto baja el volumen del lodo. La deshidratación puede incrementar los sólidos del lodo del 15% al 40% para lodo orgánico y 45% o más para algunos lodos inorgánicos. Un poco de nitrógeno y otros materiales solubles son removidos con el agua. Mejora la facilidad de manejo debido a la conversión del lodo líquido a un pastel húmedo.</p>	<p>Los requerimientos de aplicación son reducidos y disminuyen los costos de transportación para todas las prácticas.</p>
<p>Composteo: Proceso aerobio que incluye la estabilización biológica del lodo en un windrow, pila estática aireada.</p>	<p>Baja la actividad biológica, puede destruir más patógenos, degrada el lodo a un material como el humus.</p>	<p>Excelentes propiedades para el acondicionamiento de suelos. Puede contener menos niveles de nutrientes que menos lodo procesado.</p>
<p>Secado a calor: La aplicación de calor mata patógenos y elimina más el contenido de agua.</p>	<p>Desinfecta al lodo, destruye más patógenos, baja considerablemente el potencial de olores y actividad biológica.</p>	<p>Reduce grandemente el volumen del lodo.</p>

2.4.4. pH

El autor anterior menciona que el pH del lodo puede afectar la producción de los cultivos en los sitios donde es aplicado el lodo, ya que altera el pH del suelo. Un pH bajo en el lodo (menos de 6.5) promueve lixiviación de metales, mientras un pH alto del lodo (mayor de 11) mata muchas bacterias y, en conjunción con el pH neutro o alto del suelo, puede inhibir el movimiento de metales pesados a través del suelo, algunas alternativas para la reducción de patógenos incluyen el incremento de los niveles del pH.

A continuación se muestra en el cuadro 3 la escala de los valores de pH y su respectiva interpretación.

Cuadro 3. Escala de valores de pH (Bolívar y Guerrero, 2013)

Escala	Interpretación
Menos de 4.6	Extremadamente ácido
4.6 – 5.19	Muy fuertemente ácido
5.2 – 5.59	Fuertemente ácido
5.6 – 6.19	Medianamente ácido
6.19 – 6.59	Ligeramente ácido
6.6 – 6.79	Muy ligeramente ácido
6.8 – 7.19	Neutro
7.2 – 7.39	Muy ligeramente alcalino
7.4 – 7.79	Ligeramente alcalino
7.8 – 8.39	Medianamente alcalino
8.4 – 8.79	Fuertemente alcalino
8.8 – 9.39	Muy fuertemente alcalino
Más de 9.4	Extremadamente alcalino

2.4.5. Conductividad eléctrica (CE)

Conductividad es la medida de la capacidad que tiene un material para conducir la corriente eléctrica. Las soluciones nutritivas contienen partículas iónicas que llevan cargas y por lo tanto poseen esta habilidad. Cuanto mayor es la cantidad de estos iones disueltos en el agua la conductividad de la solución resultante es mayor. Por lo tanto la medición de la conductividad eléctrica de una solución nutritiva tiene una relación directa con la cantidad de materiales sólidos disociados que hay disueltos en ella (Bolívar y Moreno, 2012).

2.4.6. Materia orgánica

El nivel relativamente alto de materia orgánica en el lodo, permite al lodo ser usado como un acondicionador de suelos, mejorando las propiedades físicas del suelo (p.e. incrementa la filtración y la capacidad de retención del agua). Las propiedades del lodo para acondicionar suelos son especialmente útiles para la recuperación de terrenos, por ejemplo, para las minas estropeadas.

2.4.7. Patógenos

Los microorganismos causantes de enfermedades conocidos como patógenos, mostrados en el cuadro 4 (U.S. EPA, 1990) incluyen a las bacterias, virus, protozoos, y huevecillos de helmintos, frecuentemente están presentes en las aguas residuales municipales y en el lodo crudo. Los patógenos pueden representar un peligro para la salud pública, si éstos son transferidos a los cultivos alimenticios sobre el suelo en el cual el lodo es aplicado, contenido en los escurrimientos de los sitios de aplicación a las aguas superficiales, o transportado lejos de los sitios por los vectores tales como insectos, roedores y aves.

Cuadro 4. Principales patógenos en el lodo y agua residual (U.S. EPA, 1990).

Organismos	Síntomas de la enfermedad
Bacteria Salmonella sp. Shigella sp. Vibrio cholerae Campylobacter jejuni Escherichia coli (entero patógena)	Salmonelosis (envenenamiento de alimentos), fiebre tifoidea. Disentería basilaria. Cólera Gastroenteritis Gastroenteritis
Virus Entéricos Virus Hepatitis A Virus Norwalk y Norwalk-like Rotavirus Enterovirus Poliovirus Virus coxsackie Echovirus Reovirus Astrovirus Calcivirus	Hepatitis infecciosa Gastroenteritis epidémica con diarrea severa Gastroenteritis aguda con diarrea severa Poliomielitis Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, escalofrío, diarrea, etc. Meningitis, parálisis, encefalitis, fiebre, escalofrío, diarrea, etc. Infecciones respiratorias, gastroenteritis Gastroenteritis epidémica Gastroenteritis epidémica
Protozoos Cryptosporidium Entamoeba histolytica Giardia lamblia Balantidium coli Toxoplasma gondi	Gastroenteritis Enteritis aguda Giardiasis (incluye diarrea, retorcijones abdominales y pérdida de peso) Diarrea y disentería
Gusanos de helmintos Ascaris lumbricoides Ascaris suum Trichuris trichiura Toxocara canis Taenia saginata Taenia solium Necator americanus Hymenolepis nana	Toxoplasmosis Trastornos digestivos y nutricionales, dolor abdominal, vómitos, agitaciones. Puede producir síntomas tales como tosidos, dolores de pecho y fiebre Dolor abdominal, diarrea, anemia, pérdida de peso. Fiebre, molestias abdominales, dolores musculares, síntomas neurológicos Nerviosismo, insomnios, anorexia, dolores abdominales, trastornos digestivos. Nerviosismo, insomnios, anorexia, dolores abdominales, trastornos digestivos Enfermedad de anquilostoma Taeniasis

La supervivencia de las bacterias patógenas intestinales en el suelo y en la vegetación depende de diversos factores como pueden ser el tipo de organismo, la temperatura, la materia orgánica, la presencia de otros

microorganismos, la humedad, el tipo de suelo o la presencia y cantidad de nutrientes disponibles.

Huevos de helmintos

Los helmintos o gusanos pertenecen al subreino de los Metazoarios, lo que denota que son animales multicelulares, en los cuales las células se hayan diferenciadas formando órganos con funciones especiales, y además divididos en dos ramas, los Platelmintos (gusanos planos) y los Nematelmintos (gusanos redondos). Los Platelmintos están subdivididos en dos clases, los Tremátodos (duelas) y los Céstodos (tenias). Los Nematelmintos incluyen la clase Nemátodo, de los cuales algunos son parásitos del hombre; mientras que la mayoría son formas de vida libre o parásitos de los animales y de las plantas (Bolívar y Moreno, 2012).

2.4.8. Nutrientes

Los nutrientes presentes en los lodos tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), entre otros, son esenciales para el crecimiento de las plantas. El nivel de nutrientes es importante para determinar las dosis de aplicación de lodo. Niveles excesivos de nutrientes debido a las altas dosis de aplicación, pueden resultar en una contaminación ambiental del agua subterránea y superficial y debe ser evitado (U.S. EPA. 1995a).

Nitrógeno

El nitrógeno puede estar presente en el lodo en forma inorgánica, ya sea en forma de amonio (NH_4), en forma de nitrato (NO_3) o en forma orgánica. La forma en que el N está presente en el lodo es un factor importante en la determinación de cuanto nitrógeno está disponible para las plantas, así como el potencial de contaminación de N a las aguas subterráneas (Martínez, 1998).

El contenido de N orgánico del lodo puede variar del 1 al 10 por ciento en base peso seco. Los componentes orgánicos encontrados en el lodo principalmente son aminoácidos, que indican la presencia de materiales proteínicos. Después de la aplicación al suelo, los microbios del suelo

descompondrán a los componentes del nitrógeno orgánico del lodo, resultando una liberación de NH_4 , el cual puede ser asimilado por los cultivos o la vegetación.

Fósforo, potasio y otros nutrientes

El lodo contiene concentraciones variadas de otros macro y micro nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas, algunos constituyentes del lodo, tales como fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y hierro (Fe), fácilmente forman compuestos insolubles con los sólidos del lodo y permanecen así en niveles relativamente altos en el lodo (Martínez, 1998).

Otros constituyentes del lodo, tales como el potasio (K) y el sodio, están solubles en el agua y son descargados con las aguas residuales tratadas, a menos que un proceso especial de tratamiento avanzado, sea usado para removerlos, se reducirán más sus concentraciones en el lodo, si el lodo es deshidratado (por centrifugadoras o prensas), mientras que el secado con calor o aire resultará en un incremento de los niveles debido a que esos constituyentes no son volátiles.

Otros nutrientes que son de mucha importancia para el desarrollo vegetativo de las plantas y para los suelos según los autores (Bolívar y Guerrero, 2013).

Carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$)

Los carbonatos de los suelos y de las aguas se presentan en forma de carbonatos pocos solubles de los metales alcalinos térreos y por esto se interfieren en la determinación de los cationes canjeables, afectando así la descomposición de la disolución del suelo extraído.

Bicarbonatos (HCO_3^-)

La valoración de los iones bicarbonatos en las aguas incluyendo las disoluciones de los suelos, corresponden a la llamada alcalinidad total. Las especies de plantas difieren notablemente en su tolerancia al ion bicarbonato, el

cual muchas veces ejerce efectos tóxicos específicos que producen daños serios aún a bajas concentraciones.

Cloruros (Cl⁻)

Los cloruros son compuestos muy solubles, por esta razón el cloro, en climas húmedos se lava del suelo con facilidad. Los suelos ricos en sales solubles suelen contener cantidad de cloruros en solución y como éstas son muy solubles, se desplazan hacia abajo cuando llueve y hacia arriba cuando el agua se evapora en la superficie del suelo.

Sulfatos (SO₄²⁺)

El azufre orgánico se presenta en el suelo en forma de sulfato. La mayoría de los compuestos minerales de azufre (excepto CaSO₄), son muy solubles a cualquier pH, por lo tanto, se haya sujetos a rápidas pérdidas por lavado cuando aumenta su concentración en la solución del suelo. Los suelos de regiones áridas suelen contener cantidades de azufre semejantes a las zonas húmedas, pero la mayor parte se encuentra en forma mineral. Las plantas absorben azufre del suelo en forma de ión sulfato (SO₄²⁺) y del aire en forma de dióxido de azufre (SO₂). El azufre es un componente esencial de todas las proteínas de las plantas y de algunas hormonas.

Sodio (Na²⁺)

El Sodio del suelo puede ejercer efectos secundarios importantes, sobre el desarrollo vegetal a través de modificaciones estructurales adversas en el suelo, si este contiene cantidades apreciables de sodio, el suelo se vuelve lodoso causando una aireación deficiente y con baja disponibilidad de agua, esto es esencialmente cierto en suelos de textura arcillosa.

En las regiones húmedas, la lixiviación elimina el sodio a causa de su débil atracción con los sitios de intercambio catiónico en las regiones áridas, el sodio se puede acumular como carbonato de sodio. Aun cuando el sodio no se considera como esencial para el crecimiento de las plantas, resulta benéfico para algunas de ellas. Tiene una importancia esencial con relación a los

problemas alcalinos y son muy importantes los métodos para determinar su contenido en los suelos, las plantas y las aguas.

Calcio (Ca^{2+})

El Calcio en el suelo y en las plantas se encuentra en forma de catión bivalente. Es componente de minerales poco solubles como la calcita CaCO_3 o el yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Estos minerales son lavados del suelo en regiones muy húmedas, pero persisten en los horizontes superficiales de muchos suelos áridos. El Calcio es un componente estructural de la pared celular y por tanto es vital para la formación de nuevas células, por otra parte el Calcio se encuentran de tal manera integrado en la pared celular, no es posible utilizar el que poseen las células viejas para construir nuevas.

Activa la temprana formación y crecimiento de las raicillas; mejora el vigor de la planta y hace el tallo más resistente; ayuda a mejorar la estructura del suelo; neutraliza los tóxicos producidos en la planta; estimula la formación de semilla y grano; aumenta el contenido de Calcio en alimentos y forrajes; en algunas de sus formas ayuda a controlar la acidez del suelo. La interpretación de acuerdo al contenido de calcio en el suelo se muestra en el cuadro 5.

Cuadro 5. Niveles de calcio en suelos agrícolas (Bolívar y Guerrero, 2013).

Nivel de Ca^{++} ppm	kg/ha	Interpretación
500	1125	Pobre
900	2025	Medio
1200	2700	Rico
1600	3600	Muy rico

Magnesio (Mg^{2+})

El ion Mg^{2+} es químicamente similar al ion Calcio. Sin embargo, en comportamiento de ambos muestra importantes diferencias en las plantas y en el suelo. La mayor parte del Mg^{2+} presente en las plantas se encuentra en la clorofila y en las semillas ya que este es necesario para formación de azúcar;

ayuda a la asimilación de otros nutrientes, actúan como transportador del fósforo dentro de la planta; promueve la formación de aceites y grasas, en cierta forma corrige la acidez del suelo, la interpretación de acuerdo al contenido de calcio en el suelo se muestra en el cuadro 6 (Bolívar y Guerrero, 2013).

Cuadro 6. Niveles de magnesio en suelos agrícolas (Bolívar y Guerrero, 2013).

Nivel de Mg⁺⁺ ppm	kg/ha	Interpretación
12	27	Pobre
25	56	Medio
50	112	Rico
125	281	Muy rico

2.4.9. Metales

El lodo puede contener cantidades variadas de metales; en concentraciones bajas en el suelo, algunos de esos metales son utilizados como nutrientes o para el crecimiento de las plantas y frecuentemente son agregados por fertilizantes inorgánicos comerciales, tales como el Co, Cu, Fe, Mo y Zn. Pero en altas concentraciones, algunos metales pueden ser tóxicos para los humanos, animales y las plantas (U.S. EPA, 1995a).

Según relata el autor anterior, las concentraciones de metal en el lodo en gran parte dependen del tipo y cantidad de los residuos industriales descargados dentro de los sistemas de tratamiento del agua residual. Debido a que los metales generalmente son insolubles, éstos generalmente están presentes en el lodo en concentraciones altas, que en las aguas residuales, y la deshidratación del lodo tiene un impacto mínimo en la reducción de las concentraciones de metal en el lodo que es destinado para aplicaciones al suelo.

En cuanto a la calidad del agua se deben de tomar muy en cuenta los siguientes parámetros según los autores (Bolívar y Moreno, 2012).

2.4.10. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La demanda bioquímica de oxígeno, se refiere a la cantidad de oxígeno que requiere una población de microorganismos para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua.

2.4.11. Demanda química de oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno, se refiere a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar bajo condiciones específicas, la materia orgánica y la inorgánica, contenida en el agua.

2.4.12. Coliformes Totales (CT) y Coliformes fecales (CF)

Debido a que las aguas residuales son de composición variada provenientes de descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas, contienen diferentes tipos de microorganismos contaminantes y las diferentes concentraciones, dependiendo de su fuente.

2.5. Valor Agronómico

El uso de los biosólidos residuales en la agricultura está supeditado a los niveles de concentración de los parámetros de patógenos, parásitos y metales pesados, según (DOF, 2003) siendo las clases A, B y C como las más idóneas.

El lodo aplicado a los suelos agrícolas puede aplicarse en dosis iguales de acuerdo a las formulaciones de fertilización recomendadas para los cultivos. La cantidad de nitrógeno y fósforo disponible o asimilable aplicada a un lugar está basada en los requerimientos del cultivo. La cantidad de N o P puede de otro modo aplicarse por el agricultor utilizando fertilizantes comerciales por el agricultor, Las aplicaciones de N se deben limitar a las recomendaciones de fertilización, para reducir su impacto sobre el agua subterránea por lo cual debe

ser igual al aplicado utilizando fertilizantes comerciales o estiércol (Carmona, 2006).

La aplicación de estos productos a los suelos es considerada normalmente una alternativa aceptable, está comprobado que el incremento del contenido de materia orgánica del suelo, por su aporte de N orgánico, aumenta el contenido de N disponible para los cultivos y por su nivel de nutrientes influye en la concentración de fósforo, calcio, potasio, magnesio, zinc, boro y cobre del suelo. En virtud de lo cual el uso de biosólidos en agricultura es importante en muchos países como sustituto parcial de los fertilizantes y como mejorador de las propiedades físicas del suelo (Merli y Ricciuti, 2009).

Como se ha mencionado anteriormente los biosólidos son un importante proveedor de nutrientes al suelos (Merli y Ricciuti, 2009), ese aporte de nutrientes puede dar lugar a mayores rendimientos de cultivos, en función de las características del ambiente y del manejo agrícola. Los biosólidos actúan como un sustituto parcial de los fertilizantes y generalmente se encuentran respuestas positivas por parte de los cultivos (biomasa y rendimiento) a su agregado. Estas respuestas en rendimiento pueden ser semejantes o superiores a las encontradas con fertilizantes químicos.

2.6. Métodos de Aplicación

Existen diversos métodos para la aplicación de biosólidos al terreno (Martínez, 1998). La selección del método depende del tipo de terreno y consistencia de los biosólidos. Los biosólidos líquidos contienen esencialmente del 94 al 97 por ciento de agua y cantidad de sólidos relativamente baja (del 3 al 6 por ciento), características posibilitan que su aplicación al suelo sea por medio de su inyección, mediante dispositivos diseñados especialmente, o simplemente aplicados superficialmente cuando se trata de biosólidos desecados (deshidratados), con la ayuda de maquinaria normalmente utilizada en labores agrícolas.

2.6.1. Aplicación del lodo líquido

La aplicación del lodo en estado líquido es interesante debido a su sencillez. No es necesario llevar a cabo procesos de deshidratación y el transporte del lodo líquido se puede realizar por bombeo. Las concentraciones comunes del lodo aplicado al terreno en estado líquido varían entre el 1 y el 10 por ciento. El lodo líquido se puede aplicar al terreno con el uso de dispositivos o métodos de riego similares a los empleados para la distribución de agua residual (Martínez, 1998).

La distribución del lodo se puede realizar por distribución en superficie, inyección o incorporación sub superficial. La distribución superficial puede realizarse mediante camiones cisterna equipada con tuberías de distribución montados en la parte posterior, con rociadores o aspersores de cañón de alta capacidad. Este tipo de aplicación es ideal para ser usado en terrenos agrícolas como se muestra en la figura 1 (Martínez, 1998).



Figura 1. Aplicación superficial del lodo líquido mediante un camión cisterna (Martínez, 1998).

El lodo líquido puede aplicarse por inyección más abajo de la superficie del suelo reportado por los autores (Pissani y Guzmán, 1999) y mostrado en la figura 2, siendo este método el preferido por los agricultores. Las ventajas atribuidas a la aplicación por inyección o inmediata incorporación al suelo incluyen la minimización de la posibilidad de generación de olor y de la atracción de vectores. Los equipos con inyectoros especializados han sido desarrollados para no dañar los cultivos. La inyección deberá hacerse perpendicular a la pendiente para evitar que el líquido se desplace cuesta abajo a lo largo del corte y se encharque al final de la pendiente.



Figura 2. Tractor equipado con sistema de inyección de lodos
(Pissani y Guzmán, 1999).

2.6.2. Aplicación de lodo deshidratado

El lodo deshidratado puede aplicarse a la tierra cultivable con equipo similar al usado para la aplicación del estiércol de animal, sin embargo, muchos equipos sofisticados han sido desarrollados con llantas de alta flotación y mejorado su diseño de aplicación como se muestra en la figura 3 (Martínez, 1998).



Figura 3. Aplicación de lodo deshidratado (Pissani y Guzmán, 1999).

La posibilidad de aplicación del lodo mediante distribuidores de abono convencionales constituye una ventaja importante, ya que los agricultores pueden aplicar el lodo al terreno con su propia maquinaria es decir con ayuda de una rastra u otra forma de labranza. Otras ventajas incluyen la reducción de costos de transporte, almacenamiento y distribución del lodo.

2.6.3. Época de aplicación

El período de aplicación del lodo deberá programarse cerca de la labranza, siembra y operaciones de cosecha, y también puede estar influenciada por el cultivo, clima y propiedades del suelo. El lodo no puede aplicarse durante períodos de mal tiempo (Robledo, 2012).

La aplicación del lodo a los suelos agrícolas que están inundados, congelados o cubiertos por nieve está prohibida, puesto que la humedad del suelo es un factor importante, que afecta el período de aplicación. La circulación

sobre suelos húmedos durante o inmediatamente de precipitaciones pesadas puede resultar en compactación y puede dejar hendiduras profundas en el suelo, haciendo difícil la producción del cultivo, además de reducir su producción (Martínez, 1998).

Según la U.S. EPA (1984), menciona los escenarios típicos en los cuales se puede aplicar los biosólidos al suelo, como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7. Escenarios típicos de aplicación de biosólidos (U.S. EPA, 1984).

Tipo de Área/Vegetación	Periodo	Frecuencia de Aplicación	Tasa de Aplicación
Terreno agrícola (Maíz)	Abril, mayo, luego de la cosecha.	anualmente	5 a 10 toneladas secas/ acre
Granos pequeños	Marzo a junio, agosto y en el otoño	Hasta 3 veces por año	2 a 5 toneladas secas / acre
Semilla de soya	Abril a junio y en el otoño	anualmente	5 a 20 toneladas secas / acre
Heno	Después de cada poda	Hasta 3 veces por año	2 a 5 toneladas secas / acre
Área de bosques	Todo el año	Una vez cada 2 a 5 años	5 a 100 toneladas secas / acre
Terreno de pastoreo	Todo el año	Una vez cada 1 o 2 años	2 a 60 toneladas secas / acre
Áreas de recuperación	Todo el año	Una vez	60 a 100 toneladas secas / acre

2.7. Ventajas y desventajas de la aplicación de los biosólidos en los terrenos Agrícolas

La aplicación al terreno es una forma excelente de reciclar los sólidos contenidos en el agua residual. Lo cual debe considerarse siempre y cuando se controle la calidad del material. Los biosólidos retornan nutrientes valiosos al terreno y mejoran las condiciones para el crecimiento de la vegetación. Otra

ventaja que ofrece su aplicación, es la de ser una opción relativamente económica, puesto que la inversión de capital es generalmente mucho menor comparada con otros métodos de manejo de biosólidos (Martínez, 1998).

En cuanto a las desventajas, aun cuando la aplicación al terreno requiere un capital relativamente menor, se puede necesitar mucha mano de obra. Otro aspecto a considerar es la necesidad de control por parte de personal especializado, puesto que un mal manejo de los biosólidos puede constituirse en un problema más que beneficios.

2.8. Beneficios y riesgos de la utilización de biosólidos en suelos agrícolas

Beneficios:

A corto plazo, la adición de los lodos residuales puede mejorar la productividad del suelo cultivable, ya que por el alto contenido de MO (60 – 85 por ciento en materia seca), se facilita la disponibilidad, suministro inmediato y transporte de nutrientes necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas (principalmente N, P y nutrientes menores) (Robledo, 2012).

- **Materia Orgánica.** La MO contenida en los biosólidos ayuda a retener agua en el suelo. Esta retención extra de agua puede reducir la frecuencia de riego y facilita la conservación de agua. Los biosólidos gracias a la MO, también son beneficiosos para mejorar la estructura del suelo. La materia orgánica ayuda a mantener la porosidad del suelo cosa que permite el paso del agua y aire a través del suelo.
- **Nitrógeno.** Es un nutrimento esencial en la nutrición de las plantas, que es principalmente absorbido como amonio (NH_4) y nitrato (NO_3). En los biosólidos está en forma de amonio, nitrato y nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico es liberado lentamente través del tiempo, abasteciendo continuamente a los cultivos y minimizando el movimiento potencial del agua en el subsuelo.

- Fósforo. Es un nutriente básico para el crecimiento de las plantas y está presente en todos los biosólidos en diferentes concentraciones.
- Micronutrientes. Se incluyen diferentes sales y metales, necesarios para el crecimiento de la planta y presentes en los biosólidos en diferentes cantidades.

Es importante destacar que el uso de estos lodos modifica las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo según relatan los autores (López y Castañeda, 2007):

- ✓ Aumenta la retención del agua.
- ✓ Mejora la estructura.
- ✓ Incrementa la CIC
- ✓ Aporta macronutrientes (N, P y K) y micronutrientes (Fe, S, Mo, Al, Ca, Mg y Zn) de manera prolongada, dándole más fertilidad.
- ✓ Incrementa la M.O.
- ✓ Aumenta la actividad microbiana y
- ✓ Ayuda a disminuir la contaminación por agroquímicos.

Riesgos:

El aprovechamiento de lodos residuales y biosólidos en suelos agrícolas representan una fuente contaminante debido a la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, organismos patógenos y nutrientes en exceso (Robledo, 2012).

- ✓ Microcontaminantes

Los lodos contienen, en poca cantidad, varios productos que pueden ser tóxicos para las plantas, presentar inconvenientes o hasta ser peligrosos para el hombre a través de las plantas. Estos

microcontaminantes pueden ser divididos en orgánicos y minerales (Gamrasni, 1985).

✓ Microorganismos patógenos

Los lodos, al igual que los suelos, contienen un número muy elevado de gérmenes inofensivos; pero junto con estos, en los lodos, están muy concentrados microorganismos de origen fecal que son igual de dañinos para los seres vivos (Gamrasni, 1985). Es necesario que los biosólidos sean especialmente tratados o desinfectados para destruir estos patógenos, que se presentan en concentraciones significativas de bacterias, virus y parásitos.

✓ Nutrientes en exceso (N, P y sales)

El nitrógeno puede ser aplicado en exceso, causando su acumulación en el suelo. El exceso de nitrógeno eventualmente se convertirá en nitratos que pueden pasar al agua del subsuelo. Se sabe que cantidades elevadas de nitratos (mayor de $10\text{Mg L}^{-1} \text{N-NO}_3$) en el agua son peligrosas para salud humana (Robledo, 2012).

Algunos biosólidos son ricos en minerales solubles, como calcio, magnesio, sodio, sulfatos y cloruros. Estas sales se pueden acumular en la zona radicular a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción causando quemado de hojas, clorosis, raquitismo a las plantas y en general, bajos rendimientos.

✓ Otros

El mal olor e insectos pueden ser causados si los biosólidos no han sido tratados adecuadamente antes de ser aplicados o si se los deja mojados por muchos días en la superficie del suelo.

2.9. Normatividad

El Diario Oficial de la Federación (DOF,2003) establece que los biosólidos por sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la Norma Oficial Mexicana NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002.PROTECCIÓN AMBIENTAL: LODOS Y BIOSÓLIDOS, ESPECIFICACIONES Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA SU APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL.

2.9.1. Especificaciones

2.9.1.1. Las personas físicas o morales interesadas en llevar a cabo el aprovechamiento o disposición final de los lodos y biosólidos a que se refiere esta Norma Oficial Mexicana, deberá de recabar la constancia de no peligrosidad de los mismos en términos del trámite SEMARNAT-07-007.

2.9.1.2. Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la especificación 2.9.1.1, pueden ser manejados como residuos no peligrosos para su aprovechamiento o disposición final como se establece en la presente Norma Oficial Mexicana (2002).

2.9.1.3. Para que los biosólidos puedan ser aprovechados, deben cumplir con la especificación 2.9.1.4, 2.9.1.5 y 2.9.1.6, que se encuentran establecidos en los cuadros 8, 9 y 10 de la presente Norma Oficial Mexicana.

2.9.1.4. Los generadores de biosólidos deben controlar la atracción de vectores, demostrando su efectividad. Para lo cual se pueden aplicar cualquiera de las opciones descritas, de manera enunciativa pero no limitativa. Se deben conservar los registros del control por lo menos durante los siguientes cinco años posteriores a su generación.

2.9.1.5. Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

2.9.1.6. El DOF (2003) establece que los límites máximos permisibles de metales pesados como se puede observar en el cuadro 8, también establece los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos como se muestra en el cuadro 9 y para el aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en el cuadro 10 con un contenido de humedad hasta el 85 por ciento.

Cuadro 8: Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (DOF, 2003).

Contaminante (Determinado en forma total)	Excelentes (Mg/Kg en base seca)	Buenos (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

Cuadro 9. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (DOF, 2003).

Clase	Indicador Bacteriológico de Contaminación.	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales (NMP/g en base seca.)	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca.	Huevos de helmintos/g en base seca.
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables.
NMP número más probable.

Cuadro 10. Aprovechamiento de biosólidos (DOF, 2003).

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. ✓ Los establecidos para clase B y C.
Excelente o Bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. ✓ Los establecidos para la clase C.
Excelente o Bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos forestales. ✓ Mejoramientos de suelo. ✓ Usos Agrícolas.

2.9.1.7. La aplicación de los biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia.

2.9.1.8. Para la disposición final de los lodos y biosólidos, éstos deben cumplir con la especificación 2.9.1.1 y con los límites máximos permisibles para el contenido del indicador de contaminación, patógeno y parásito especificado en el cuadro 9, para clase C.

2.10. Muestreo y análisis de lodos y biosólidos

El generador de lodos y biosólidos por medio de laboratorios acreditados debe realizar los muestreos y análisis correspondientes para demostrar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana y deberá conservar los registros por lo menos los siguientes cinco años posteriores a su realización.

2.10.1. La frecuencia de muestreo y análisis para los lodos y biosólidos se realizará en función del volumen de lodos generados como se establece en el cuadro 10 (DOF, 2003).

Cuadro 11. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos (DOF, 2003).

Volumen generado por año (Ton/Año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 1500 hasta 15000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 15000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Características y Ubicación de la Planta de Tratamiento.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Bosque Urbano (PTAR- Bosque Urbano) de Torreón, Coah, se encuentra situada en la colonia Miguel de la Madrid en la zona centro de Torreón Coah; en las coordenadas geográficas 25° 32' 58" Latitud Norte y 103° 23' 18" Longitud Oeste, con una elevación de 1123 msnm, en un área de 16 hectáreas como se muestra en la figura 4.

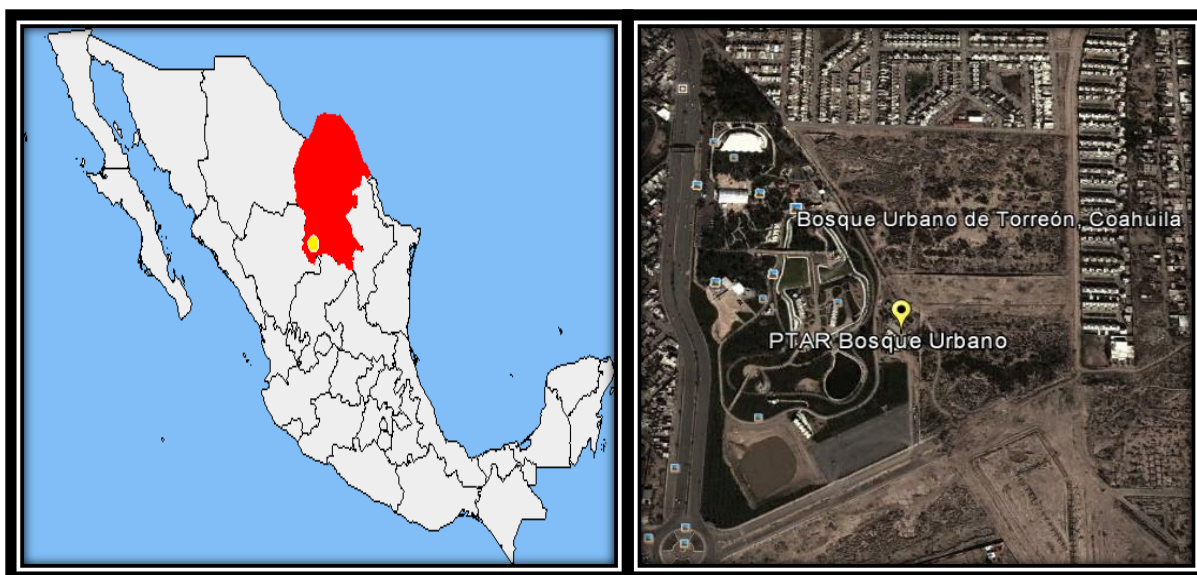


Figura 4. Ubicación geográfica del lugar de trabajo.

Está diseñada para tratar 5,000 litros por segundo (Lps) de aguas residuales. La planta fue construida para que su capacidad actual pueda ser fácilmente expandida al doble de su valor cuando sea requerido. La planta cuenta con cuatro componentes principales que son: tratamiento preliminar, primario, secundario y disposición de lodos.

3.2. Primera etapa (Muestreo)

Primeramente se realizó el muestreo en la PTAR del Bosque Urbano en Torreón Coah, tomándose dos muestras, la primera tomada del digestor aeróbico y la segunda de la disposición final de los biosólidos (lodo digerido) que dicha planta genera para posteriormente llevarlo, al laboratorio para su respectivo estudio.

Se utilizaron guantes, cubre bocas para evitar contraer alguna enfermedad o malestar. Una vez ubicada la salida de los lodos residuales (lodo digerido) se procedió a tomar un poco del material con una pala y una cubeta, para posteriormente vaciarla en un galón de plástico, para que este no se derramara utilizamos también un embudo.

3.3. Segunda etapa (Análisis de Laboratorio)

Una vez que se obtuvieron las muestras, se procedió a llevarlas al laboratorio donde se determinaron los parámetros correspondientes, establecidos para la calidad de los biosólidos, para la calidad de aguas y la calidad del suelo, para observar si esta cumple con las normas requeridas para la utilización del mismo en terrenos agrícolas (Bolívar y Moreno, 2012.) (Bolívar y Guerrero, 2013).

3.3.1. Parámetros de observación:

- ✓ Conductividad eléctrica (CE)
- ✓ Potencial de Hidrogeno (pH)
- ✓ Aniones (CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2+})
- ✓ Cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{2+})
- ✓ Metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc)
- ✓ Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)
- ✓ Demanda química de oxígeno (DQO)
- ✓ Sólidos totales suspendidos (TSS)
- ✓ Sólidos totales volátiles (TSV)
- ✓ Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF)
- ✓ Huevos de helmintos

3.3.1.1. Conductividad eléctrica (CE)

La determinación de conductividad se realizó midiendo la resistencia de la solución. La unidad básica de la conductividad es el $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, el recíproco de la unidad de resistencia.

Para determinar la CE se procedió a realizarla con la ayuda del conductivímetro YSI Incorporado (modelo 32) se tomaron 100 ml de muestra en un vaso de precipitado, introduciendo la celda de conductividad, mientras se espera a que la lectura se estabilice, para posteriormente tomar la lectura, se lava, se enjuaga y seca la celda para proseguir con las muestras siguientes.

3.3.1.2. Potencial de Hidrogeno (pH)

Para realizar la determinación del pH se tomaron 100 ml de la muestra por analizar y se vaciaron dentro de un vaso de precipitado de 150 ml, en donde se agregaron 50 ml de agua destilada con la cual se agita

perfectamente, con el fin de que las partículas permanezcan en suspensión durante la determinación del pH.

Luego se tuvo que esperar a que el aparato (Orion, modelo 420A) indique exactamente el pH de la solución. Posteriormente se introdujo el electrodo dentro de la muestra. Se tomó la lectura, se enjuagó y se secó el electrodo, para finalmente apagar el equipo.

3.3.1.3. Aniones (CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2+}).

Carbonatos (CO_3^-)

Se tomó una muestra y según la concentración de sales (C.E.), si es alta, se tomará una muestra de 2 cc, si no lo es, 2 cc en adelante, siendo preferentemente tomar 5 cc, se pasa este volumen a un matraz Erlen Meyer de 124 cc y se agregan 3 gotas de fenolftaleína al 1 por ciento. Adquiere coloración rosa cuando hay presencia de carbonatos, si no hay coloración no tendremos presencia de éstos. Cuando se adquiere color rosa, se tituló con ácido sulfúrico al 0.01 N hasta el momento en que el color desaparece y en base a la lectura se procedió a realizar los cálculos.

Cálculos:

$$\text{Meq/l de } \text{CO}_3^- = \frac{\text{cc gastados } \text{H}_2\text{SO}_4^{2+} * \text{N} * 1000}{\text{cc de muestra}}$$

Bicarbonatos (HCO_3^-)

Para su determinación se tomaron las muestras, según la conductividad eléctrica de cada una; si ésta es alta en concentración, se toma una muestra de 1 cc si no lo es, se puede tomar 5 cc agregando después 5 cc de agua destilada para tener un volumen mayor y poder apreciar mejor el

cambio al titular. Después se añaden 2 gotas de indicador de anaranjado de metilo al 0.01 por ciento.

Se tituló con ácido sulfúrico a 0.01 N; hasta el primer cambio de color que será anaranjado y se designa la lectura para los cálculos.

$$\text{Meq/l de HCO}_3^- = \frac{\text{cc gastados de H}_2\text{SO}_4 \text{ al titular} * \text{N} * 1000}{\text{cc de muestra}}$$

Cloruros (Cl⁻)

Se tomaron muestras proporcionales para analizarlas (1 cc si la conductividad eléctrica es menor de 7 y 0.05 cc si es mayor de 7, de la misma manera en agua, pero en dS.m⁻¹), se le agregaron 5 cc de agua destilada y 2 gotas de indicador, luego se procede a titularla con nitrato de plata y se debe de apreciar el cambio de color amarillo a color ladrillo.

Cálculos:

$$\text{Meq/l de Cl} = \frac{(\text{cc gastados de AgNO}_3 \text{ en la muestra} - \text{cc gastados en testigo}) * \text{N} * 100}{\text{cc muestra.}}$$

Sulfatos (SO₄²⁺)

A continuación se describe la metodología a seguir para la determinación de este parámetro.

- ✓ En un matraz Erlen Meyer se tomaron las muestras, se le agregaron 5 gotas de anaranjado de metilo y 1 cc de ácido clorhídrico concentrado.

- ✓ Se colocaron los matraces en las mantas de calentamiento y antes de que empiezo la ebullición se agregaron 5 cc de cloruro de Bario y se dejó hervir aproximadamente 3 minutos a que se redujera un poco la muestra.
- ✓ Se secó y se enfrió; ya frío se filtró la muestra, haciendo lavados frecuentes (el filtro es papel No. 42 y sin cenizas).
- ✓ El papel filtro se dobló y se acomodó en un crisol de arcilla y se metió a la mufla a 550°C por 24 horas aproximadamente, o hasta que las cenizas aparecieran blancas.
- ✓ Se sacó de la mufla y se puso en una cápsula de secado y ya que se enfrió se pesó con la muestra y el crisol solo.

Cálculos:

$$\text{Meq/l de SO}_4^{2+} = \frac{\text{gr de BaSO}_4 * 8568.2}{\text{cc de muestra}}$$

Crisol + Muestra

- Crisol solo

gr de BaSO₄

3.3.1.4. Cationes (Ca²⁺, Mg²⁺ y Na²⁺)

Calcio (Ca²⁺)

Para la determinación de este catión se tomó una muestra proporcional (5 cc), se le agrego 1 cc de Hidróxido de Sodio (NaOH₄ N) y como indicador, una pizca de Murexide, la coloración cambia de rosa o morada, titulándose con Etilen Diamino Tetrasodico (EDTA).

Cálculos:

$$\text{Meq/l de Ca}^{2+} = \frac{\text{cc gastados EDTA} * \text{N} * 1000}{\text{cc de muestra}}$$

Magnesio (Mg^{2+})

Para llevar a cabo su determinación se tomó una muestra proporcional (5 cc) se pone en el matraz Erlen Meyer, agregándole 1 cc de una solución amortiguadora y como indicador, 2 gotas de ericromato negro T, luego se titula con EDTA 0.01N, viendo el cambio de color del que presenta al poner el indicador color azul.

Cálculos:

$$\text{Meq/l de Ca + Mg} = \frac{\text{cc gastados EDTA} * \text{N} * 1000}{\text{cc de muestra}}$$

Sodio (Na^{2+})

Para la determinación de este parámetro se procedió a realizar lo siguiente:

- ✓ Se puso a peso constante un crisol de capa porosa (peso 1).
- ✓ Se tomaron 10 ml de la muestra en un vaso de precipitado y se puso a evaporar en una parrilla hasta que se tuvieran pocos residuos.
- ✓ Para después agregarle 20 ml de acetato de uranilo y zinc.
- ✓ Ponerse a agitar por 3 hr, pasado este tiempo se dejó reposar por 1 hr.
- ✓ Se filtró con ayuda del crisol de capa porosa y enjuagando con 10ml de alcohol y con 10 ml de éter etílico.
- ✓ Se metió a la estufa para secarla y después se le tomo el peso del crisol con el precipitado (peso 2)

$$\text{Meq/l de Na}^{2+} = \frac{(\text{Crisol + precipitado}) - (\text{Crisol solo}) * 650.16}{\text{ml de muestra}}$$

3.3.1.5. Metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, y zinc).

Para la determinación de los metales pesados en los biosólidos, se utilizó la espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con el cual también se puede determinar otros metaloides en diversas matrices (fluidos biológicos, alimentos, filtros de captación ambiental).

3.3.1.6. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Para obtener este parámetro se procedió a seguir la siguiente metodología.

- ✓ Se tomaron 100 ml de muestra y se añadieron 10 ml de H₂SO₄ al 2 por ciento y 10 ml de KI al 10 por ciento.
- ✓ Se tituló con Na₂SO₃ y almidón como indicador para determinar la cantidad exacta para neutralizar la cantidad de cloro presente.
- ✓ Se procedió a decolorar la cantidad de muestra que se requiera para el análisis en otro matraz Erlenmeyer.
- ✓ Se dejó reposar 10 minutos antes del análisis.
- ✓ Se llenaron todas las botellas con agua aereada hasta el cuello, un juego taparlo, cubrir con parafilm e incubar por 5 días. Al otro juego determinar el oxígeno disuelto inicial (15 min a partir que se llene la primera botella).

Cálculos:

$$DBO = \frac{(ODI - ODF - OBK \text{ ci}) * 300}{\text{ml de muestra}}$$

Dónde:

ODI = Oxígeno Disuelto Inicial.

ODF = Oxígeno Disuelto Final.

OBK ci = Oxígeno consumido por el blanco con inóculo.

3.3.1.7. Demanda química de oxígeno (DQO).

A continuación se describe la metodología a seguir para la determinación de este parámetro.

- ✓ Se tomaron 20 ml de muestra diluida a 20 ml., con pipeta volumétrica, luego se pasó a un matraz Erlen Meyer de 250 ml.
- ✓ Se le agregó una pizca de sulfato mercúrico.
- ✓ Se le añadió 25 ml de dicromato de potasio 0.25N con pipeta volumétrica y mezcló con movimientos circulares.
- ✓ Se agregó también 30 ml de solución de ácido sulfúrico-sulfato de plata en forma lenta y mezclándola.
- ✓ Se llevó al aparato de reflujo, a partir de que empezó la ebullición dejó por dos horas.
- ✓ Terminado el período de reflujo, apagó la parrilla y se lavó el refrigerante con aproximadamente 100 ml de agua destilada, se dejó enfriar.
- ✓ Se agregaron 5 gotas de ortofenantrolina y titular con SAF, el cambio es de azul verdoso a marrón rojizo.
- ✓ Al mismo tiempo se hizo un blanco con los mismos reactivos con un volumen de agua igual al de la muestra.

Cálculos:

$$\text{DQO mg/lto} = \frac{(V2 - V1) * N * 8 * 1000}{V3}$$

Dónde:

V1 = Volumen del SAF (Sulfato de Amonio Ferroso) requerido en la titulación del blanco.

V2 = Volumen del SAF requerido en la titulación de la muestra.

V3 = Volumen de la muestra.

N = Normalidad del SAF

8 = Equivalente químico del Oxígeno

3.3.1.4. Sólidos totales suspendidos (TSS)

A continuación se describe la metodología a seguir para la determinación de este parámetro.

- ✓ Se llevó a peso constante un crisol Gooch por 2 horas a 550°C ya con el filtro de fibra de vidrio.
- ✓ Se enfrió en el desecador y se le tomo el peso (peso 1)
- ✓ Se colocó el crisol Gooch en el matraz kitasato y se le aplico el vacío humedeciendo con agua destilada para fijar el filtro en el crisol y a la vez corroborar que el filtro se encontrara integro.
- ✓ Se homogenizo la muestra y se midió exactamente la muestra seleccionada.
- ✓ Se pasó la muestra a través del filtro con ayuda de vacío, hasta que ya no se observe que escurra muestra.
- ✓ Se le suspendió el vacío y se secó el residuo en la estufa de secado a 105°C por una hora.
- ✓ Cuando el tiempo se pasó éste se sacó y se dejó enfriar en el desecador.

- ✓ Para posteriormente volver a pesar el crisol (peso 2)

b) Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

- ✓ Luego el crisol que contenía el residuo de los SST se llevó la mufla por 40 minutos a una temperatura de 550°C
- ✓ Pasado éste tiempo se dejó enfriar en un desecador.
- ✓ Para obtener a continuación en peso del crisol (peso 3)

Cálculos:

$$\text{Sólidos Suspendidos totales mg/lit} = \frac{(\text{Peso2} - \text{Peso1}) * 1000 * 1000}{\text{muestra}}$$

Dónde:

Peso 1 = Peso del crisol sin la muestra

Peso 2 = Peso del crisol con el residuo seco

Muestra= Cantidad de muestra en ml.

$$\text{Sólidos Suspendidos Volátiles mg/lit} = \frac{(\text{Peso2} - \text{Peso3}) * 1000 * 1000}{\text{Muestra}}$$

Dónde:

Peso 3 = Peso del crisol después de 15 minutos de combustión

Peso 2 = Peso del crisol con el residuo seco

Muestra = Cantidad en ml

Sólidos Suspendidos Fijos = SST –SSV

3.3.1.9. Sólidos totales volátiles (TSV)

Para la determinación de este parámetro a continuación se describe la metodología a seguir.

- ✓ Se Llevó a peso constante la cápsula de porcelana por una hora a 550°C
- ✓ Se dejó enfriar en el desecador y se pesó (peso 1)
- ✓ Se homogenizo la muestra y se midió para después llevarla a la capsula.
- ✓ Se evaporo la muestra hasta que solamente quedo 2 ml, aproximadamente.
- ✓ Posteriormente se llevó la muestra a la estufa a una temperatura de 105°C hasta que se secura.
- ✓ Finalmente se enfrió en el desecador y se tomó nuevamente el peso (peso 2).

Cálculos:

$$\text{Sólidos Totales mg/lit} = \frac{(\text{Peso2} - \text{Peso1}) * 1000 * 1000}{\text{Muestra}}$$

Dónde:

Peso 1= Peso de la cápsula sin la muestra

Peso 2= Peso de la cápsula con el residuo seco

Muestra =Muestra en ml o gr.

$$\text{Sólidos Totales Volátiles mg/lit} = \frac{(\text{Peso2} - \text{Peso3}) * 1000 * 1000}{\text{Muestra}}$$

Dónde:

Peso 3= Peso de la cápsula después de 30 minutos en combustión.

Peso 2= Peso de la cápsula con el residuo seco

Muestra =Muestra en ml o gr.

3.3.1.10. Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF)

Para la determinación del número más probable (NMP) de Coliformes Totales y Fecales en este tipo de aguas, fue necesario preparar diluciones decimales de la muestra, debido a que se espera que la concentración de coliformes sea superior en estas muestras. El número de diluciones varía mucho, dependiendo del origen de la muestra a tratar. Por lo demás, para su análisis se procedió en la misma forma que para una muestra de agua potable.

Técnica Prueba presuntiva:

Todas las operaciones se realizaron en absolutas condiciones de esterilidad.

- ✓ Se agitó vigorosamente la muestra por lo menos 20 veces para lograr una distribución uniforme de los microorganismos.
- ✓ Dependiendo del origen de la muestra y el contenido bacteriano esperado, se prepararon las diluciones.
- ✓ Para preparar las diluciones, con una pipeta estéril se tomó una muestra de 1 ml de la muestra original y se llevó a uno de los tubos conteniendo 9 ml de agua de dilución estéril, obteniendo de esta manera una dilución de 10^{-1} .
- ✓ Se agito el tubo de la dilución 10^{-1} y con otra pipeta estéril se tomó una muestra de 1 ml y se llevó a otro tubo con 9 ml de agua de dilución estéril para obtener una dilución de 10^{-2} .
- ✓ Se procedió de la misma manera hasta obtener una dilución de 10^{-3} .

- ✓ Se Inoculó asépticamente con 1 ml de muestra por quintuplicado de cada dilución, tubos de fermentación conteniendo caldo lactosado.
- ✓ Se incubaron todos los tubos a una temperatura de 35 °C durante 24-48 horas.
- ✓ Después de 24 horas de incubación se tomó una primera lectura para observar si hay tubos positivos, es decir, con producción de ácido, si el medio contiene un indicador de pH, turbidez o producción de gas en el interior de la campana Durham.
- ✓ De los tubos que en la primera lectura den positivos, ya se pueden hacer las pruebas confirmatorias para coliformes totales y coliformes fecales.
- ✓ En caso de no apreciarse crecimiento en el resto de los tubos, continuarán en incubación 24 horas más.
- ✓ Después de 48 horas (± 2 h) a partir de la inoculación, se hace la lectura final.
- ✓ Si pasadas 48 hr tampoco se aprecia crecimiento ni producción de gas, los tubos se toman como negativos.

Interpretación:

- ✓ Si el total de tubos son NEGATIVOS: El examen se da por terminado, reportando la AUSENCIA DE COLIFORMES TOTALES Y FECALES en la muestra analizada.
- ✓ Todos aquellos tubos que den POSITIVOS para prueba presuntiva se anotarán convenientemente y se procederá a realizar la PRUEBA CONFIRMATORIA para Coliformes Totales y Fecales.

Prueba confirmatoria para coliformes totales:

- ✓ A partir de cada uno de los tubos que han resultado positivos en la prueba presuntiva, agitándolos para homogenizar, inocular con tres asadas tubos conteniendo caldo Lactosa Bilis Verde Brillante (LBVB).
- ✓ Incubar durante 48 ± 3 hr a 35 ± 0.5 °C.
- ✓ Después de la incubación observar la presencia de turbidez y de gas.

Interpretación:

- ✓ Si se observa turbidez y producción de gas: La prueba se considera POSITIVA, debiendo anotar el número de tubos positivos para posteriormente hacer el cálculo del NMP.
- ✓ Si en ninguno de los tubos se observa producción de gas, aun cuando se observe turbidez: Se consideran NEGATIVOS, estableciéndose el Código 0,0,0 para efecto del cálculo del NMP.
- ✓ Si todos los tubos dan negativos o todos dan positivos, con base en los grados de dilución analizados, considerar la necesidad de repetir el análisis a partir de grados de dilución menores (mayores volúmenes de muestra) o mayores (menores volúmenes de muestra), respectivamente.

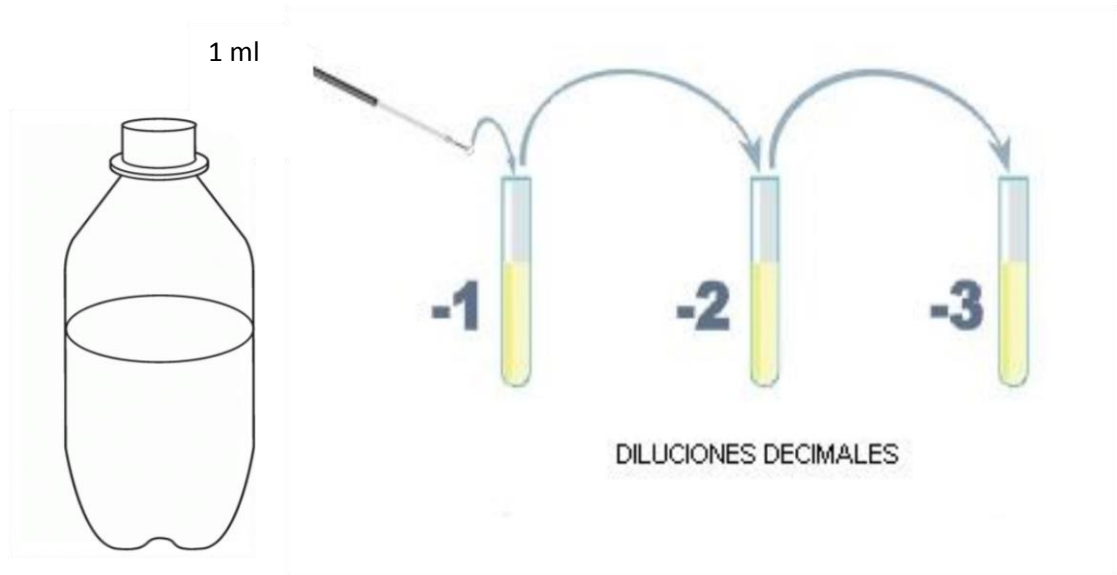
Prueba confirmatoria para coliformes fecales:

- ✓ A partir de cada uno de los tubos que han resultado positivos en la prueba presuntiva, agitándolos para homogeneizar, inocular con tres asadas tubos conteniendo caldo E.C. (*Escherichia coli*).
- ✓ Incubar durante 24 horas a 44.5 ± 0.2 °C. y después de este período, observar presencia de turbidez y gas.

Interpretación:

- ✓ Si se observa turbidez y producción de gas: La prueba se considera POSITIVA, debiendo anotar el número de tubos positivos y establecer el código para posteriormente hacer el cálculo del NMP.
- ✓ Si no se observa producción de gas, aun cuando se observe turbidez: Se consideran negativos, estableciéndose el Código 0,0,0 para efecto del cálculo del NMP.
- ✓ Si todos los tubos dan negativos ó todos dan positivos, con base en los grados de dilución analizados, considerar la necesidad de repetir el análisis a partir de grados de dilución menores (mayores volúmenes de muestra) ó mayores (menores volúmenes de muestra), respectivamente.

A continuación se muestra en la figura 5 los procedimientos para la determinación de coliformes totales y fecales, y en la figura 6 podemos ver la interpretación de los coliformes totales y fecales, puesto que en ella podemos observar el índice del NMP y límite confiable de 95 por ciento para varias combinaciones de resultados positivos y negativos.



	Diluciones	Vol. real de muestra	Positivos
	10^{-1}	0.1	5
	10^{-2}	0.01	2
	10^{-3}	0.001	1

Gas

No Gas

Figura 5. Procedimiento y análisis de los resultados de los coliformes totales y fecales.

No. de tubos con reacciones positivas			Índice del NMP por 100 cm ³	Límite confiable de 95%		No. de tubos con reacciones positivas			Índice del NMP POR 100 cm ³	Límite confiable de 95%	
5 tubos con 10 cm ³	5 tubos con 1 cm ³	5 tubos con 0.1 cm ³		Interior	Superior	5 tubos con 10 cm ³	5 tubos con 1 cm ³	5 tubos con 0.1 cm ³		Interior	Superior
0	0	0	<2								
0	0	1	2	<0.5	7	4	2	1	26	9	78
0	1	0	2	<0.5	7	4	3	0	27	9	80
0	2	0	4	<0.5	11	4	3	1	33	11	93
						4	4	0	34	12	93
1	0	0	2	<0.5	7						
1	0	1	4	<0.5	11	5	0	0	23	7	70
1	1	0	4	<0.5	11	5	0	1	31	11	89
1	1	1	6	<0.5	15	5	0	2	43	15	110
12	2	0	6	<0.5	15	5	1	0	33	11	93
						5	1	1	46	16	120
2	0	0	5	<0.5	13	5	1	2	63	21	150
2	0	1	7	1	17						
2	1	0	7	1	17	5	2	0	49	17	130
2	1	1	9	2	21	5	2	1	70	23	170
2	2	0	9	2	21	5	2	2	94	28	220
2	3	0	12	3	28	5	3	0	79	25	190
						5	3	1	110	31	250
3	0	0	8	1	19	5	3	2	140	37	340
3	0	1	11	2	25						
3	1	0	11	2	25	5	3	3	180	44	500
3	1	1	14	4	34	5	4	0	130	35	300
3	2	0	14	4	34	5	4	1	170	43	490
3	2	1	17	5	46	5	4	2	220	57	700
3	3	0	17	5	46	5	4	3	280	90	850
						5	4	4	350	120	1,000
4	0	0	13	3	31	5	5	0	240	68	750
4	0	1	17	5	46	5	5	1	350	120	1,000
4	1	0	17	5	46	5	5	2	540	180	1,400
4	1	1	21	7	63	5	5	3	920	300	3,200
4	1	2	26	9	78	5	5	4	1600	640	5,800
4	0	0	22	7	67	5	5	5	=<2400		

Figura 6. Índice del NMP y límite confiable de 95% para varias combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se usan: 5 tubos con porciones de 10 cm³ en cada uno, 5 con porciones de 1 cm³ y con 5 porciones de 0.1 cm³ (Bolívar y Moreno, 2012).

Resultados y Cálculos:

De acuerdo a los tubos positivos en las pruebas confirmativas para Coliformes Totales y Fecales, establecer los códigos correspondientes para calcular por referencia en las tablas estadísticas el NMP de Coliformes Totales y Fecales en 100 mL de agua.

En general se tiene:

Los resultados obtenidos se expresarán de la siguiente manera:

NMP DE COLIFORMES TOTALES: _____ / 100 mL

NMP DE COLIFORMES FECALES: _____ / 100 mL

3.3.1.11. Determinación de huevos de helmintos

A continuación se describe la metodología a seguir para la determinación de este parámetro.

- ✓ Se preparó y se desinfectaron recipientes de 2 lt para recolectar la muestra
- ✓ Se dejó sedimentar la muestra por tres horas o toda la noche
- ✓ Se procedió a filtrar 300 ml de la muestra con el papel filtro de 160 mm
- ✓ Se dejó sedimentar durante tres horas
- ✓ Se tomaron 250 ml y se centrifugo a 400 g por 3 min
- ✓ Se decantó en 150 ml de sulfato de zinc
- ✓ Para luego se homogeneizo y se centrifugo a 400 g por 3 min
- ✓ Se recuperó el sobrenadante y se diluyo en 100 ml de agua destilada y se dejó sedimentar por tres horas
- ✓ Se vertió el líquido en dos tubos de centrifuga de 50 ml y nuevamente se centrifugo a 480 g por 3 min
- ✓ Se decantó en la solución de alcohol-acido adicionando 10 ml de éter etílico a cada tubo
- ✓ Se agitó, se abrió y se centrifugo por 10 min más
- ✓ Se decantó hasta dejar 1 ml
- ✓ Por último se montó la camarilla de Neubauer con la suspensión de los tubos y realizo la observación con el microscopio

En la figura 7 se muestra la cuadrícula de la cámara de Neubauer, para realizar el conteo de los huevos de helminto se observa que la cuadrícula se divide en cinco cuadros de 1mm X 1mm, el cuadro central se subdivide en 25 cuadrículas de 0.2mm X 0.2mm es en estas cuadrículas donde se realiza el conteo. Tomando en cuenta los cuatro cuadros de las esquinas y el cuadro central se realiza el conteo de huevecillos sumando el conteo y se aplica la siguiente fórmula.

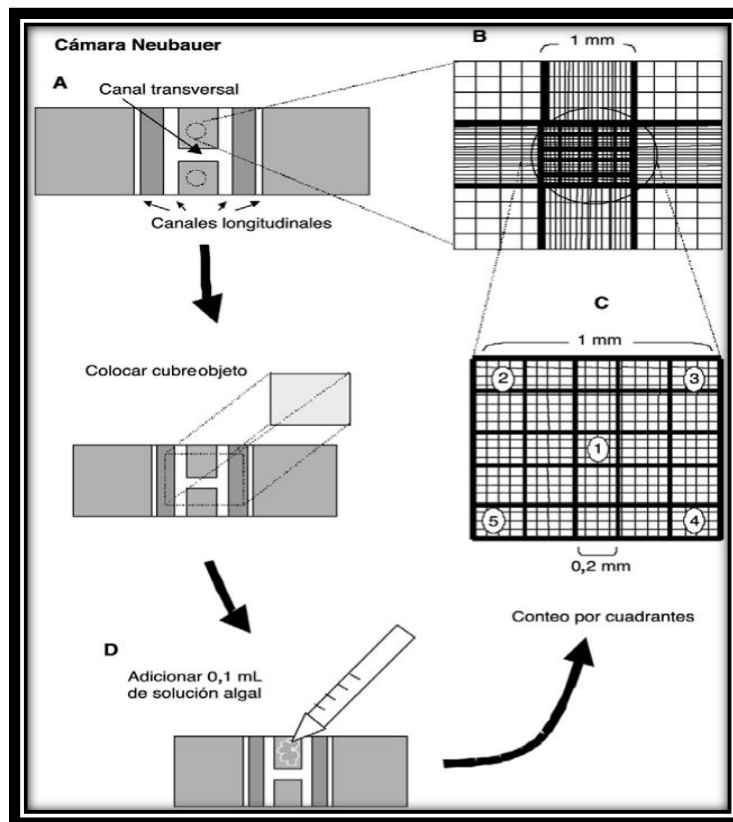


Figura 7. Cuadrícula de la cámara de Neubauer (Bolívar y Moreno, 2012).

Cálculos:

$$\text{Partículas por } \mu\text{l volumen} = \frac{\text{Partículas Contadas}}{\text{Superf. cont. (mm}^2\text{)} * \text{Profundidad de la cámara (mm)} * \text{Dilución}}$$

Dónde:

Partículas contadas: Sumatoria de las partículas en las 5 cuadrículas de 0.2 mm X 0.2 mm

Superficie contada (mm²): 5 cuadrados medianos correspondientes a 0.2 mm²

Profundidad de la cámara: 0.1 mm

Factor de dilución: 1:200

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestra la tabla de resultados obtenidos durante los análisis de laboratorio de los biosólidos.

Cuadro 12. Resultados obtenidos en el laboratorio.

Parámetro	Lodo del Digestor Aeróbico (M ₁)		Lodo Digerido (M ₂)	
Conductividad eléctrica (CE)	CE= 1165 μ s		CE= 1432 μ s	
Potencial de Hidrogeno (pH).	pH= 7.00		pH= 6.21	
Aniones (CO ₃ ⁼ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ y SO ₄ ²⁺). (Meq/lto) a (ppm)	CO ₃ ⁼ = 2.50 HCO ₃ ⁻ = 10.40 Cl ⁻ = 5.79 SO ₄ ²⁺ = 0.4798	CO ₃ ⁼ = 75 HCO ₃ ⁻ = 634 Cl ⁻ = 202 SO ₄ ²⁺ = 23	CO ₃ ⁼ = 0.8 HCO ₃ ⁻ = 8.4 Cl ⁻ = 6.99 SO ₄ ²⁺ = 0.8568	CO ₃ ⁼ = 24 HCO ₃ ⁻ = 512 Cl ⁻ = 244 SO ₄ ²⁺ = 41
Cationes (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Na ²⁺). (Meq/lto) a (ppm)	Ca ²⁺ = 2.60 Mg ²⁺ = 5.65 Na ²⁺ = 5.77	Ca ²⁺ = 52 Mg ²⁺ = 67 Na ²⁺ = 132	Ca ²⁺ = 18 Mg ²⁺ = 15.4 Na ²⁺ = 4.36	Ca ²⁺ = 360 Mg ²⁺ = 184 Na ²⁺ = 200
Metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, y zinc)	As = 0.4 Mg / Kg Cd = 0.4 Mg / Kg Cu= 6 Mg / Kg Cr = 1.5 Mg / Kg Hg= 0.02 Mg / Kg Ni= 4 Mg / Kg Pb= 1 Mg / Kg Zn= 20 Mg / Kg			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).	159 Mg/lto		52 Mg/lto	
Demanda química de oxígeno (DQO).	346 Mg/lto		106 Mg/lto	
Solidos totales suspendidos (TSS).	85 Mg/lto		40 Mg/lto	
Solidos totales volátiles (TSV).	45 Mg/lto		20 Mg/lto	
Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales. (CF).	CT= 540 NMP CF= 250 NMP		CT= 59 NMP CF= 14 NMP	
Huevos de helmintos.	2 Huevos		0 Huevos	

Lodo del Digestor Aeróbico:

- ✓ La conductividad eléctrica (CE) es baja lo cual nos indica una baja cantidad de sólidos y de elementos que son de mucha importancia
- ✓ Tiene un pH neutro lo cual indica una estabilidad en la retención de metales, por consecuente se evitaría la contaminación de los mantos acuíferos
- ✓ Contiene una cantidad considerable de aniones, lo cual significa que no tendremos problemas con las sales
- ✓ Dentro de los cationes, tenemos que en cuanto a calcio este es muy pobre a diferencia del magnesio el cual si esta enriquecido y con una buena cantidad de sodio el cual no causara problemas de salinidad
- ✓ Respecto a los metales pesados, ambas muestras contienen una mínima cantidad, las cuales los hacen recomendables para uso agrícola.
- ✓ Se requiere de una cantidad considerable de oxígeno para que los microorganismos puedan oxidar la materia orgánica (DBO⁵)
- ✓ Para esta muestra se requiere una cantidad alta de oxígeno para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica y la inorgánica (DQO)
- ✓ En cuanto a los sólidos totales (suspendidos y volátiles) contiene una cantidad considerable, puesto que la muestra se encuentra en su totalidad en forma líquida
- ✓ En esta muestra se puede observar que se tiene una cantidad alta, en cuanto a coliformes totales y fecales
- ✓ En cuanto a los huevos de helmintos en esta muestra encontramos a dos huevos, de acuerdo con la NOM-004-semarnat-2002, este biosólido se puede considerar de la clase B

Lodo Digerido:

- ✓ La conductividad eléctrica es alta, lo cual nos indica que en el material existe una cantidad considerable de sólidos y de elementos que son de mucha importancia para las plantas y el suelo mismo
- ✓ Tiene un pH ligeramente ácido, lo cual indica que hay posibilidades de que se presente lixiviación de metales, afectando así los mantos acuíferos
- ✓ Contiene una cantidad considerable de aniones, lo cual significa que no tendremos problemas con las sales
- ✓ Dentro de los cationes, tenemos que en cuanto a calcio este es muy pobre a diferencia del magnesio el cual si está enriquecido y con una buena cantidad de sodio el cual no causará problemas de salinidad
- ✓ Se requiere una cantidad mínima de oxígeno para que los microorganismos puedan oxidar la materia orgánica
- ✓ Para esta muestra se requiere una cantidad considerable de oxígeno para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica y la inorgánica
- ✓ En cuanto a los sólidos totales (suspendidos y volátiles) contiene una cantidad considerable, puesto que la muestra se encuentra en su totalidad en una forma más sólida
- ✓ En esta muestra se puede observar que se tiene una cantidad mucho más baja que en la muestra anterior, en cuanto a coliformes totales y fecales
- ✓ En cuanto a los huevos de helmintos en esta muestra no se encontraron huevos en el lodo, lo cual indica que esta muestra si la podemos utilizar para uso agrícola (clase C) según la NOM-004-semarnat-2002

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A la conclusión que se llegó, al realizar este trabajo de investigación es, que en ambas muestras sí se pueden reutilizar los biosólidos en los suelos agrícolas, puesto que estas cumplen las normas oficiales establecidas por el diario oficial de la federación, en cuanto a los niveles máximos permisibles de patógenos y de metales pesados.

Los biosólidos que se analizaron contienen buena calidad agronómica, para ser aplicados al suelo, por lo tanto si se recomienda la reutilización como abono orgánico, ya que éste contiene una buena cantidad de materia orgánica y elementos que son de importancia para las plantas.

Lo más recomendable para estos biosólidos, es dar un tratamiento previo a su aplicación a los suelos agrícolas, un tratamiento adecuado sería la del secado, puesto que esta elimina más el contenido de agua y al aplicar calor mata patógenos teniendo así una desinfección uniforme del lodo residual. Además de que este tipo de tratamiento baja considerablemente el potencial de olores y la actividad biológica como ya se mencionó con anterioridad.

Considerando que al estar con menos cantidad de agua , los lodos pueden ser más económicos en cuanto a traslado de material y su distribución sobre los campos, ya que éste se puede realizar con equipos que comúnmente se utilizan para las labores del campo.

6. LITERATURA CITADA

Bolívar, D.M. y Moreno, G.A.P. 2012. Manual de prácticas de aguas residuales. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo Coahuila, México. 32 pág.

Bolívar, D.M. y Guerrero, M.S. 2013. Manual de prácticas de suelos salinos y sódicos. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 26 pág.

Carmona, P.E. 2006. Efectos de la aplicación de lodo residual como mejorador de suelos agrícolas. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo Coah, México. 80 pág.

Diario Oficial de la Federación, 2003. NOM-004-SEMARNAT-2002.

Flores, T.F.J., Flores, P.L. 2005. Los biosólidos de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Aguascalientes: características y uso. Investigación y ciencia. Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.

Gamrasni, M. a. 1985. Aprovechamiento Agrícola de las aguas negras urbanas. Editorial Limusa. México.

López, V.R. y Castañeda N.H.J. 2007. Biosólidos una Oportunidad en la Agricultura, Comisión Estatal del Agua (CEA). Jalisco México.

Martínez, R.E. 1998. Estudio para determinar el uso de lodos residuales sobre los suelos agrícolas de cuatro municipios de Nuevo León. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah, México. 206 pág.

Merli, G.F., Ricciuti, N.O.2009. Microbiología de las aguas residuales - Aplicación de Biosólidos en Suelo, Universidad Tecnológica Nacional. edUTecNe. Facultad Regional Bahía Blanca, Argentina.

Pissani, Z.J.F., Guzmán, R.J.L. 1999. Evaluación preliminar de la aplicación de lodos en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). FAUANL-DYCUSA-SADM. Marín, N.L. México. 46p.

Robledo, S.E. 2012. Manejo y Uso de biosólidos en suelos Agrícolas. Doctorado. Colegio de Postgraduados institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 170 pág.

U.S. EPA. 1984. Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA/625/1084/003. Cincinnati, OH.

U.S. EPA. 1990. National Sewage Sludge Survey: Availability of information and data, and anticipated impacts on proposed regulations. Fed. Reg. 55(218).

U.S. EPA. 1995a. Process design manual: Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage EPA/625/R-95/001. Cincinnati, OH. E.U.A