

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERIA



**EXTRACCIÓN SECUENCIAL DE METALES PESADOS EN LODOS DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UAAAN**

Por:

Griselda López García

Tesis

**Presentada como Requisito Parcial Para
Obtener el Título de:**

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio de 2013.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERIA

Extracción secuencial de metales pesados en lodos de la planta de
tratamiento de aguas residuales de la UAAAN

Por:

Griselda López García

TESIS

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador, Como Requisito
Parcial Para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobado Por:

Asesor principal



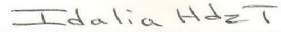
Dr. Edmundo Peña Cervantes

Sinodal



Dr. Rubén López Cervantes

Sinodal



M.C. Idalia María Hernández Torres

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la división de ingeniería



Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio de 2013.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme la oportunidad de existir, de vivir, por permitirme despertar día con día, por estar siempre conmigo y no abandonarme a pesar de todo, por sus lecciones de vida, por consentirme el poder vivir esta experiencia única, inigualable e irrepetible, y dejarme culminar una de mis metas en la vida.

A mi “Alma Terra Mater”

Mi querida Universidad, agradezco el permitirme conocer a mis maestros y amigos, todos los buenos momentos, por las convivencias, las experiencias, por el importante aporte que hizo a mi vida personal y profesional, y por permitirme llevar tu nombre y ser, a quien debo mi formación y desarrollo.

A mis asesores

En especial al Dr. Edmundo Peña Cervantes por su amabilidad, buena disposición, paciencia, sus conocimientos, su experiencia, por el tiempo que me dedico y quien con su motivación ha logrado que este trabajo culminara exitosamente, mi agradecimiento sincero.

A la M.C. Idalia María Hernández Torres y el Dr. Rubén López Cervantes por sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis y sus atinadas correcciones.

DEDICATORIAS

En primer lugar les dedico este trabajo a mis padres Yolanda García y Lorenzo López por que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino. Los quiero mucho

A ti mamá porque de forma incondicional, entendiste mis ausencias y mis malos momentos. Y que a pesar de la distancia siempre estuviste atenta y dándome apoyo y la fortaleza necesaria para seguir adelante.

Con profundo agradecimiento a ti papá, por ayudarme a la construcción de mi proyecto de vida y hacer que verdaderamente crea en mí. Gracias papá por tu amor y por tu comprensión, eres quien hizo que todo esto fuera posible, a ti te debo gran parte de lo que soy.

A mi pequeño Santiago a ti mi amor que te he robado horas de convivencia por terminar mi carrera, a pesar de estar tan pequeño has sido la persona mas importante en mi vida y mi mayor motivación, eres un angelito, el regalo mas grande que la vida me ha dado. Te amo y este y todos mis logros son para ti.

A mis hermanos Christian y David gracias por todo su apoyo moral, por sus motivaciones y buen sentido del humor que muchas veces me liberaron de las presiones y el estrés. Los quiero.

Naye tu has sido un gran apoyo para mí, por que no me dejaste sola en estos cinco años y estas en los momentos que más te he necesitado, y por acompañarme cuando me he sentido sola, por los momentos difíciles y divertidos que pasamos juntas.

Amigos Daly, Karen, Silvia, Egrid, Mariano, German, Luis, Mauricio, Germin, gracias por su apoyo y compañía que hicieron que mi estancia en la universidad fuera más agradable los quiero mucho.

INDICE DE CONTENIDO

	AGRADECIMIENTOS.....	i
	DEDICATORIAS.....	ii
	INDICE DE CUADROS.....	v
	INDICE DE FIGURAS.....	v
	RESUMEN.....	vi
I.	INTRODUCCIÓN.....	1
	OBJETIVOS.....	3
	HIPÓTESIS.....	3
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
	2.1 Definición de lodos residuales.....	4
	2.2 Producción de lodos durante el proceso de tratamiento de aguas residuales.....	5
	2.2.1 Etapas del tratamiento del agua residual.....	5
	2.2.1.1 Tratamiento preliminar.....	5
	2.2.1.2 Tratamiento primario.....	6
	2.2.1.3 Tratamiento secundario.....	6
	2.2.1.4 Tratamiento terciario.....	7
	2.3 Tipos de lodos dependiendo del agua residual.....	7
	2.3.1 Lodo primario.....	7
	2.3.2 Lodo secundario.....	8
	2.3.3 Lodo terciario.....	8
	2.4 Caracterización física, química y microbiológica de los lodos..	8
	2.4.1 Sólidos suspendidos totales.....	9
	2.4.2 Concentración de sólidos en los lodos residuales.....	9
	2.4.3 Agua en los lodos.....	10
	2.4.4 Composición química.....	10
	2.4.5 Patógenos.....	12
	2.5 Importancia del conocimiento de las características de los lodos.....	13
	2.6 Alternativas de disposición final de los lodos y biosólidos.....	15
	2.7 Estabilización de lodos residuales.....	18
	2.7.1 Reducción en el contenido de sólidos volátiles.....	19

2.7.2	Digestión adicional de los biosólidos digeridos anaeróbicamente.....	19
2.7.3	Digestión adicional de los biosólidos digeridos aeróbicamente.....	20
2.7.4	Procesos aerobios a más de 40°C.....	20
2.7.5	Adición de materia alcalina.....	21
2.8	Metales pesados	22
2.9	Importancia del conocimiento de metales pesados en lodos (o en suelo) desde el punto de vista de la contaminación	24
2.10	Especiación química de metales pesados.....	26
2.11	Marco legal sobre el uso de biosólidos	27
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1	Localización y características de la planta de tratamiento de aguas residuales	29
3.2	Metodología.....	29
3.3	Ubicación de los puntos de muestreos.....	29
3.4	Obtención y preparación de muestras.....	31
3.5	Caracterización del lodo residual.....	33
3.6	Diseño experimental.....	34
3.7	Variables evaluadas	34
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1	Algunas características químicas importantes de los lodos residuales para su clasificación	35
4.2	Extracción secuencial de metales pesados.....	38
V.	CONCLUSIONES	47
VI.	LITERATURA CITADA	48

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	13
Cuadro 2. Tipo y clase de los biosólidos y su aprovechamiento.....	14
Cuadro 3. Caracterización y composición de lodos residuales.....	15
Cuadro 4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos	24
Cuadro 5. Parámetros de interés evaluados.....	34
Cuadro 6 Comportamiento de algunas características químicas importantes del lodo residual.	35
Cuadro 7. Contenido total de los metales pesados de los diferentes tratamientos de lodos de la PTAR.....	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Croquis de la planta de tratamiento de agua residual y puntos de muestreo	30
Figura 2. Contenido total de los metales pesados de los lodos de la PTAR.....	38
Figura 3. Extracción secuencial del Pb en los lodos de la PTAR.....	41
Figura 4. Extracción secuencial de Cr en los lodos de la PTAR	42
Figura 5. Extracción secuencial de Fe en los lodos de la PTAR.....	44
Figura 6. Extracción secuencial de Zn en los lodos de la PTAR.....	45

RESUMEN

Los lodos y los biosólidos tienen alto potencial de aprovechamiento agrícola debido a que mejoran los niveles de materia orgánica, de macro y micronutrientes; sin embargo, existen riesgos por la potencial presencia de sustancias tóxicas como metales pesados y microorganismos patógenos. Se considera que los biosólidos reducen adecuadamente su atracción de vectores si se adiciona suficiente materia alcalina. El objetivo de esta investigación es cuantificar el contenido de metales pesados y evaluar sus diferentes formas al aplicar un método de estabilización propuesto por la Legislación Mexicana a lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en esta investigación se usó el método de estabilización alcalina con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a lodos de la PTAR de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, así como el método de extracción secuencial de metales pesados BCR. Se obtuvieron las concentraciones totales por medio de una digestión ácida y fueron determinadas por espectrofotometría de absorción atómica. En general los tratamientos que no fueron estabilizados reportaron mayor cantidad de metales pesados que los que se estabilizaron, así como la fracción donde mayor cantidad de metales se encontró fue la oxidable, la cal insolubiliza los metales pesados en los lodos.

Palabras clave: *biosólidos, extracción secuencial, metales pesados, estabilización, micronutrientes.*

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas ambientales que el hombre tiene que afrontar y solucionar es la gestión de los diferentes residuos que se generan con el crecimiento urbano y un ejemplo de ello se puede observar en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR'S), las cuales obtienen como producto final dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo, siendo este último el que requiere una infraestructura más compleja para su estabilización. México cuenta con 1,710 plantas de tratamiento de aguas residuales en funcionamiento; sin embargo, la mayor parte de ellas son muy pequeñas razón por la cual solo el 5% le da tratamiento a los lodos generados. La razón principal para no generar un biosólido en estas unidades de tratamiento de aguas es el costo tan elevado que representa la instalación de reactores para su estabilización, los sistemas de deshidratación y traslado del lodo a los sitios de disposición final. Adicionalmente, en la mayoría de los casos, el lodo obtenido de estas plantas causa un impacto ecológico negativo debido al alto contenido de patógenos y metales pesados.

La NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002), establece en el punto 3.5, que los lodos residuales que han sido estabilizados por algún proceso se denominan biosólidos.

Los lodos y los biosólidos tienen alto potencial de aprovechamiento agrícola debido a que mejoran los niveles de materia orgánica, de macro y micronutrientes (Andreoli et al., 2001); sin embargo, existen riesgos por la potencial presencia de sustancias tóxicas como metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, zinc) (Ramírez et al., 2007) y microorganismos patógenos presentes en el agua residual (Guzmán y Campos, 2004). Adicionalmente, su inadecuada aplicación, puede ir en detrimento del crecimiento y producción de algunas especies vegetales (Ramírez y Pérez, 2006).

La presencia de microorganismos patógenos hace necesario, además de los procesos biológicos de digestión, un proceso adicional de estabilización, también llamado de desinfección o higienización para que sus características sanitarias sean compatibles con su uso (Fernández y de Souza, 2001).

Además de la estabilización es importante conocer la forma en que los metales pesados se encuentran para dar una mejor recomendación en cuanto al uso de los lodos es por eso que se recomienda hacer un análisis de especiación química que es el proceso de identificación y cuantificación de las formas químicas de un mismo elemento en una muestra dada (Hlavay *et al.* 2004). Para realizar la especiación química, comúnmente se emplea un procedimiento de extracción, simple o secuencial. Existen muchos métodos de extracción secuencial como el de Tessier *et al.* (1979), Di Giulio y Ryan (1987), Sposito (1989) y el de Gómez *et al.* (1997); en el caso de esta investigación se utilizó el método BCR.

Para el caso de los biosólidos generados en la UAAAN no existe un estudio serio sobre el contenido y distribución de metales pesados en las diferentes etapas del tratamiento, y por lo cual estos por el momento no tienen un uso y/o confinamiento determinado. En la Universidad existe un elemento potencialmente toxico importante, el Cromo, el cual es utilizado desde hace muchos años en las prácticas de laboratorio para la determinación de la materia orgánica del suelo y la demanda química de oxígeno de aguas residuales, el cual está sujeto a ser precipitado por las condiciones del medio ambiente y se ha estado acumulando en los lodos. (González, 2011).

Sabiendo la importancia del tratamiento de las aguas residuales así como del lodo que se genera en las diferentes etapas del tratamiento y la necesidad de darle un uso determinado al mismo, se realizó el presente trabajo de investigación, para lo cual se eligió el método de estabilización alcalina de acuerdo a la NOM 004-SEMARNAT-2002 y la metodología de extracción secuencial BCR.

OBJETIVOS

- Usar la metodología de estabilización alcalina propuesta por la NOM-004-SEMARNAT-2002 para lodos de PTAR'S.
- Cuantificar el contenido de las diferentes formas de los metales pesados en los lodos, mediante la metodología de extracción secuencial BCR.
- Evaluar el efecto de la estabilización sobre el comportamiento de los metales pesados en los lodos.

HIPÓTESIS

- La estabilización de los lodos insolubiliza los metales pesados, lo que se refleja en la especiación química al compararlo con los lodos no estabilizados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Definición de lodos residuales

Los lodos residuales son un residuo sólido, semisólido o líquido proveniente del tratamiento de agua y están constituidos de microorganismos que remueven la materia orgánica del agua residual que emplean como alimento (Andreoli *et al.*, 2001). Sin embargo, la composición varía en función de las características iniciales del agua residual.

Los lodos residuales son subproductos de los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales o industriales. Estos residuos generalmente son sometidos a procesos de estabilización, físicos, químicos o biológicos, con el objetivo de acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final, y reducir sus efectos ambientales. Una vez que los lodos residuales han sido estabilizados se les denomina biosólidos. (SEMARNAT, 2002).

En la NOM-004-SEMARNAT-2002, se definen los lodos residuales como sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamientos de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

Por otro lado la U. S. EPA (1995), define el lodo residual como los residuos sólidos, semisólidos o líquidos, removidos en los procesos de tratamientos primarios, secundarios o avanzados del agua residual. El lodo incluye escorias o sólidos removidos en los procesos de tratamiento y cualquier material derivado del lodo.

2.2 Producción de lodos durante el proceso de tratamiento de aguas residuales

En la Legislación Mexicana de acuerdo con la NOM-001-ECOL-1996, se consideran como aguas residuales “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas [Diario Oficial de la Federación (DOF), 1997].

2.2.1 Etapas del tratamiento del agua residual

El proceso de tratamiento del agua residual se puede dividir en cuatro etapas: tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario. Algunos autores llaman a las etapas preliminar y primaria unidas como etapa primaria.

2.2.1.1 Tratamiento preliminar

Consiste en la eliminación de materias gruesas, cuerpos gruesos y arenosos, cuya presencia puede dañar equipos sensibles en la planta de tratamiento de aguas residuales, además los tratamientos biológicos no están diseñados para tratar sólidos. Incluye operaciones como el homogenizado de las aguas, el cribado y tamizado, trituración, desarenado y desengrasado (Hernández, 1991).

El desarenado se efectúa en un canal de arena u otro dispositivo donde la velocidad de las aguas residuales es cuidadosamente controlada para permitir que la arena y las piedras se depositen en el fondo, pero todavía se mantiene la mayoría del material orgánico con el flujo. La arena y las piedras necesitan ser retiradas a tiempo en el proceso para prevenir daño en las bombas y otros equipos en las etapas restantes del tratamiento.

Algunas veces hay un clasificador de la arena seguido por un transportador que lleva la arena a un contenedor para la deposición. El contenido del colector de

arena podría ser alimentado en el incinerador en un procesamiento de planta de lodo, pero en muchos casos la arena es enviada a un terraplén.

2.2.1.2 Tratamiento primario

Los objetivos del tratamiento primario son:

- Remoción de grasas y aceites.
- Sedimentación con o sin ayuda de coagulantes o floculantes.

En la etapa de sedimentación donde el agua residual se pasa a través de grandes tanques circulares o rectangulares, los cuales son lo suficientemente grandes para que los sólidos puedan asentarse y el material flotante como la grasa y plásticos pueda levantarse hacia la superficie y desnatarse. La remoción de grasas y aceites puede realizarse en un equipo anterior o bien en el propio sedimentador primario.

El propósito principal de la etapa primaria es producir generalmente un líquido homogéneo capaz de ser tratado biológicamente y de un lodo que puede ser tratado separadamente. Los tanques primarios se equipan generalmente con raspadores conducidos mecánicamente que conducen continuamente el lodo recogido hacia una tolva en la base del tanque donde mediante una bomba puede ser retirado para el tratamiento de los mismos

2.2.1.3 Tratamiento secundario

La finalidad del tratamiento secundario es degradar la materia orgánica disuelta contenida en las aguas residuales. La mayoría de las plantas municipales e industriales trata el licor de las aguas residuales usando procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos.

Para el proceso aeróbico se requiere oxígeno, bacterias y protozoarios que consumen contaminantes orgánicos solubles biodegradables (por ejemplo: azúcares, grasas, moléculas de carbón orgánico, etc.). Los sistemas de

tratamiento biológico aeróbico son clasificados como película fija, crecimiento suspendido y combinado. En los sistemas fijos de película (como los filtros de roca) la biomasa crece adherida a un medio sólido y el agua residual pasa a través de él. En el sistema de crecimiento suspendido (como lodos activados) la biomasa está bien combinada con las aguas residuales, formándose conglomerados de bacterias y compuestos orgánicos llamados flóculos (Metcalf y Eddy, 1991).

Los procesos anaeróbicos son efectuados por microorganismos cuyo metabolismo se realiza en ausencia de oxígeno, pudiendo verse gravemente afectados por la presencia de este elemento. Los productos finales mayoritariamente son CH_4 y CO_2 . Las reacciones de síntesis se realizan con poca extensión lo que obliga a utilizar sistemas de retención de microorganismos.

2.2.1.4 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido antes de que éste sea descargado o reusado.

Más de un proceso terciario del tratamiento puede ser usado en una planta de tratamiento. Entre las operaciones y procesos involucrados existen: remoción biológica de nutrientes, intercambio iónico, ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis, etc. (Metcalf y Eddy, 1991).

2.3 Tipos de lodos dependiendo del agua residual

2.3.1 Lodo primario

El lodo primario, es el lodo que resulta del tratamiento primario del agua residual, y que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento, usualmente contiene de 93 a 99.5 por ciento de agua, así como también los sólidos y sustancias disueltas que estuvieron presentes en el agua residual o

fueron agregados durante los procesos de tratamiento. Los tratamientos primarios remueven los sólidos (U.S. EPA, 1984).

2.3.2 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 de goteo, tienen un contenido de sólidos bajo (0.5 a 2%) y son más difíciles de espesarse y deshidratarse que los lodos primarios.

2.3.3 Lodo terciario

Los lodos terciarios 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, si se usan fierro o sales de aluminio, la capacidad de la deshidratación y espesamiento del lodo comúnmente será reducido.

2.4 Caracterización física, química y microbiológica de los lodos

La composición del lodo depende principalmente de las características del influente del agua residual que entra a las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los procesos de tratamiento usados. Entre más industrializada esté una ciudad, tendrá mayores posibilidades de tener un contenido de metales pesados mayor, y será un problema para la aplicación del lodo al suelo.

La composición química del lodo puede variar grandemente entre las plantas de tratamiento y también en el tiempo. Esta variabilidad en la composición del lodo,

subraya la necesidad de un programa de muestreo firme que aporte una composición estimada confiable del lodo (Ostergaad, 1997).

2.4.1 Sólidos suspendidos totales

El contenido de sólidos suspendidos totales (SST) en los lodos residuales (LR) está en función de distintas variables como por ejemplo: los periodos de almacenamiento, los SST del líquido crudo, la carga orgánica soluble y la edad del lodo, así como del empleo de sales para favorecer su precipitación y de la cantidad de fósforo en los efluentes (Carrozzi y Steinle, 1994). Además de estas variables se debe considerar si los lodos son de origen industrial, doméstico o combinados (industrial, comercial y doméstico). La composición estará también en función del país que lo genera, por su grado de desarrollo industrial e idiosincrasia.

Así como las aguas residuales, también los lodos deben someterse, en general, a algún tratamiento capaz de modificar sus características para que pueda disponerse de ellos sin poner en peligro la salud o causar molestias.

2.4.2 Concentración de sólidos en los lodos residuales.

Para lograr que los procesos de estabilización de LR sean más eficientes y económicamente rentables, los LR se deben concentrar para manejar menores volúmenes y poder trabajar tiempos de retención más largos. Si se trabaja en continuo se requiere menor potencia de bombeo y se disminuyen los requerimientos de calor y energía (Metcalf y Eddy, 1996).

Si los LR contienen un 0.78 % de SST y se concentran por gravedad se puede llegar hasta composiciones del 1.7 % (Yub *et al.*, 1997). Utilizando otras tecnologías para la concentración de LR se pueden llegar a valores promedio de 6 y 7 %, siendo el 7 el límite recomendado para evitar problemas en el mezclado y en la operación de los equipos de bombeo para LR con 0.75 gSSV/gSST (Metcalf y Eddy, 1996).

La mayor parte de los LR secundarios es biomasa que es cuantificada como SSV. El valor promedio de la concentración de sólidos tiene grandes variaciones debido a que se utilizan diferentes tecnologías para eliminar agua. La tecnología utilizada está en función de los requerimientos de los procesos utilizados en su estabilización. El espesamiento de los lodos puede implicar gastos adicionales importantes en el tratamiento, por lo que valdría la pena realizar un análisis más detallado de esta influencia sobre los gastos totales del tratamiento, pues incluso los pretratamientos realizados a los lodos pueden generar más gastos entre mayor sea la concentración de SSV.

2.4.3 Agua en los lodos

- Agua libre: Puede ser separada por gravedad o por medios mecánicos, 70--75%
- Agua intersticial: Se encuentra entre los flóculos debido a fuerzas capilares
- Agua superficial: Cubre la superficie de las partículas de lodo en varias capas
- Agua intracelular y ligada: Parte de las células.

2.4.4 Composición química

Fósforo

- Segundo nutriente crítico para las plantas
- P orgánico → ortofosfatos (asimilables)
- Poca solubilidad a pH <5.5 o > 7.5
- Contenido en lodos depende del P en el agua residual y el proceso de tratamiento
- Requerimientos de P en cultivos: 0 – 95 kg/ha
- Recurso limitado.

Otros nutrimentos inorgánicos:

- Calcio: generalmente presente en el suelo, aporte importante en lodos estabilizados con cal
- Magnesio: indispensable para la formación de clorofila; contenido bajo en lodos
- Azufre: presente como sulfato en los lodos.

Micronutrimentos:

- Fe, Zn, Cu, Mn, B, Na, Cl
- pH del suelo y lodos afecta su disponibilidad
- Metales solubles en pH ácido, a pH neutro o alcalino forman óxidos o hidróxidos no disponibles
- En exceso pueden causar fitotoxicidad.

Materia orgánica:

- La aplicación de los lodos al suelo aumenta la estabilidad de los agregados (Guidi et al., 1983)
- Mejora el balance hídrico (Díaz-Burgos, 1990)
- Favorece el desarrollo de vegetación
- Favorece el intercambio de aire a las raíces de las plantas
- Incrementa la Capacidad de Intercambio Catiónico (Morel, 1977)
- Aporte de nutrimentos (Hue et al., 1988)
- Repercute en la productividad del suelo, formación de humus, densidad, agregación, porosidad y retención de agua. (Genevini et al., 1986).

2.4.5 Patógenos

Bacterias

- Organismos vivos más pequeños
- Incluyen actinomicetos, coliformes (fecales y totales), estreptococos y salmonelas.

Virus

- Extremadamente pequeños (0.01 – 0.25 μ)
- Más de 100 diferentes virus pueden presentarse en lodos.

Protozoos

- Organismos muy pequeños (5 – 1000 μ m)
- Papel importante en la reducción de bacterias
- Muchos son parásitos
- Incluyen Entamoeba, Giardia y Cryptosporidium.

Helmintos

- Gusanos intestinales parásitos
- Áscaris más común de todos (infecta a casi 1,500 millones de personas en el mundo)
- Sus huevos y quistes son muy resistentes y se acumulan en lodos
- Los huevos son excretados en las heces y pueden sobrevivir hasta varios años.

Los patógenos pueden representar un peligro para la salud pública, si éstos son transferidos a los cultivos alimenticios sobre los suelos 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. Por esta razón, la NOM-004-SEMARNAT-2002, establece los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (cuadro 1).

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR	PATOGENOS	PARASITOS
	BACTERIOLOGICO DE CANTAMINACION		
	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 helminto viables

NMP= Número más probable

2.5 Importancia del conocimiento de las características de los lodos

Se ha considerado 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 presente Norma Oficial Mexicana o, en su caso, se dispongan en forma definitiva como residuos no peligrosos, para atenuar sus efectos contaminantes para el medio ambiente y proteger a la población en general.

Los biosólidos se clasifican en función de su contenido de metales pesados, en excelente y bueno y en función del contenido de patógenos y parásitos en clases A, B y C. Cuadro 2

Cuadro 2. Tipo y clase de los biosólidos y su aprovechamiento

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para la 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

Es importante destacar que el uso de estos lodos modifica las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo:

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

Al conocer las características de los lodos podemos determinar el uso o disposición final que se le va a dar, ya que como se muestra en el cuadro dos existen diferentes tipos de lodos el cual se le da destino diferente.

La composición de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales domésticas se muestra en el cuadro 3, observándose que sus características varían en función del proceso que da origen a los lodos.

Cuadro 3. Caracterización y composición de lodos residuales

Parámetros	Lodos		
	Lodos Primarios	Lodos Secundarios (mezcla)	Lodos Digeridos
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
SSV (%SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%SS)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%SS)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%SS)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%SS)	2-5	1-6	3-7
Fosforo (%SS)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP/100 ml)	10 ³ -10 ⁵	100-1000	10-100
Metales pesados (%SS) (Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Fuente: Hernández M. A. 1992

SSV: Sólidos Suspendedos Volátiles, NMP: numero mas probable; SS: Sólidos Suspendedos

2.6 Alternativas de disposición final de los lodos y biosólidos

El destino final de los lodos residuales dependerá de los contaminantes presentes; por ello, se requiere de un pretratamiento antes de su uso, disposición o confinamiento. La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de estos residuos.

Las principales prácticas para la disposición de lodos que se han llevado a cabo con mayor frecuencia pueden agruparse en: procesos térmicos, relleno de terrenos y aplicación a suelo (Lue-Hing, *et al.*, 1996).

En cuanto a los procesos térmicos y la incineración en particular, requieren de una evaluación de los costos y de asegurar una disposición segura o el uso del subproducto resultante. La ventaja principal que muestra el proceso térmico es la disminución de volumen de lodos residuales; sin embargo, estas técnicas no son bien aceptadas por la opinión pública como una práctica segura por las emisiones a la atmósfera (Lue-Hing, *et al.*, 1996). El mejoramiento de técnicas que disminuyan la emisión de otros contaminantes y la difusión de esta información, podrían mejorar el panorama ante este tipo de prácticas.

El relleno de terrenos es conveniente con lodos residuales donde el espacio es suficiente y la cantidad depositada es razonable, o bien, puede utilizarse como un material de cobertura mezclándose con otros elementos para mejorar su estructura y consistencia (Lue-Hing *et al.*, 1996), como en el caso del cemento. Esto representa una alternativa viable cuando la cantidad de metales pesados no representa un riesgo.

Por ello, la aplicación en suelo se contempla como la mejor opción para el futuro, particularmente para plantas de tratamiento pequeñas, que trabajan con aguas menos contaminadas con metales pesados, colorantes, microorganismos patógenos etc. y tienen sitios de disposición cercanos. Sin embargo el uso agrícola está sujeto a la variabilidad en el tiempo de siembra y el tipo de cultivo, así como a las condiciones climáticas. En contraste, la producción de lodos es continua. A pesar de ello, es una de las prácticas más difundidas entre los países de la Unión Europea que en 1990, de las 7 toneladas de lodos (en peso seco) producidas, entre el 10 y 80 % se destinaron a esta práctica. (Lue-Hing *et al.*, 1996).

El composteo tiene la ventaja de producir material que puede ser almacenado, manejado y utilizado con mayor facilidad; sin embargo, el proceso puede generar fuertes olores y la venta al público de este subproducto aún es limitado, debido a la baja aceptación.

Además de las prácticas anteriores, con los avances en el conocimiento de diversas técnicas, surgen más alternativas en el tratamiento de lodos y la generación de subproductos que se aplican a diversos usos en el área de la construcción, agricultura, generación de energía e inclusive en la decoración.

El uso de lodos residuales o biosólidos como un mejorador de suelo en agricultura es muy discutido (McBride, 1995). Aunque en la mayoría de los países Europeos y los Estados Unidos de América, el lodo residual es comúnmente usado como fertilizante, esta práctica es aún muy controversial (Renner, 2000). Por un lado, el reciclado de nutrientes obtenidos en los biosólidos, conforma un principio de la sustentabilidad. Y por el otro, la introducción de contaminantes en el suelo y los riesgos asociados a organismos incluido el hombre contradice los principios de prevención. Algunos beneficios y riesgos han sido comparados unos contra otros. Para uso a corto plazo solamente los biosólidos de la mejor calidad debe ser utilizado (tipo excelente o bueno, clase C, según NOM-004-SEMARNAT-2002 en la legislación mexicana. Para su empleo a largo plazo deberán desarrollarse sistemas y técnicas los cuales permitan conciliar el principio mencionado de la sustentabilidad y la prevención de riesgos (O'Connor et al., 2005).

Algunas de las más importantes limitaciones para la aplicación de lodos son las relacionadas con los cambios que la degradación de los lodos puede provocar en las condiciones edáficas, ya que se pueden generar intermedios metabólicos que interfieren en el desarrollo de las plantas (Zucconi et al., 1981).

Existen también aspectos positivos, como son el aumento de la estabilidad de los agregados (Guidi et al., 1983), la mejora del balance hídrico (Díaz-Burgos, 1990), el incremento de la capacidad de intercambio catiónico (Morel, 1977) y del contenido de materia orgánica del suelo (Hue et al., 1988, Díaz-Burgos, 1990), así como el aporte de nutrientes, principalmente P y N. Sin embargo debe tenerse en cuenta que se puede modificar la relación C/N del suelo,

generar amoníaco y provocar competencia por el N disponible entre los microorganismos y las raíces.

2.7 Estabilización de lodos residuales

Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final para evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente (SEMARNAT, 2002).

El aprovechamiento de los biosólidos como un producto requiere generalmente la aplicación de un tratamiento previo de estabilización que lo haga adecuado para el fin requerido. Estos tratamientos rinden un producto con una carga microbiana menor y por tanto más adecuada para el manejo y el contacto por parte del hombre.

La estabilización del lodo se lleva a cabo principalmente para:

- 1.- Reducir la presencia de patógenos,
- 2.- Eliminar los olores desagradables, y
- 3.- Reducir o eliminar su potencial de putrefacción. La supervivencia de microorganismos patógenos y la proliferación de olores en el lodo se producen cuando se permite que los microorganismos se desarrollen sobre la fracción orgánica del mismo.

Las técnicas de estabilización de lodos más recurridas descritas en la NOM-004-2002 son: Reducción en el contenido de sólidos volátiles, Digestión adicional de los biosólidos digeridos anaeróbicamente, Digestión adicional de los biosólidos digeridos aeróbicamente, Procesos aerobios a más de 40°C, Adición de materia alcalina.

2.7.1 Reducción en el contenido de sólidos volátiles

La atracción de vectores se reduce si la masa de sólidos volátiles en los biosólidos es reducida por lo menos un 38% durante su tratamiento. Este porcentaje es equivalente al conseguido mediante digestión aeróbica o anaeróbica más alguna reducción adicional que ocurra después de que los biosólidos salen de las instalaciones de estabilización, tales como el procesamiento en lechos de secado o lagunas o mediante el composteo. (SEMARNAT, 2002).

2.7.2 Digestión adicional de los biosólidos digeridos anaeróbicamente

Frecuentemente, los biosólidos han sido reciclados a través del tratamiento biológico de las aguas residuales o han transitado durante largos periodos por los sistemas de alcantarillado. Durante este tiempo, sufren una degradación biológica sustancial. Si los biosólidos son subsecuentemente tratados mediante digestión anaerobia, su atracción de vectores será reducida adecuadamente. Debido a que ingresan al digester parcialmente estabilizado, la reducción de sólidos volátiles después del tratamiento frecuentemente es menor de 38%. Esta opción permite al operador demostrar la reducción de atracción de vectores probando una porción de los biosólidos previamente digeridos en una unidad a escala de laboratorio. Se demuestra la reducción, si después de la digestión anaerobia de los biosólidos por 40 días adicionales, a una temperatura entre 30°C y 37°C, la reducción de los sólidos volátiles en los biosólidos es menor de 17%.

2.7.3 Digestión adicional de los biosólidos digeridos aeróbicamente

Esta opción es apropiada para los biosólidos digeridos aeróbicamente que no pueden cumplir con la reducción en el contenido de sólidos volátiles, incluye a aquellos producidos por plantas de aireación extendida donde el tiempo mínimo de residencia para los biosólidos en el tren de aguas generalmente excede de 20 días. En estos casos, los biosólidos ya estarán sustancialmente degradados antes de la digestión aerobia.

Bajo esta opción, se considera que los biosólidos digeridos aeróbicamente con 2% de sólidos o menos, han logrado la reducción de atracción de vectores si después de 30 días de digestión aerobia en una prueba de laboratorio a 20°C, la reducción de los sólidos volátiles es menor de 15%. Esta prueba solamente es aplicable a los biosólidos líquidos digeridos aeróbicamente.

2.7.4 Procesos aerobios a más de 40°C

Esta opción se aplica primordialmente a los biosólidos composteados que también contienen agentes abultadores orgánicos parcialmente descompuestos.

Los biosólidos deben ser tratados aeróbicamente por 14 días o más, tiempo durante el cual la temperatura deberá rebasar siempre los 40°C y el promedio será mayor de 45°C.

Esta opción pudiera aplicarse a otros procesos aeróbicos, tales como la digestión aeróbica, sin embargo, la digestión adicional de los biosólidos digeridos aeróbicamente y los procesos aerobios a más de 40°C parecen más fáciles de cumplir para los otros procesos aeróbicos.

2.7.5 Adición de materia alcalina

Se considera que los biosólidos reducen adecuadamente su atracción de vectores si se adiciona suficiente materia alcalina para lograr lo siguiente:

- Elevar el pH por lo menos hasta 12, medido a 25°C, y sin añadir más materia alcalina, mantenerlo por 2 horas, y
- Mantener un pH de al menos 11,5 sin la adición de más materia alcalina durante otras 22 horas.

Estas condiciones tienen la intención de asegurar que los biosólidos puedan ser almacenados por lo menos durante varios días en las instalaciones de tratamiento, transportados y posteriormente aplicados sin que el pH descienda a niveles en los que ocurre la putrefacción y se atraen vectores. (SEMARNAT, 2002).

La cal ha sido el producto de mayor uso para este fin, aunque también se ha recurrido a mezclas de cal con cenizas de horno y cenizas volantes. La cal es un producto que comercialmente se encuentra principalmente en dos presentaciones: cal viva (CaO) y cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), siendo la primera la más utilizada en Brasil; estos productos generan un aumento de la temperatura y producen iones hidróxido que aumentan el pH (Andreoli et al., 2001). Debido a que el uso de cal puede no ser económico a nivel macro, hay autores que proponen mezclarla con subproductos industriales como la ceniza, con bajos niveles de metales y que no disminuyan el proceso de reducción de patógenos (Boost y Poon, 1998). La ceniza es un material mineral generado en calderas, cuya proporción y composición química depende principalmente de la procedencia del carbón (Muñoz et al., 2006); su efecto alcalinizante depende de la cantidad de ceniza usada, de su origen y de los compuestos disponibles para la generación de iones de hidróxido (Vinneras et al., 2003), siendo los compuestos más importantes los óxidos de calcio y de magnesio (Andreoli et al., 2001).

2.8 Metales pesados

Se considera metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5.0 g.cm^{-3} cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos, constituyentes naturales de la corteza terrestre, de rocas de suelos, sedimentos, erupciones volcánicas y agua). De acuerdo con García y Dorronsoro (2009), los metales pesados se clasifican en dos grupos:

- a) Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades –traza por plantas y animales, disponibles para que los organismos completen su ciclo vital. Dentro de este grupo están: As, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn.
- b) Metales pesados, sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos produce disfunciones en su organismo. Entre los que se encuentran el Cd, Hg, Pb, Bi, Sn y Tl.

En términos generales, se dice que la toxicidad de una sustancia representa su capacidad para causar una lesión en un organismo vivo; en este sentido, los metales pesados son de reconocido riesgo tanto para la salud como para el medio ambiente. La Agencia Para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades por sus siglas en inglés (ATSDR), que pertenece al departamento de salud y servicios humanos de Estados Unidos cuenta con un compendio detallado de la toxicidad de muchos metales pesados, entre los cuales se encuentran: el arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), níquel (Ni), zinc (Zn), y mercurio (Hg), mismos que son considerados por la normatividad de lodos y biosólidos en México. (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Todos los metales mencionados anteriormente pueden absorberse por inhalación de compuestos derivados de estos en forma de gases en la

atmosfera; o inhalarse cuando se encuentran adheridos a partículas de polvo, o tierra muy fina, que pueda ser movilizada por corrientes bajas de aire.

Respecto a la potencial toxicidad de los metales pesados, hay que tener presente que sus comportamientos frente a los organismos vivos pueden describirse de diversas maneras los cuales están en relación con los sistemas biológicos llamados: bioacumulación, biomagnificación, bioconcentración y biodisponibilidad.

Los metales más comúnmente encontrados en los lodos residuales son Pb, Ni, Cd, Cr, Cu y Zn y las concentraciones de metales están gobernadas por la naturaleza y la intensidad de la actividad industrial, así como por el tipo de proceso empleado durante el tratamiento de los lodos residuales. Normalmente, las aguas residuales domésticas tienen un contenido más bajo de metales pesados que las aguas residuales industriales. Se ha demostrado (Pires y Mattiazzo, 2003), que la biodisponibilidad de los metales puede ser elevada en biosólidos tratados con polímeros, cuando se compara con los tratamientos que usan cloruro férrico y óxido de calcio. Por lo tanto la biodisponibilidad de metales está directamente relacionada con las características químicas del suelo y de los biosólidos.

Basándose en evaluaciones extensivas del riesgo de los metales pesados del lodo, la NOM-004-SEMARNAT-2002 regula 8 metales en el lodo que será aplicado al suelo, estableciendo sus límites máximos permisibles. Cuadro 4.

Cuadro 4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES (mgkg ⁻¹) En base seca	BUENOS (mgkg ⁻¹) En base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3 000
Cobre	1500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

2.9 Importancia del conocimiento de metales pesados en lodos (o en suelo) desde el punto de vista de la contaminación

Al aplicar biosólidos de origen urbano como enmiendas agrícolas, el principal efecto ambiental se da en el recurso natural suelo. Las características físicas y químicas de los biosólidos modifican las características del suelo y se produce una alteración. Esta alteración puede ser positiva o negativa. Es decir puede mejorar o deteriorar las características del suelo.

Otro efecto ambiental ocasionado al agroecosistema por la aplicación de biosólidos como enmiendas agrícolas, se produce en la atmosfera debido al olor de los biosólidos. Además de la molestia ocasionada por el olor desagradable de los biosólidos, no se tiene información sobre los efectos que este tenga sobre la salud humana y animal (Schiffman y Williams, 2005).

Un tercer efecto ambiental ocasionado por la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas es el efecto ocasionado en el paisaje del agroecosistema. El color

negro característico de los biosólidos y su apariencia ocasionan una alteración al paisaje.

Determinar el contenido total de metales pesados en biosólidos que son destinados a uso agrícola es importante por el riesgo existente de que se acumulen en el suelo. Sin embargo la concentración total del metal se encuentra repartida en distintas fracciones o especies químicas. Por lo tanto la medición del contenido total es un criterio insuficiente para evaluar el verdadero riesgo, debido a que la movilidad de los metales pesados y su biodisponibilidad para las plantas depende de la especie química en la que se encuentren asociados (Scancar et al., 2000).

La importancia del estudio de las fracciones o especies químicas en las cuales se encuentran los metales pesados en los biosólidos, radica en que se establece su nivel de biodisponibilidad dependiendo de la estabilidad de cada especie química en condiciones ambientales. Cuando un metal se encuentra enlazado débilmente a una especie química, su índice de disponibilidad es alto porque el metal puede ser solubilizado con ligeros cambios en las condiciones ambientales del suelo, como una reducción del pH o del potencial redox (Alloway, 1990).

Cuando los metales se encuentran unidos fuertemente a la especie química su estabilidad es muy alta y para que se conviertan a formas solubles se necesitarían condiciones ambientales muy drásticas, que normalmente no ocurren en la naturaleza. Si la mayor concentración de los metales se encuentra en esta fracción, indica una muy baja biodisponibilidad y en consecuencia el peligro de toxicidad se reduce. Esta información sólo es posible obtenerla con un estudio de especiación (Pérez-Cid *et al.*, 1999).

Los lodos pueden introducir al suelo excesivas cantidades de constituyentes que contengan principalmente nitrógeno y fósforo, pesticidas y microorganismos patógenos (Barry et al., 1995), la salinidad del suelo pueden verse afectada por la aplicación del lodo y, consecuentemente la disponibilidad del metal se puede

volver alta. Por lo tanto el riesgo de contaminación del suelo por metales pesados debe ser considerado cuando se apliquen los biosólidos y una comprensión del comportamiento de los metales pesados en el suelo es esencial para valorar los riesgos ambientales cuando esos metales son incorporados al suelo.

2.10 Especiación química de metales pesados.

La especiación química ha sido definida, en forma general, como el proceso de identificación y cuantificación de las formas químicas de un mismo elemento en una muestra dada (Hlavay *et al.*, 2004). Para realizar la especiación química, comúnmente se emplea un procedimiento de extracción, simple o secuencial.

Durante los últimos 25 años se han desarrollado una gran variedad de métodos de extracción. Algunos han sido muy utilizados. Sin embargo, el amplio rango de procedimientos usados, hace que los resultados obtenidos en diferentes estudios sean difícilmente comparables por las condiciones de operación tan variables de cada método (Filgueiras *et al.*, 2002).

Ante esta problemática, la comunidad Europea a través del Community Bureau of Reference (BCR), que a partir del año 2002 se denomina Standard Measurement and Testing Program (SM & TP), comenzó un programa para armonizar la metodología usada en procedimientos de extracción secuencial para determinar metales pesados en suelos y sedimentos. Este procedimiento (que se sigue conociendo como método BCR) ha sido aplicado exitosamente a una gran variedad de matrices sólidas incluyendo biosólidos. El esquema de extracción secuencial BCR (SES BCR, por sus siglas en inglés) divide el contenido total del metal en estudio, presente en una muestra, en tres fracciones, las cuales se liberan mediante una secuencia de extracción en orden de movilidad y peligrosidad decreciente. Aunque el protocolo de este esquema no contempla la fracción residual en virtud de que esta es extremadamente estable y que no representa peligro de movilización de

metales pesados, se recomienda determinarla a efecto de hacer una revisión interna del método (Rauret *et al.*, 2000).

En un estudio de especiación química de metales pesados realizado por Oliveira y Mattiazzo (2001), presentaron resultados indicando que los suelos enmendados con biosólidos durante cinco años incrementaron sus niveles totales de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, aunque el incremento encontrado estaba en las fracciones más resistentes. Los metales pesados pueden contaminar la cadena alimenticia y reducir el rendimiento de los cultivos.

González *et. Al* (2009), en un estudio de especiación química de metales pesados en biosólidos de origen urbano de la ciudad de Puebla, usando el método de extracción secuencial, presentaron resultados indicando que el Cr y Pb no tuvieron presencia en las diferentes muestras de acuerdo al criterio establecido. El Cu y Ni se presentaron en las fracciones intercambiable, reducible y oxidable. El Cd en las fracciones reducible y oxidable y el Zn en sus formas intercambiable y reducible.

2.11 Marco legal sobre el uso de biosólidos

Debido a la gran cantidad de biosólidos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales en todo el mundo y a la tendencia creciente a favor de su aplicación en suelos por sus potenciales benéficos a la agricultura, se hizo necesario regular su calidad y las formas en que debía ser aplicado al suelo.

En 1993, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, por sus siglas en inglés) emitió los lineamientos para el uso y disposición de biosólidos en suelos, en ese país (U. S. EPA 1993).

Esta reglamentación ha servido como norma para el uso de biosólidos en algunos países y en otros ha sido la base para elaborar reglamentaciones propias.

En México el uso y aprovechamiento de biosólidos está enmarcado de manera general en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), en su reglamento respectivo y en la NOM-053-SEMARNAT-1993 (SEMARNAT 1993). Y de manera particular en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002).

También en el Artículo 139 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 1998) se menciona que toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga la ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto se expida.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización y características de la planta de tratamiento de aguas residuales

La presente investigación se realizó en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la Ciudad de Saltillo, Coahuila, México. En la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicada a los 25°21'14" Latitud Norte y 101°2'2" Longitud Oeste y 1767 metros sobre el nivel del mar (msnm), dicha PTAR colinda al Norte con el jardín botánico "Ing. Gustavo Aguirre Benavides", al Sur con el jardín hidráulico, al Este con el departamento de Fitomejoramiento y al Oeste con el departamento de Horticultura.

El clima que predomina en la región es una modificación propuesta por García (1973) a la clasificación de Köppen, que presenta un clima con la siguiente clasificación: BWhw(x')(e), muy seco, semicalido, con invierno fresco, extremoso, con lluvias de verano y precipitación invernal superior al 10% de la total anual, con temperatura media anual de 19.8°C y precipitación media anual de 298.5 milímetros. (González, 2011).

3.2 Metodología

En la planta de tratamiento de aguas residuales, se identificarón y localizarón los diferentes puntos de muestreos ubicándolos en las diferentes etapas de tratamiento de la PTAR donde se generan sólidos y se realizaron muestreos simples en los sitios definidos.

3.3 Ubicación de los puntos de muestreos

Se localizarón y ubicaron 2 diferentes puntos de muestreo (considerados como tratamientos) en las diferentes etapas de tratamiento de agua residual de la PTAR y donde en cada etapa de tratamiento se depositan lodos residuales estos puntos se muestran en la figura 1 (Pérez, 2011).

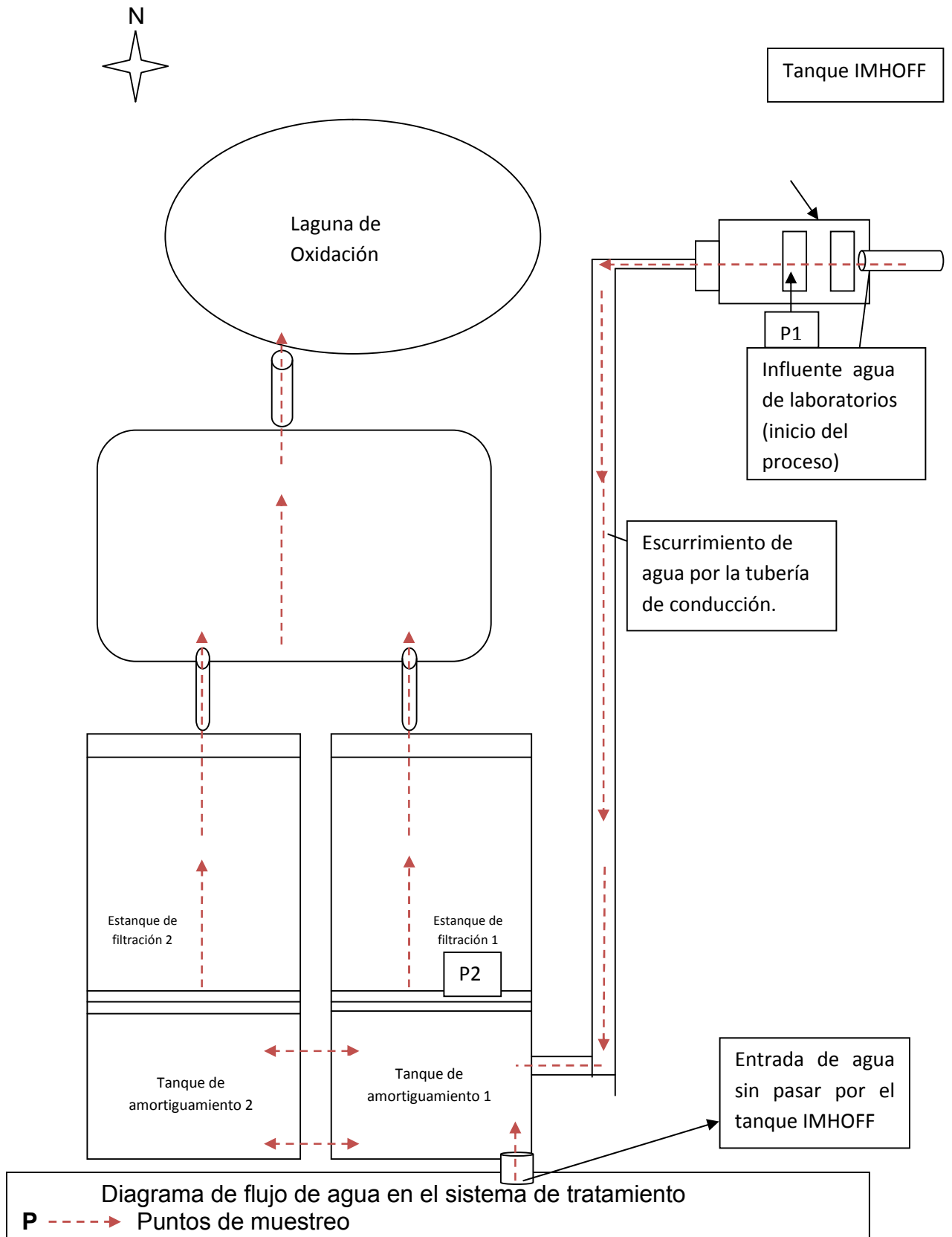


Figura 1. Croquis de la planta de tratamiento de agua residual y puntos de muestreo

3.4 Obtención y preparación de muestras

Los principales materiales utilizados en este trabajo fueron los lodos residuales y la cal hidratada necesarias para la estabilización, las muestras de lodo se obtuvieron recolectando; 4 kilogramos aproximadamente de lodo semisólido de cada punto de muestreo depositándolo en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas. Posteriormente se secó el lodo a la intemperie durante 24 horas, se tamizó a 2 mm de diámetro, así obteniendo 1 kilogramo de lodos, se almaceno para su posterior estabilización y análisis.

Para estabilizar los lodos de la PTAR de la UAAAN se utilizó el método alcalino el cual consiste en elevar el pH a 12. A 100 g de muestra de lodos secos de cada punto se le agrego 10 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en total y agua destilada, se dejó reposar por 22 horas.

Una vez que los lodos fueron estabilizados nuevamente se secaron los lodos y se prepararon para su análisis, procediendo a realizar la extracción secuencial de los metales pesados, para lo cual se aplicó el método de especiación química BCR el cual consiste en lo siguiente:

Las tres fracciones, denominadas fracción soluble en ácido, fracción reducible y fracción oxidable, se liberan por extracción secuencial en condiciones operativas bien definidas utilizando sucesivamente ácido acético, clorhidrato de hidroxilamina y peróxido de hidrogeno (Tokalioglu *et al.*, 2000).

Las fracciones consideradas en el esquema BCR, son las siguientes:

Fracción intercambiable. Metales en disolución, unidos a carbonatos e intercambiables. Se extraen los metales intercambiables y solubles en medio ácido, incluyendo los metales absorbidos. Estos metales son liberados a través de un intercambio iónico, mediante un extractante ácido como el ácido acético.

Fracción reducible. Metales ligados a oxihidróxidos de hierro y manganeso. Se liberan los metales unidos a óxidos de fierro y manganeso, inestables bajo

condiciones reductoras (los óxidos se disuelven y se liberan las trazas de metal absorbidas).

Fracción oxidable. Metales unidos a materia orgánica y sulfuros. Degradación de la materia orgánica bajo condiciones oxidantes, liberando los metales solubles enlazados a ésta o a sulfuros.

Fracción residual. Metales unidos a minerales primarios como los silicatos.

A continuación se describe la metodología para la extracción de cada una de las fracciones del procedimiento de extracción secuencial BCR.

Fracción intercambiable: 1 g de muestra seca y cribada, se puso en un tubo de centrífuga de polipropileno con 7 ml de ácido acético 0.11 M. La muestra se agitó (agitador horizontal Thermolyne) durante 16 horas a temperatura ambiente y a 40 oscilaciones por minuto. Al final del tiempo de agitación se le agregaron tres milímetros de ácido acético para tener un volumen final de 10 ml y tenerlos como base de cálculo.

El extracto se separó del residuo sólido por medio de centrífuga (Beckman GS-15R) a 2400 rpm durante 5 minutos. El líquido decantado se filtró a través de papel Whatman No. 40 y se almacenó en un recipiente de polietileno, hasta el análisis de metales pesados en un espectrofotómetro de absorción atómica, (Se le agrego 1 gota de acido nítrico para evitar la formación de nata).

Fracción reducible: Al residuo sólido de la etapa anterior se agregó la segunda solución extractante, 10 ml de clorhidrato de hidroxilamina 0.5 M (pH = 2 con ácido nítrico concentrado). Se agitó durante 16 horas a 40 oscilaciones por minuto. El proceso de separación de la solución extractante y el lavado del residuo se desarrollaron como se describe en fracción intercambiable. El líquido decantado se filtró a través de papel Whatman No. 40 y se almacenó en un recipiente de polietileno, hasta su análisis por espectrofotometría de absorción atómica.

Fracción oxidable: Al residuo de la etapa anterior se agregaron 2 ml de peróxido de hidrógeno en el tubo de centrifuga de polipropileno. Se puso en digestión con el tubo tapado y se mantuvo la digestión calentándolo a 85°C en un baño María durante una hora. El tapón del tubo de centrifuga se retiró y el contenido del tubo se redujo por evaporación hasta aproximadamente un volumen de 1 ml. Se adicionaron nuevamente 5 ml de peróxido de hidrógeno, se tapó el tubo y la digestión prosiguió a 85°C durante 1 h. Se destapó el tubo y el contenido se redujo por evaporación hasta un volumen aproximado de 1 ml.

Se agregó la tercera solución extractante, 5 ml de acetato de amonio 1.0 M (pH 2 con ácido nítrico concentrado). Se agitó por 16 horas a 40 oscilaciones por minuto. El proceso de separación de la solución extractante y el lavado del residuo se desarrollaron como se describe en la fracción intercambiable.

Aunque el método BCR no contempla las fracciones residuales y totales, en este trabajo se realizó el análisis de la forma total de los metales en estudio, para lo cual se pesó 1 gramo de lodo seco, se le agregaron 10 ml de ácido nítrico, se pusieron a evaporar posteriormente, se vaciaron a un matraz de aforación de 50 ml y se aforaron para su posterior análisis.

3.5 Caracterización del lodo residual

Además de los diferentes metales pesados se realizó en los lodos un análisis de algunas características importantes para este estudio, las metodologías utilizadas se presentan en el cuadro 5. (Jackson, 1976).

Cuadro 5. Parámetros de interés evaluados

Parámetro	Método
pH	Potenciómetro
Conductividad eléctrica	Extracto de saturación en pasta
Materia orgánica oxidable	Walkley y Black
Materia orgánica total	Calcinación en mufla
Metales pesados	Espectrofotómetro de absorción atómica

3.6 Diseño experimental

El diseño experimental usado para el análisis de los resultados de los metales pesados en su forma total fue un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, utilizando para esto el paquete de diseños experimentales de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Versión 2.5, para el análisis de la comparación de medias, fue utilizado el mismo paquete (Olivares, 1994).

3.7 Variables evaluadas

Las variables se evaluaron acorde a los objetivos planteados considerando como metales pesados a los elementos Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Níquel (Ni) y Zinc (Zn), además, tomando en cuenta algunas propiedades químicas como pH, Conductividad Eléctrica (C.E.), Contenido de materia orgánica (M.O.) y otros elementos tales como Cobalto (Co), Hierro (Fe). Todos los elementos se analizaron en su forma total y por el método de extracción secuencial BCR.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se exponen y discuten en función de cada variable. La información que se presenta corresponde a los análisis de laboratorio que se realizaron en los diferentes tratamientos con sus respectivas repeticiones. Para los metales pesados se realizó el ANVA correspondiente y la comparación de medias. Para el pH, CE y M.O. solo la media obtenida de los análisis ya que en este caso no se realizaron con suficientes repeticiones para hacer el análisis de varianza.

4.1 Algunas características químicas importantes de los lodos residuales para su clasificación

De acuerdo a la U. S. EPA (1995) y la NOM-004-SEMARNAT-2002 determinar la conveniencia del lodo para aplicarlo al suelo, por la caracterización de sus propiedades, es el primer paso indispensable en la planeación y diseño de un sistema de aplicación de lodo. Menciona también que algunas de las propiedades más importantes de este material que se necesitan caracterizar son: pH, Conductividad Eléctrica (C.E.), Materia Orgánica (M.O.) entre otras.

Cuadro 6 Comportamiento de algunas características químicas importantes del lodo residual.

Tratamientos	pH	M.O. oxidable %	M.O. total %	C.E. $\mu\text{s cm}^{-1}$
Imhof	6.8	29.88	100	240
Imhof estabilizado	6	36.34	90	180
Laguna	6.9	33.10	90	1097
Laguna estabilizado	7.1	42.16	80	1130

De acuerdo a los resultados obtenidos de algunas características importantes de los lodos y lodos estabilizados, se puede observar en la cuadro 6 que el pH en el tanque Imhof (pH 6.8) es mayor que el Imhof estabilizado con cal (pH 6), por el contrario en el caso del pH del lodo de la laguna es mayor en el

tratamiento estabilizado con cal. En la comparación entre los diferentes puntos de la PTAR el pH de la laguna es ligeramente mayor que el pH del tanque Imhof. Es importante mencionar que el proceso de estabilización alcalina el cual pretende aumentar el pH por encima de 12 unidades y mantenerlo durante 22 horas como mínimo, para lograr la reducción significativa de patógenos y la estabilización del lodo; adicionalmente, este valor de pH sobrepasa los límites de tolerancia para el crecimiento y supervivencia de organismos tan resistentes como los huevos de helmintos (EPA, 2003).

Para el caso de los lodos de la PTAR de la UAAAN, estos tiene un pH muy ligeramente ácido y al realizar el tratamiento de estabilización con cal se aumento este valor (11.5) muy cerca de los recomendado por la legislación Mexicana, manteniéndolo también durante el tiempo indicado, sin embargo los resultados muestran una reducción considerable a través del tiempo ya que estos análisis se realizaron al final del estudio de especiación química (aproximadamente 3 meses), estos resultados indican que los lodos también presentan un poder de amortiguamiento bastante considerable.

El pH es uno de los parámetros más importantes que controlan las formas de los elementos en el suelo, (López y López 1990). Este influye de manera muy importante en la solubilidad y como consecuencia en la absorción de los metales por las plantas. El aumento del pH reduce la solubilidad y absorción del aluminio, cobre, hierro, cobalto, zinc y manganeso (Loué, 1988). El cadmio y el plomo en suelos de cultivo pueden incrementar sus concentraciones al disminuir el pH del suelo (Holgrem, et al., 1993).

Con respecto a la conductividad eléctrica (C.E.) en el tratamiento Imhof es mayor que en el tratamiento Imhof alcalino con diferencia de $59.2 \mu\text{s cm}^{-1}$, mientras que en el tratamiento laguna es de $1097 \mu\text{s cm}^{-1}$, el tratamiento laguna estabilizado es de $1130 \mu\text{s cm}^{-1}$, los valores observados en los diferentes tratamientos muestran que no hay una diferencia importante entre los lodos estabilizados y sin estabilizar, pero si existe una diferencia bastante grande al comparar los puntos de la PTAR esto indica que las aguas

residuales que entran al sistema de tratamiento provienen de diferentes fuentes y mucho mas cargadas con sales los de la laguna (cuadro 6).

Durante las etapas de tratamientos del agua residual la salinidad se va concentrando de manera diferente en todos los tratamientos. Las concentraciones de sales se debe principalmente por los elementos calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) según lo fundamenta (Porta et al., 2003), por lo que una aplicación de lodo al suelo arriba de 8 ms cm^{-1} causa problemas de salinidad en el suelo y solo se puede plantar halófitas.

La materia orgánica (M.O) se analizó mediante dos métodos; M.O total y M.O fácilmente oxidable, en el cuadro 6 se muestra que en el tratamiento Imhof el contenido de M.O total es del 100% mientras que en el Imhof alcalino disminuyo al 90%. Y, que en el tratamiento laguna el contenido de M.O es menor que en el tratamiento Imhof ya que son dos puntos diferentes dentro del proceso de tratamiento del agua residual de la Universidad, aunque hay que tomar en cuenta que aun así es muy elevado el contenido de materia orgánica en el tratamiento laguna ya que en esta parte del proceso de tratamiento existe una entrada de agua sin pasar por el tanque Imhof, y con respecto al contenido de M.O total del tratamiento laguna alcalino disminuyo al 80%, lo que nos da como resultado que al aplicar la estabilización alcalina a los lodos disminuye el contenido de materia orgánica esto puede deberse a una dilución del material orgánico por efectos de la estabilización con cal.

En cuanto a la M.O oxidable el resultado es lo contrario ya que en los tratamientos sin ser estabilizados el contenido de materia orgánica fácilmente oxidable disminuyo con respecto a los tratamientos que se les aplico la estabilización alcalina.

Sin embargo las concentraciones de M.O. en ambos puntos con o sin estabilizar son relativamente altos con lo que de acuerdo con la U.S. (EPA, 2003). El contenido de materia orgánica en los biosólidos que se pudieran aplicar al suelo mejoraría las propiedades estructurales del suelo. El beneficio consiste en la

unión de las partículas de los suelos en agregados estables, produciendo una estructura que facilita la permeabilidad de agua y aire reduciendo así la escorrentía y los riesgos de erosión. En contraste, si la cantidad de materia orgánica es baja, los agregados del suelo son menos estables con el agua y fácilmente dispersables. También al incrementar los valores del contenido de M.O. reduce la movilidad y la disponibilidad de los metales pesados.

4.2 Extracción secuencial de metales pesados

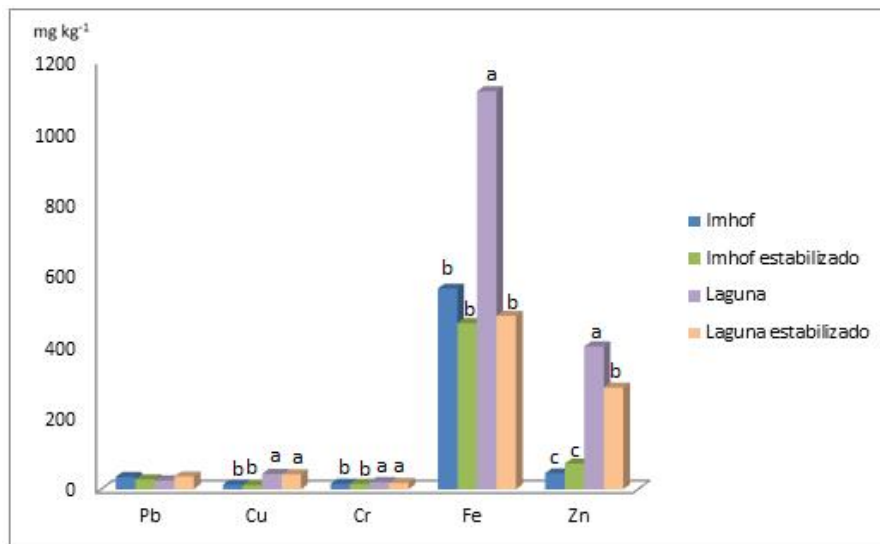


Figura 2. Contenido total de los metales pesados de los lodos de la PTAR

En el cuadro 7 y figura 2 se presentan los contenidos de metales pesados presentes en los diferentes tratamientos donde se puede apreciar que el Fe y el Zn son los elementos que se encuentran en mayor cantidad y el Cr, Cu y Pb en menor proporción. También fueron analizados otros elementos como el Ni, Cd y Co los cuales no fueron detectados por el método utilizado lo que muestra que las concentraciones son nulas o extremadamente pequeñas.

En general se puede observar en el cuadro 7 que la mayor concentración de elementos se presenta en el punto dos (laguna, laguna estabilizado), esto se debe a que hay una entrada de agua que no ha recibido ningún tratamiento

todavía, aun con todo esto las concentraciones de metales pesados se encuentran en menor cantidad a los valores normados en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

El **Pb** no presento diferencia significativa entre tratamientos, se presentó en mayor cantidad en el tratamiento Imhof y en menor cantidad en el Imhof que fue estabilizado mientras que en el tratamiento laguna la presencia de este elemento se presentó en menor cantidad que el tratamiento estabilizado. Así mismo el tratamiento del tanque Imhof tuvo más presencia de plomo que el tratamiento laguna ya que en este punto existe presencia de plantas (carrizo real) que de alguna manera pueden extraer el elemento.

De acuerdo con Hue (1996) quien sostiene que la acumulación de metales pesados en determinados tejidos u órganos es variable, algunos como por ejemplo el Cr y Pb son bloqueados a nivel radicular, por lo que se plantea que las plantas de carrizo real (*Gynerium sagitta*) tienen un efecto directo en la concentración y distribución heterogénea de este elemento respecto a los demás tratamientos.

El **Cu** presenta diferencia significativa entre los tratamientos Imhof y laguna, donde se presenta en mayor cantidad en el tratamiento laguna; mientras que en el tratamiento del tanque Imhof e Imhof estabilizado no hay diferencia al igual que el tratamiento laguna y laguna estabilizado, pero también en el cuadro 8 nos muestra que los tratamientos estabilizados se redujo ligeramente la presencia del elemento en comparación a los que no se estabilizaron. El cobre no fue detectado en las tres etapas del procedimiento de extracción secuencial. Por lo cual se presenta solo el contenido total de este elemento. Esta fracción no se contempla en el esquema de extracción secuencial utilizado. Sin embargo su presencia en la forma total muestra la forma más estable y menos disponible en el lodo y por lo tanto con fines de comparación es de gran utilidad.

El **Cr** presento diferencia significativa entre los tratamientos laguna e Imhof, siendo el tratamiento laguna el que obtuvo mayor contenido del elemento. No

hubo diferencia significativa entre los tratamientos Imhof e Imhof alcalino, tampoco entre los tratamientos laguna y laguna alcalino pero cabe mencionar que el tratamiento que fue estabilizado disminuyo el contenido de Cr.

El **Fe** muestra diferencia significativa entre el tratamiento laguna y los otros tres tratamientos ya que el tratamiento laguna tiene 1113.4 mg kg⁻¹ de Fe mientras que los demás tratamientos van del 485 a 561.7 mg kg⁻¹ También se observa en la figura 2 que los tratamientos que no fueron estabilizados tienen mayor concentración del elemento que los que si se les aplico la materia alcalina.

En el **Zn** existe una diferencia significativa entre los tratamientos. En el caso del tratamiento Imhof e Imhof alcalino no existe diferencia significativa pero al tratamiento que se estabilizo contiene mayor cantidad de Zn que el tratamiento que no se estabilizo, y en el caso de laguna y laguna estabilizada la cantidad del elemento aumento notablemente a comparación a los tratamientos Imhof. Donde el tratamiento laguna alcalino reporto menor cantidad de Zn que el tratamiento laguna sin estabilizar por lo cual si hay diferencia significativa entre estos dos tratamientos como se muestra en figura 2.

Cuadro 7. Contenido total de los metales pesados de los diferentes tratamientos de lodos de la PTAR mg kg⁻¹

Tratamientos	Pb	Cu	Cr	Fe	Zn
Imhof	35	13.3 B	15. B	561.7 B	45.0 C
Imhof estabilizado	28	11.7 B	15. B	465.0 B	71.7 C
Laguna	25	43.3 A	20. A	1113.4 A	400.0 A
Laguna estabilizado	36	41.7 A	18.3 A	485.0 B	258.0 B

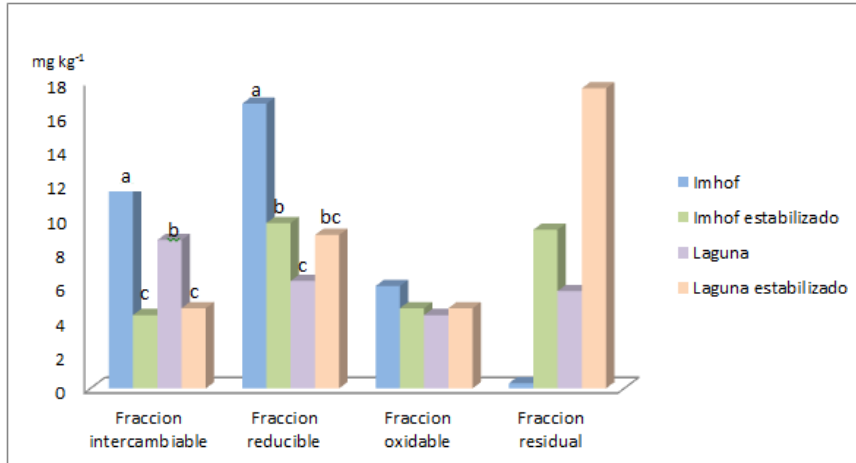


Figura 3. Extracción secuencial del Pb en los lodos de la PTAR

En la fracción intercambiable existe una diferencia significativa entre los tratamientos. En los tratamientos del tanque imhof alcalino y laguna alcalino no hay diferencia significativa, así mismo nos damos cuenta que al realizar el tratamiento de estabilización en los lodos disminuye el contenido de Pb en comparación con los tratamientos que no se les agrego la materia alcalina. (Figura 3).

En La fracción reducible, existe una diferencia significativa entre tratamientos, siendo el tratamiento del tanque Imhof donde se presentó en mayor cantidad este elemento (16.7 mg kg^{-1}). Y en menor cantidad en el tratamiento laguna (6.3 mg kg^{-1}). Mientras que en los tratamientos del tanque Imhof se obtuvo mayor cantidad de Pb que en el que se estabilizo y en el caso del tratamiento laguna el plomo se presentó en menor cantidad que el que se estabilizo.

En la fracción oxidable no hay diferencia significativa entre tratamientos. El tratamiento del tanque Imhof presento mayor cantidad de plomo que el tratamiento laguna. Y los tratamientos que fueron estabilizados con materia alcalina obtuvieron la misma cantidad de plomo. Aunque los tratamientos del tanque Imhof el estabilizado reporto menos cantidad del elemento y en el caso de los tratamientos laguna el comportamiento del plomo fue al contrario pues el que se estabilizo presento mayor cantidad que el tratamiento sin estabilizar.

En la fracción residual podemos observar diferencias, (en este caso no se aplicó ninguna prueba estadística), entre tratamientos donde el tratamiento Imhof y laguna sin estabilizar se encuentra menos plomo que los tratamientos que se estabilizaron. Y comparando los puntos donde se tomaron las muestras el punto 2 (laguna) presenta más Pb que el punto 1 (Imhof). Los valores en los tratamientos de lodos estabilizados en esta fracción son los más elevados debido al aumento de pH por efectos del proceso de estabilización al agregar la cal, lo que trae como consecuencia una cierta fijación del elemento que no se puede extraer con los reactivos en ninguna de las fracciones del método y se ve reflejado en el residual.

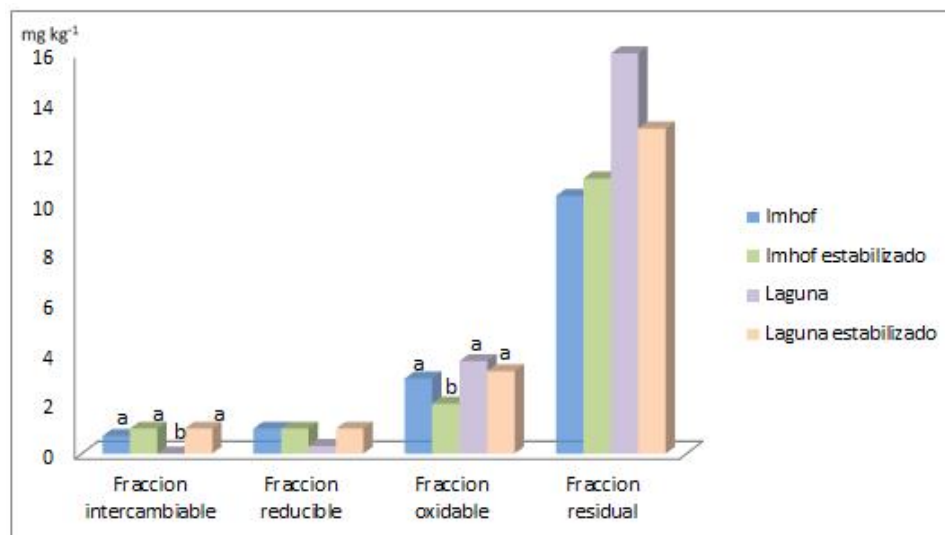


Figura 4. Extracción secuencial de Cr en los lodos de la PTAR

El Cr es el elemento que se presentó en menor cantidad que el resto de los elementos detectados. Como se observa en la figura 4 la fracción residual es donde se presentó mayor cantidad del elemento y la fracción intercambiable es donde se presentó en menor cantidad el Cr.

La fracción intercambiable de este elemento presenta una diferencia significativa entre laguna y los demás tratamientos. En la figura 4 se muestra que al aplicarle el material estabilizante aumento el contenido de Cr en los tratamientos.

La fracción reducible no presenta diferencia significativa entre tratamientos y tiene un comportamiento semejante a la fracción intercambiable, donde el tratamiento laguna existe menos cantidad de Cr que los demás tratamientos.

La fracción oxidable presenta diferencia significativa entre los tratamientos del tanque Imhof, estabilizado y los demás tratamientos, los tratamientos del tanque Imhof, laguna y laguna estabilizada, no muestran diferencias estadísticas. En este caso el comportamiento es contrario a las formas anteriores ya que aquí los lodos estabilizados tienen un contenido ligeramente menor que los lodos en bruto.

En el caso de La fracción residual del Cr Los tratamientos Imhof alcalino y laguna alcalina presentan menor cantidad de Cr residual que los tratamientos que no se estabilizarón. Sin embargo estas diferencias son mínimas y se sigue manteniendo lo mencionado anteriormente para el caso del Pb, es decir el efecto del pH sobre las fracciones extractable.

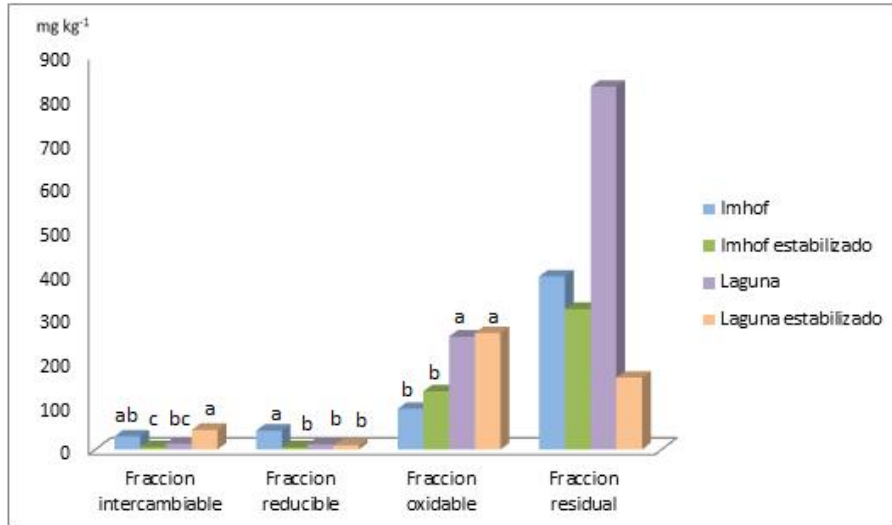


Figura 5. Extracción secuencial de Fe en los lodos de la PTAR

El Fe es uno de los elementos que se presenta en mayor cantidad en la fracción total. En la figura 5 se muestra como el Fe es difícilmente extraído en sus formas intercambiable y reducible, aumenta en la fracción oxidable y una gran cantidad del elemento permanece como Fe residual.

En la misma figura 5 se puede observar que en la Fracción intercambiable hay diferencia significativa entre los tratamientos, en el tratamiento Imhof y laguna alcalino se presenta mayor cantidad de Fe siendo el tratamiento laguna alcalino el que tiene mayor presencia de Fe 30.0 mg kg^{-1} . Y el tratamiento del tanque Imhof alcalino es donde el Fe se encuentra en menor proporción con tan solo 5.7 mg kg^{-1} .

Fracción reducible existe diferencia significativa entre los tratamientos, el tratamiento del tanque Imhof a comparación del resto de los tratamientos es el que muestra mayor cantidad de Fe. En la figura 5 se observa también como al aplicarles el material estabilizante a los tratamientos disminuye la cantidad de Fe.

La fracción oxidable hay diferencia significativa entre los tratamientos Imhof y laguna. Siendo los tratamientos laguna y laguna alcalino los que mayor cantidad

de Fe presentan, en esta fracción, a los tratamientos que se les aplicó la estabilización alcalina presentaron mayor cantidad de Fe que los que no fueron estabilizados.

En la fracción residual los tratamientos que no fueron estabilizados tuvieron más Fe que los tratamientos que se estabilizaron. El tratamiento laguna con 829.4 mg kg⁻¹ es el que mayor cantidad de Fe presentó y el que tuvo menor cantidad de Fe es el tratamiento laguna alcalino con 164 mg kg⁻¹

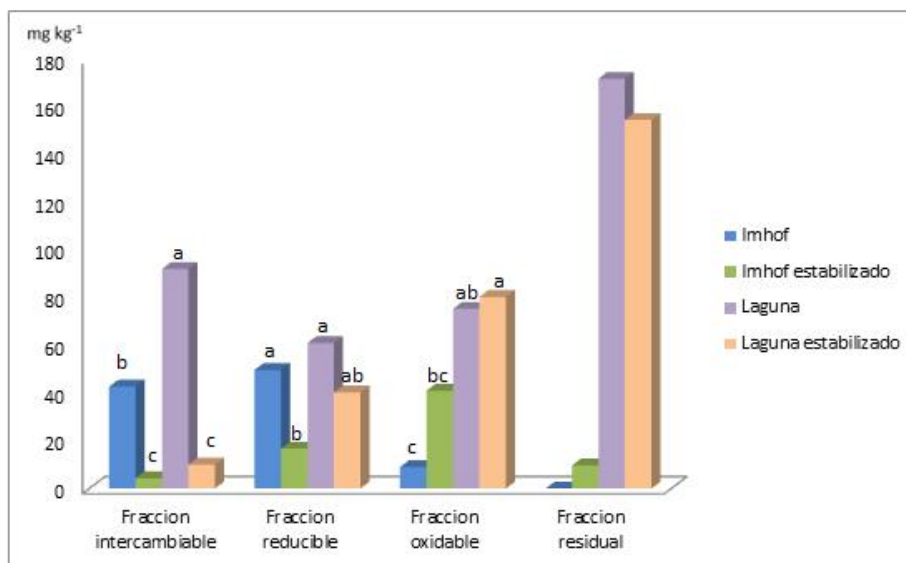


Figura 6. Extracción secuencial de Zn en los lodos de la PTAR

El Zn como se observa en la figura 6 muestra que hay una gran cantidad de este elemento en los tratamientos que se analizaron.

En la fracción intercambiable hay diferencia significativa entre los tratamientos, donde los tratamientos que no se estabilizaron, tienen mayor cantidad de Zn que los que se estabilizaron, el tratamiento laguna es el que obtuvo mayor cantidad de Zn, mientras que el tratamiento del tanque Imhof alcalino es el que obtuvo menor cantidad de este elemento.

La fracción reducible nos muestra la figura 6 que hay diferencia significativa entre los tratamientos y tienen un comportamiento parecido a la fracción intercambiable al aplicarles la materia alcalina para estabilizar los lodos disminuye la cantidad de Zn que puede ser extraído pero en mayor cantidad que el intercambiable.

La fracción oxidable hay diferencia significativa entre los tratamientos donde el tratamiento del tanque Imhof es el que obtuvo menor cantidad de Zn 9 mg kg^{-1} y el tratamiento laguna estabilizado obtuvo la mayor cantidad de Zn con 80.3 mg kg^{-1} . Los tratamientos que se les aplicó la cal hidrata obtuvieron mayor cantidad de Zn que los tratamientos que no se estabilizaron.

En cuanto a la fracción residual el tratamiento del tanque Imhof estabilizado presento mayor cantidad de Zn que el tratamiento del tanque Imhof que no fue estabilizado, mientras que en los tratamientos laguna el tratamiento en bruto el Zn se presento en mayor cantidad que el tratamiento que fue estabilizado, haciendo la comparación entre los puntos de muestreo señalados anteriormente los tratamientos laguna presentaron mayor cantidad de Zn que los tratamientos del tanque Imhof.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación y, en base a los objetivos e hipótesis se puede concluir lo siguiente:

En general las concentraciones de los metales pesados estudiados, en las fracciones obtenidas por el procedimiento de extracción secuencial BCR, muestran que los valores mas altos corresponden a la fracción oxidable, lo que se ve reflejado en la fracción residual, indicando con ello una baja biodisponibilidad.

Al comparar el comportamiento de los metales analizados en los lodos de PTAR de la UAAAN, al aplicarle la materia alcalina esta insolubiliza los metales pesados ya que los tratamientos que fueron estabilizados se encontró que el contenido de estos disminuyo en comparación a los lodos que no se les aplico ningún tratamiento de estabilización.

VI. LITERATURA CITADA

- Alloway, B. J. 1990. Soil processes and the behavior of metals. En: Heavy metals in soils (B.J. Alloway, Ed.). John Wiley & Sons, Nueva York, pp. 7-18. and biosolids use and disposal. IAWQ. Inglaterra. Scientific and technical report 4.
- Andrade, M^a L., Marcet. P. 2000. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos edafología. Volumen 7-3 septiembre 2000. pág. 21-29.
- Andreoli, C., A. Ferreira, C. Cherubini, C. Rodríguez, Ch. Cameiro e F. Fernandes, 2001. Capítulo 4, Higienizado de lodo de esgoto. p 87-116. En: Andreoli, C. Residuos sólidos de saneamiento: procesamiento e disposición final. ABES y PROSAB, Río de Janeiro, Brasil.
- Barry, G. A., Chudek P. J., Best E.K., y Moody P.W. 1995. Estimating sludge application rates to land based on heavy metals and phosphorus sorption characteristics of soil. Water Research, 29, 2031-2034.
- Boost, M. and Poon C. 1998. The effect of a modified method of lime-stabilization sewage treatment on enteric pathogens. Environ. Intl. 24(7): 783-788.
- Carrozzi, A. y Steinle E. 1994. Tratamiento anaerobio de plantas municipales, en III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento de Aguas Residuales" Universidad de la República. pp 200-205. Montevideo Uruguay.
- Cepis/repamar. 1999. Manejo ambientalmente adecuado de lodos provenientes de plantas de tratamiento. Dirección de medio ambiente. Quito, Ecuador.
- Díaz, Burgos, M.A. 1990. Compostaje de lodos residuales: Aplicación agronómica y criterios de madurez. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, 127 p.
- DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en agua y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 3 – 7.
- DOF. 1998. Ley general del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México, D.F.

- Environmental Protection Agency (EPA). 2003. Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. En: <http://www.epa.gov.co/ORD/NRMRL/pubs/625r92013/625R92013.pdf>. Consulta: Mayo 2007.
- Fernandez, S. de Souza. 2001. Capítulo 2: Estabilización de lodo de esgoto. p. 29-55. En: Andreoli, C. Resíduos sólidos de saneamento: procesamiento y disposición final. ABES y PROSAB, Río de Janeiro, Brasil.
- Filgueiras, A. V., Lavilla I., Bendicho C. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. J. Environ. Monit. 4, 823-857.
- García, I. Dorronsoro, C. 2009 Contaminación del suelo. Tema 15. Contaminación de metales pesados. Actualización: 10 de octubre del 2009, p.1 <http://edafologia.ugr.es/conta/tema00/home.htm>.
- Genevini, P.L., Vismara, R., Mezzanotte, V. 1986. Utilizzo agricolo dei fanghi di depurazione. Quaderni d'ingegneria ambientale, 5; 1-119.
- Gomes, P. C., Fontes, M. P. F., da Costa, L. M., Mendoca, E. S. 1997. Extração fracionada de metais pesados em latossolo vermelho-amarelo. Revista Brasileira. Ciencia do Solo. Vicosa, 21, 453-551.
- González, F. E. 2011. Efecto ambiental y económico social por la aplicación de biosólidos de origen urbano como mejoradores de suelos agrícolas. Tesis Colegio de Postgraduados, Puebla, Puebla.
- González, G. A. 2011. Metales pesados en lodos de la planta tratadora de aguas residuales de la UAAAN. Tesis Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista Saltillo Coahuila.
- González, E., Tornero, M., Angeles, Bonilla, N, Fernandez. 2009 Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. Rev. Int. Contam Ambient. 25(1), 2009, pp. 15-22
- Guidi, G., Pagliai, M., Giachetti, M. 1983. Modifications of some physical and chemical soil properties following sludge and compost applications. In: The influence of sewage sludge application on physical and biological properties of soil. J. Catroux, P.L'Hermitte y E. Suss (eds). 122-130.
- Gutiérrez, A., Sastre H., Mahamud M., 1996. Biosólidos generados en la depuración de aguas: (II). Métodos de tratamiento Ingeniería del Agua. Vol. 3 Num. 3 p. 45
- Guzmán, C., Campos C. 2004. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura. Universitas Scientiarum 9(1):59-67.

- Hernández, Muñoz, A. 1994. Depuración de Aguas Residuales. 3a Edición. Colección Seinor. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Hlavay, J., Prohaska T., Weisz M., Wenzel W. W., Stinger G.J. 2004. Determination of trace elements bound to soil and sediment fractions. Pure Appl. Chem.76, 415-442.
- Holgrem, G. G., Mayer M. H., Chaney, R. L., Daniel, R. B. 1993. Cadmium, Lead, Zinc, Copper and Nickel in agricultural soils of United States of America. J. Environ. Qual. 22:335-348.
- Hue, N.V., Silva, J. A., Arifin, R. 1988. Sewage sludge soil interactions as measured by plant and soil chemical composition. J. Environm. Qual, 17: 384-390
- Hue, N. V. 1996. Land application of biosolids. Environmental Soil Chemistry, University of Hawaii. Sludz. Htm at agrss. Sherman. Hawaii. Edu. 9 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1998. Tratamiento y aprovechamiento de residuos de curtiduría por composteo y vermicomposteo. Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis Químico de Suelos. 3ra edición. Ed. Omega, S. A. Barcelona España.
- Jiménez, B, Barrios J., Maya C. 1999. Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado. Instituto de Ingeniería UNAM. Ciudad de México.
- López, J. L., López J. M. 1990. El diagnóstico de suelos y plantas. Ediciones Mundi - Prensa. España. 264 p.
- López, J., Maldonado C. 2002. Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en Ciencias Geológicas 58: 133-144
- Loué, L. 1988. Los microelementos en la agricultura. Ediciones Mundi - Prensa. España. 326 p.
- Lue-Hing, C., Matthews, P., Nàmer, J., Okuno, N., Spinosa L. 1996. Sludge management in highly urbanized areas. En: A Global Atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal. IAWQ. Inglaterra. Scientific and technical report 4.
- Martínez, Y., River C. 2005 Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo. Revista Ingeniería UC. Vol. 12, no 3, 14-20, 2005.
- McBride, M.B., 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of siudge: are US EPA regulations protective. J. Environ. Qual., 24,5-18.

- Mendoza, S. I. 2002. Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis Colegio de Postgraduados Montecillo, Texcoco, México.
- Metcalf, Eddy. 1996, Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Ed. Mc Graw-Hill, Trad. Trillo M. J. de D. y Trillo F. I. pp 865-1050.
- Metcalf, Eddy. 1991, Wastewater Engineering. Treatment. Disposal. and Reuse. 3a Edición. Me Graw-Hill Inc., Nueva York.
- Morel, J. I. 1977. Contribution a l'étude des boues residuaires dans le sol. Thèse d'état. Faculté des Sciences. Paris, 135 pp.
- Muñoz, A., F. Chejne, J. Espinel, C. Londoño. 2006. Evaluación de la celulosa de papel y de las cenizas de carbón como materiales aislantes alternativos. Dyna 73(148):1-8.
- O'Connor, G. A., Elliot H. A., Basta N.T., Bastian R. K., Pierzynski G. M., Sims R.C., Smith Jr. J. E. 2005. Sustainable land application: An overview. J. environ Qual. 34, 7-17.
- Olivares, S. E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUANL Versión 2.5. Facultad de Agronomía UANL. Marín, N.L.
- Oliveira, F. C., Mattiazzo M. E. 2001. Metais pesados em latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana de acuar. Scientia agrícola, 58, 581-593.
- Oropeza, G. N. 2006. Lodos residuales: Estabilización y manejo. 1: 51-58, Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo
- Ostergaard, H. Birgitte. 1997. Sewage sludge amended soils and heavy metals. Birgitpr.htm at weber.u.washington.edu. 8 p.
- Pérez, P. 2011. Metales pesados y calidad agronómica del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAAAN. Tesis universidad Autónoma agraria Antonio Narro. Buenavista Saltillo Coahuila, México.
- Pérez-Cid, B., Lavilla I., Bendicho C. 1999. Application of microwave extraction for partitioning of heavy metals in sewage sludge. Anal. Chim. Acta. 378, 201-210.
- Pires, A. N. N., Mattiazzo, M. E. 2003. Biosolids conditioning and the availability of Cu and Zn for rice. Scientia Agrícola, 60, 161-166.
- Porta, J. López, Acevedo M., Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. Mundi - prensa. Madrid.

- Ramírez, R., M. Pérez. 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). Rev. Fac. Nal. Agr.
- Ramírez, R., D. Velásquez, E. Acosta. 2007. Efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de *Jacaranda mimosifolia* (Gualanday) en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. Rev. Fac. Nal. Agr.
- Rauret, G., López-Sánchez J. F., Sahuquillo, A., Barahona E., Lachica M., Ure A.M., Davison C.M., Gómez, A., Lück D., Bacon J., Yli-Halla M., Muntau H., Quevauviller Ph. 2000. Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in sewage sludge amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content. *J. Environ. Monit.* 2, 228-233.
- Renner, R. 2000. Sewage sludge, pros & cons. *Environ. Sci & Tech.* 34,1-19.
- Sánchez, H. Z. E. 2009. Propuesta para el tratamiento de metales pesados en lodos residuales de origen urbano, utilizando vermicomposteo. Tesis Instituto Politécnico Nacional, Altamira Tamaulipas.
- Scancar, J., Milacic R., Strazar M., Burica O. 2000. Total metal concentrations and partitioning of Cd, Cr, Cu, Fe, Ni and Zn in sewage sludge. *Sci. Total Environ.* 250, 9-19.
- Schiffman, S. S. y Williams C. M. 2005. Science of the odor as a potential health issue. *J. Environ. Qual.* 34, 29-138.
- SEMARNAT. 2002. 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.. Diario Oficial de la Federación. Publicada el 15 de Agosto del 2003.
- Sposito, G., Lund, L.J., Chang, A.C. 1989. Trace Metal Chemistry in Arid Zone Field Soil amended with Sewage Sludge. I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in Solid Phases Soil. *Science. Society of America. J.* 46: 260-264.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical. Chem.*, 51,844-851
- Tokalioglu, S., Kartal S., Elci L. 2000. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry

after a four-stage sequential extraction procedure. *Anal. Chim. Acta* 413, 33-40.

- Torres, L. P. Madera P. C. A. 2008 Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de, tratamiento de aguas residuales domésticas para, aprovechamiento agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, vol. 61, núm. 1, junio, 2008, pp. 4432-4444 Universidad Nacional de Colombia. Colombia
- U.S., EPA. 1984. Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA/625/10-84/003. Cincinnati, OH.
- U.S., EPA. 1987. Survival and transport of pathogens in sludge-amended soil: A critical literature review. EPA/600/2-87/028. 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. 1992. Technical support document for land application of sewage sludge, Vol. I. EPA/822/R-93900/9 (NTIS PB93110583). Washington, DC.
- U.S., EPA. 1995 a. Process design manual: Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage EPA/625/R-95/001. Cincinnati, OH.
- Vigueras, C. S. E. 2002. Digestión anaerobia en una de dos etapas de lodos residuales secundarios pretratados químicamente, Tesis Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, Iztapalapa D.F
- Vinneras, B. A., Björklund, H. Jönsson. 2003. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method—laboratory-scale and pilot-scale studies. *Bioresour. Technol.* No. 88(1):47–54.
- Yub, H. K., Shin E. B., Choi H. B. 1997. A mechanical pretreatment of waste activated sludge for improvement of anaerobic digestion system. *Water Science and Technology*.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., Monaco, A., De Bertoldi, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle* 27-29.