



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO DE EDAFOLOGIA

**METALES PESADOS EN LODOS
RESIDUALES VERTIDOS EN
SOCAVONES Y REVEGETACIÓN EN
LA MINA DE ARENA DE SAN
MIGUEL TLAIXPAN, TEXCOCO.**

KARLA ISABEL MEDRANO ORTIZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: METALES PESADOS EN LODOS RESIDUALES VERTIDOS EN SOCAVONES Y REVEGETACIÓN EN LA MINA DE ARENA DE SAN MIGUEL TLAIXPAN, TEXCOCO realizada por la alumna Karla Isabel Medrano Ortiz, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

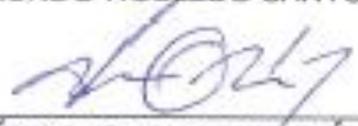
CONSEJERO


DR. VICENTE ESPINOSA HERNÁNDEZ

ASESOR


DR. EDMUNDO ROBLEDO SANTOYO

ASESOR


DR. JULIÁN DELGADILLO MARTÍNEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2015

METALES PESADOS EN LODOS RESIDUALES VERTIDOS EN SOCAVONES Y REVEGETACIÓN EN LA MINA DE ARENA DE SAN MIGUEL TLAIXPAN, TEXCOCO.

KARLA ISABEL MEDRANO ORTIZ, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2015.

RESUMEN

El crecimiento de la población y la demanda excesiva de agua traen como resultado el aumento de sedimentos, lo cual acarrea problemas de contaminación por sus altas concentraciones de elementos trazas que no tienen una función biológica definida, y que pueden integrarse al suelo, a los cuerpos de agua y/o al manto freático. De esta manera, estos elementos ingresan a la cadena alimenticia, en especial por su acumulación en los organismos que en ella participan. En este trabajo se evaluaron las características físico-químicas y la movilidad de elementos potencialmente tóxicos (Cd y Pb) en lodos residuales vertidos en socavones de una mina de arena ubicada en San Miguel Tlaixpan, Texcoco. Los resultados obtenidos muestran que la concentración de Cd y Pb en lodos depositados en socavones se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles por la Norma Mexicana que rige esta actividad. Además de que los niveles de estos metales son bajos, su movilidad no se ve afectada por la época del año. Las características físico-químicas de los lodos permiten el establecimiento de especies vegetales, lo cual, puede repercutir en una posible recuperación de estos suelos erosionados. La composición florística de la zona afectada por el depósito de lodos residuales fue dominada por hierbas de la Familia Asteraceae y Poaceae.

Palabras clave: Enmiendas orgánicas, cadmio, plomo, diversidad, revegetación.

HEAVY METALS IN SEWAGE SLUDGE DUMPING IN TUNNELS AND REVEGETATION IN A SAND MINE SAN MIGUEL TLAIXPAN, TEXCOCO.

KARLA ISABEL MEDRANO ORTIZ, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2015.

ABSTRACT

The population growth and excessive water demand as a result bring increased sediments, which brings problems of contamination by high concentrations of trace elements that have a defined biological function, and can be integrated to the ground, bodies of water and / or groundwater. Thus, these elements enter the food chain, especially by its accumulation in organisms that participate in it. In this paper the physical and chemical characteristics and mobility of potentially toxic elements (Cd and Pb) in sewage sludge dumped in a sand mine tunnels located in San Miguel Tlaixpan, Texcoco were evaluated. The results show that the concentration of Cd and Pb in sludge deposited into tunnels is below the maximum permissible limits for the Mexican Standard that governs this activity. In addition the levels of these metals are not affected by the season of the year. The physico-chemical properties of the sludge characteristics allow the establishment of plant species, which can affect a possible recovery of these eroded soils. The floristic composition of the area affected by the sludge was dominated by grasses of the family Asteraceae and Poaceae.

Keywords: Organic amendments, cadmium, lead, diversity, revegetation.

DEDICATORIA

A MI HIJA:

FRIDA

Porque tú has sido mi motor en esta vida,

Me llenas de amor y alegrías,

Y me das la inspiración para ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS

Gracias adiós por darme la oportunidad de despertar cada día y llegar hasta el final de esta nueva etapa.

Gracias a mis padres Carlos y Josefa y hermanos por brindarme su apoyo incondicional.

Gracias a José Luis Barragán por ser mi compañero de vida, por escucharme y apoyarme incondicionalmente en todo momento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento de beca otorgado.

Gracias al Dr. Julián Delgadillo quien me oriento y guio durante la realización de este trabajo.

Gracias al Dr. Edmundo Robledo quien me apoyo en todo momento de esta travesía.

Gracias al Dr. Vicente Espinosa por darme la oportunidad de ser parte de su grupo de trabajo.

Gracias al M.C Francisco Landeros † y a las personas del laboratorio de física de suelos quienes me apoyaron en el laboratorio para sacar adelante este proyecto.

Gracias al Herbario de la preparatoria de Chapingo, en especial a la Maestra Ernestina y al maestro Antonio quienes fueron parte fundamental para la terminación de este trabajo.

Gracias a Rosita, Samantha, Humberto, Francisco, Enrique y a todas aquellas personas que me brindaron su amistad durante mi estancia en este lugar.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
JUSTIFICACIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS PARTICULARES.....	2
HIPÓTESIS GENERAL	3
HIPÓTESIS PARTICULARES.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Suelo	4
1.2 Contaminación	5
1.2.1 Contaminación del suelo	6
1.3 Lodos residuales	8
1.3.2 Tipos de lodos	10
1.3.2.1 Lodo primario	10
1.3.2.2 Lodo secundario	10
1.3.2.3 Lodos terciarios	11
1.3.3 Características de los Lodos Residuales.....	11
1.3.3.1 Propiedades físicas de los lodos	11
1.3.3.2 Propiedades Químicas	12
1.3.3.3 Características Biológicas	13
1.3.4 Contaminantes en lodos residuales.....	13
1.3.4.1 Metales pesados	14
1.3.4.1.1 Plomo (Pb)	18
1.3.4.1.2 Cadmio (Cd)	19
1.4 Norma Oficial Mexicana	20
1.5 Lodos residuales en la agricultura	21
1.6 Revegetación con lodos residuales	26
1.7 Conclusiones de la literatura citada	27
MATERIALES Y MÉTODOS	28
2.1 Descripción del área de estudio	28
Eta pa 1. Análisis físico-químico de los lodos residuales	29

1.1 Muestreo.....	29
1.2 Acondicionamiento de muestras.....	29
1.2.1 Secado	29
1.2.2 Tamizado	29
1.3 Análisis químicos.....	30
1.3.1 Determinación de pH	30
1.3.2 Materia orgánica	30
1.3.4 Capacidad de Intercambio Catiónico.....	30
1.3.5 Nitrógeno total.....	30
1.3.6 Determinación de nitratos	31
1.3.7 Metales totales	31
1.3.8 Metales biodisponibles	31
1.4 Análisis físicos	31
1.4.1 Determinación de textura	31
2.4.2 Densidad aparente	32
1.5 Análisis Estadístico	32
Etapla 2. Análisis botánico de la zona de estudio	32
2.1 Muestreo de vegetación.....	33
2.2 Descripción de las especies colectadas.....	34
2.3 Estimación de la diversidad alfa y beta	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
Caracterización del suelo de la mina	36
Etapla 1. Análisis físico-químico de lodos residuales depositados en socavones.	38
pH	38
Materia orgánica	39
Capacidad de intercambio catiónico.....	40
Nitrógeno total	41
Nitratos	42
Textura (Clase textural)	44
Metales pesados.....	45
Cadmio	45
Plomo	47

Etapla 2. Análisis botánico de la zona de estudio	49
Muestreo de la vegetación	51
Riqueza de especies.....	52
Diversidad alfa.....	53
Diversidad beta	55
Especies presentes en la mina de San Miguel Tlaixpan	57
Especies cuya presencia se debe a la aplicación de lodos residuales en el socavón.	67
CONCLUSIÓN	79
LITERATURA CITADA	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos y lodos residuales (NOM-004-SEMARNAT-2002).	21
Cuadro 2 Ensayos de lodos residuales aplicados en cultivos.....	24
Cuadro 3 Características químicas del suelo de la mina de Texcoco.	37
Cuadro 4 Concentración de Cd y Pb en suelos de la mina de San Miguel, Tlaixpan	38
Cuadro 5 Características químicas de los lodos residuales depositados en socavones	41
Cuadro 8 Densidad aparente (Da) y textura de lodos residuales	44
Cuadro 9 Listado de las especies colectadas en la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco	51
Cuadro 10 Índices Shannon-Wiener y Equitatividad de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco.....	54
Cuadro 11 Listado de presencia y ausencia de las especies encontradas dentro y fuera de los lodos vertidos en los socavones de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco	55
Cuadro 12 Índices de similitud Jaccard y Sorensen de las especies encontradas en los socavones de la mina.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Vista aérea de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco	28
Figura 2 Sitio de muestreo. Composición florística área aledaña al socavón 1..	33
Figura 3 Sitio de muestreo. Composición florística del socavón 3	33
Figura 4 Especie colectada en el área aledaña al socavón 1	33
Figura 5 Especie colectada en el socavón 2	33
Figura 6 Identificación de ejemplares por la M.C Ernestina Cedillo	34
Figura 7 Fruto de un ejemplar de la familia Malvaceae	34
Figura 8 Concentración de Cadmio total en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes	46
Figura 9 Concentración de Cadmio biodisponible en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes	47
Figura 10 Concentración de Plomo total en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes	48
Figura 11 Concentración de Plomo biodisponible en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes	49
Figura 12 Número de especies encontrada en cada uno de los sitios de muestreo de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco	53

JUSTIFICACIÓN

Los lodos residuales, aportan compuestos como elementos traza metálicos (ETM) y altas cargas de microorganismos patógenos (Alloway et al, 1998; Epstein, 2010), que crean problemas de contaminación por la presencia de elementos potencialmente tóxicos como el zinc, cobre, níquel, cadmio, plomo, mercurio y cromo, que pueden ser movilizados hacia la solución del suelo, en donde podrían ser absorbidos por las plantas o ser lixiviados hacia los mantos acuíferos afectando los suministros de agua potable para los humanos (Álvarez *et al*, 2002) limitando así, su uso en tierras agrícolas. Los metales pesados pueden ingresar a las redes tróficas por los mecanismos mencionados y ocasionar en primera instancia bioacumulación y una posterior biomagnificación a través de los niveles tróficos superiores (González *et al*, 2009). Sin embargo, la aplicación de lodos residuales puede resultar factible, ya que presentan características físico-químicas aceptables para su incorporación al suelo, siendo que contienen una buena fuente de materia orgánica, microorganismos y una gran cantidad de nutrientes esenciales (N y P), por esta razón, su uso en la agricultura está siendo considerado como un medio de reciclaje ecológico (Ors *et al*, 2015).

OBJETIVO GENERAL

Determinar la concentración de metales pesados en lodos residuales vertidos en socavones de minas de arena, con la finalidad de conocer su movilidad hacia los mantos acuíferos y evaluar la flora debida a la presencia de los residuos orgánicos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Cuantificar Cadmio y Plomo en lodos residuales en dos épocas del año (lluvias y secas) depositados en socavones de minas.
- Determinar y evaluar la diversidad de vegetación en los socavones de minas debido a la presencia de lodos residuales.

HIPÓTESIS GENERAL

Los lodos residuales presentan concentraciones de metales pesados en dos épocas del año que se encuentran dentro del rango permitido, lo que permite su uso en suelos degradados teniendo un impacto positivo en la revegetación de los socavones de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco.

HIPÓTESIS PARTICULARES

- La concentración de metales pesados en lodos residuales se encuentra dentro del límite permitido por la NOM-004.
- La aplicación de lodos residuales en socavones de Texcoco provoca cambios en la flora del sitio.

INTRODUCCIÓN

1.1 Suelo

Los suelos son sistemas naturales abiertos y complejos, constituidos por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que se forman en la superficie de la corteza terrestre y que ocupan un lugar en el espacio, que se caracteriza por tener horizontes o capas, influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía. El suelo proporciona a las plantas un medio adecuado para el desarrollo de las raíces y la germinación de las semillas (Soil Survey Staff, 2010).

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas.

Son sistemas muy heterogéneos en equilibrio dinámico con otros compartimentos, y juegan un papel fundamental en la regulación del destino de los contaminantes en los ecosistemas, tienen la capacidad de filtrar el agua, funcionan como regulador natural que controla el transporte de elementos y sustancias a la atmósfera, hidrosfera y a la biota, cubriendo a toda la superficie terrestre, excepto las afloraciones rocosas y las de hielo perpetuo, aguas profundas o glaciares con floramientos del hielo (Estévez et al, 2000; Dell Aglio et al, 2011).

1.2 Contaminación

La contaminación, se produce por la incorporación de cualquier tipo de energía, organismo o sustancia, que afecta las características de los ecosistemas, modificando negativamente sus propiedades y su capacidad para asimilarlas o degradarlas. Su entrada se realiza como consecuencia de las actividades antropogénicas, aunque también se puede producir de forma natural (Delgadillo et al, 2011).

Los contaminantes se clasifican en: Contaminantes orgánicos e inorgánicos

Contaminantes orgánicos: incluyen hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's), PCB's, dioxinas, hidrocarburos halogenados como tricloroetileno (TCE), y explosivos como el trinitrotolueno (TNT), disolventes clorados, compuestos aromáticos que se emplean en la producción de colorantes, productos farmacéuticos, plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), entre otros. En comparación con los compuestos inorgánicos, estos contaminantes son menos tóxicos para las plantas, ya que son menos reactivos y se acumulan en menor proporción (Cherian y Oliveira, 2005; Delgadillo et al, 2011)

Contaminantes inorgánicos: incluyen a los metales pesados como el mercurio (Mg), el plomo (Pb) y el cadmio (Cd) y compuestos metálicos tales como el arsénico (As). Algunos metales son esenciales para el crecimiento normal y el desarrollo de las formas de vida. Sin embargo, en altas concentraciones, los metales se convierten en tóxicos y dan lugar a estrés oxidativo y radicales libres, que son muy perjudiciales para las células. Algunos iones metálicos son particularmente reactivos y pueden interferir con la estructura y función de las

proteínas. La alta concentración de contaminantes inorgánicos conducen a la sustitución de otros nutrientes esenciales (Cherian y Oliveira, 2005).

La tierra y el agua son recursos naturales muy preciados, de ellos depende la sostenibilidad de la agricultura y la civilización de la humanidad. Desafortunadamente, han sido sometidos a una explotación máxima y una severa degradación o contaminados debido a las actividades antropogénicas (Lone et al, 2008).

1.2.1 Contaminación del suelo

La contaminación de suelos y sedimentos por metales pesados es un problema ampliamente extendido en los países industrializados. En muchos casos, la presencia de dicha contaminación es un problema ambiental permanente que eleva la preocupación debido a los riesgos inherentes para la salud humana y de los ecosistemas e impone severas restricciones al uso del suelo o graves efectos para el funcionamiento de los ecosistemas o la calidad del agua (Urzelai et al, 2001; Brunetti et al, 2009; Marrero et al, 2012).

Los suelos pueden ser contaminados por la acumulación de metales y metaloides pesados que alteran la calidad de nuestro ambiente y derivan de diferentes fuentes: naturales y antropogénicas. Las fuentes naturales más importantes son el desgaste de minerales, la erosión y la actividad volcánica, mientras que las fuentes antropogénicas incluyen la minería, las emisiones y descarga de sólidos de las zonas industriales, fundición, galvanoplastia, actividades humanas (uso de pesticidas y fertilizantes (fosfatos), así como los biosólidos en la agricultura), vertido de lodos de depuradora, la deposición atmosférica que pueden ser

categorizados como aerosoles urbano-industriales, desperdicios líquidos y sólidos de animales y del hombre, riego con aguas residuales, residuos de la combustión del carbón, el derrame de productos petroquímicos y fuentes no puntuales tales como sales solubles (Cajuste y Reggie, 2001; Lone et al, 2008; Wuana y Okieimen, 2011; Ali et al, 2013).

En México existen actualmente una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, la superficie del suelo degradado por causas de contaminación es del 13.4 %, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos. En el periodo 2003 a 2006, la tasa media anual de pérdida de suelo en México fue de 0.3 %; el 38 % del territorio se encuentra afectado por algún tipo de degradación, mientras que la contaminación del suelo por residuos sólidos municipales registra una tasa de crecimiento media anual de 3.7 % (INEGI, 2010).

Las características de un suelo hacen que se absorban compuestos en cualquiera de sus estados (sólido, líquido o gaseoso), la cantidad y calidad de los sitios de adsorción, la concentración y tipo de complejos orgánicos e inorgánicos, la composición catiónica y aniónica del suelo, conductividad hidráulica y actividad microbiana, son factores que afectan el comportamiento de los metales. Por lo cual es muy fácil que los contaminantes, cualquiera que sea su naturaleza puedan difundirse con gran facilidad a lo largo y ancho del terreno afectado. La movilización de metales pesados por el hombre (por medio de la minería y del procesamiento para diferentes aplicaciones) ha dado lugar a la contaminación de

diferentes segmentos ambientales, como resultado de su liberación y la presencia en los ecosistemas, estos contaminantes se acumulan en los organismos vivos y, posteriormente, a medida que se biomagnifican pasan de un nivel trófico al siguiente. El desarrollo industrial ha generado grandes volúmenes de suelos contaminados, debido a que vierten sus residuos peligrosos (hidrocarburos, metales pesados, solventes) en el drenaje o directamente en el suelo (Ramos et al, 2001; Rodríguez et al, 2010; Ali et al, 2012).

1.3 Lodos residuales

Epstein (2010), señala que debe hacerse una distinción respecto de la definición de lodo y biosólido, ya que el lodo es un término genérico que se usa para diferentes materiales tanto de tipo orgánico como inorgánico que están sometidos a un tratamiento; mientras que el biosólido es un término que se aplica a todos aquellos residuos biológicos que han sufrido un proceso de tratamiento.

La Norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 los define como sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras o de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

1.3.1 Generación de lodos residuales

El aumento de la población en México, ha tenido como consecuencia un incremento en la red de agua potable y drenaje, dando lugar a la construcción de plantas para su tratamiento (PTAR) (Rojas y Mendoza, 2012).

El tratamiento de las aguas residuales, tanto municipales como industriales, tiene como objetivo remover los contaminantes presentes, con la finalidad de hacerlas aptas para otros usos o bien para evitar daños al ambiente (Oropeza, 2006). Sin embargo, trae como consecuencia la formación de lodos residuales (material semisólido) que son evacuados a través de la red de alcantarillado y plantean un serio problema de eliminación (Olowu et al, 2012), en México son considerados como residuos peligrosos (Rojas y Mendoza, 2012).

Los lodos son producidos durante los procesos mecánico, biológico y/o químicos de purificación del agua (Kosobucki et al, 2000), son compuestos orgánicos sólidos, semisólidos o líquidos, contenidos en el efluente (lodos primarios), o de la formación de nuevos sólidos suspendidos (lodos activados) (Campos et al, 2009; Marambio y Ortega, 2003). Contiene minerales orgánicos, e impurezas biológicas en formas solubles, insolubles y coloidales. Este residuo es generalmente poco utilizado por razones psicológicas, económicas, jurídicas y tecnológicas. Siendo acumulado año tras año, ocupa extensas superficies y perjudica al ambiente (Siuris et al, 2011).

En 2011 se generaron 6.7 mil millones de aguas residuales, y se espera que en 20 años el volumen de agua tratada sea de 9.2 mil millones de m³. Esto implica que la generación de lodos residuales se incremente de 640 000 toneladas a 880 000 toneladas para el 2030 (Rojas y Mendoza, 2012). Estos grandes volúmenes de lodos, en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmosfera, del agua y del suelo, afectando a los ecosistemas del área donde se depositen.

Los contaminantes contenidos en las aguas residuales pasan a las plantas de tratamiento donde se eliminan en gran medida por la absorción en el lodo producto de un tratamiento fisicoquímico o biológico (Oropeza, 2006), pueden contener compuestos tóxicos (metales pesados, pesticidas) y organismos patógenos (bacterias, huevos de parásitos) (Kosobucki et al, 2000).

1.3.2 Tipos de lodos

Los tipos de lodos residuales depende del tratamiento del agua residual; los lodos primarios, secundarios y terciarios. Según sus características sanitarias se clasifican de la siguiente manera: lodos clase A, aquellos sin restricciones sanitarias para su aplicación benéfica al suelo (coli fecales < 1.000 NMP/g lodo) y lodos clase B, aquellos aptos para aplicación benéfica al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos (coli fecales < 2.000.000 NMP/g lodo) (Paz et al, 2007).

1.3.2.1 Lodo primario

Es el lodo resultante del tratamiento primario del agua residual y que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento, usualmente contiene de 93 % a 99.5 % de agua, así como sólidos y sustancias disueltas que estuvieron presentes en el agua residual o fueron agregados durante los procesos de tratamiento del agua residual.

1.3.2.2 Lodo secundario

Los tratamientos secundarios del agua residual, involucran un proceso de clarificación primario seguido de un tratamiento biológico y una clarificación

secundaria, el lodo generado por procesos de tratamiento secundarios del agua residual, tales como los sistemas biológicos activados y filtros de goteo contiene de 0.5 a 2 por ciento de sólidos y son más difíciles de espesarse y deshidratarse que los lodos primarios.

1.3.2.3 Lodos terciarios

Son producidos por tratamientos avanzados del agua residual, como la precipitación química y filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzado del agua residual, como el Al, Fe, sales, cal o polímeros orgánicos, aumentan la cantidad del lodo y por consiguiente el volumen del lodo (Metcalf y Eddy, 1996).

1.3.3 Características de los Lodos Residuales

Las características de los lodos varían dependiendo de su origen, su edad, del tipo de proceso del cual provienen y de la fuente original de los mismos, su composición está sujeta a cambios, que afectan a las propiedades de estos desechos (Kijo- Kleczkowska et al, 2012). Los procesos en aguas residuales directa o indirectamente afectan el sedimento y el cambio en sus propiedades (Malinowska et al, 2015).

1.3.3.1 Propiedades físicas de los lodos

- color y olor - indican el origen de los lodos residuales. Por ejemplo, las aguas negras del alcantarillado urbano tienen un color gris o amarillento. Es posible distinguir trozos de papel, heces o restos de comida. El lodo digerido, bien se caracteriza por un olor a alquitrán o de tierra forestal

ligeramente mohoso, es de color negro o gris oscuro y tiene un olor desagradable.

- estructura – las propiedades del lodo que afectan a la capacidad de retener el agua.
- contenido de agua – varía dependiendo del tratamiento de las aguas residuales.

En promedio, el contenido de agua de los lodos de origen orgánico asciende 85-99 %, mientras que los lodos de origen mineral (emergente en desarenadores) de 50 a 70 %.

1.3.3.2 Propiedades Químicas

La composición química de los lodos es muy variadas, dependiendo de la estación del año, la infraestructura de la ciudad y, de la cantidad y calidad de efluentes vertidos por la industria (Malinowska et al, 2015), así como también de aquellas descargas clandestinas de aguas residuales provenientes de las actividades laborales de la comunidad, del tipo de tratamiento de estos efluentes y del acondicionamiento y posterior tratamiento de los lodos resultantes del proceso.

Un lodo residual es caracterizado químicamente de acuerdo a:

- Parámetros inorgánicos (arena, arcilla, materia mineral en suspensión)
- Parámetros orgánicos (carbono, aceites, grasas)
- Metales pesados
- Nutrientes
- Contenido de materia orgánica

- Conductividad eléctrica (concentración de sales)
- valor del pH - para la mayoría de los lodos urbanos oscila entre 5-8 (Kijo-Kleczkowska et al, 2012).

1.3.3.3 Características Biológicas

Los lodos residuales, por su naturaleza, están constituidos de diversos tipos de Microorganismos, similar al suelo, los lodos son un sistema muy complejo de eucariotas (protozoos y hongos), bacterias, arqueas y virus, en el que las bacterias son dominantes (Klinge et al, 2001; Zhang et al, 2012), comprenden aproximadamente 95 % de la población microbiana total y juegan un papel clave en la purificación de la calidad del agua (Liu et al, 2007). Las comunidades de microorganismos son responsables de la mayor parte de la eliminación de carbono y de nutrientes de las aguas residuales, pueden mejorar la biodegradación de sustancias químicas tóxicas en el suelo, y por lo tanto, representan el componente principal de cada planta de tratamiento biológico. Por el contrario, la aparición masiva de ciertas especies bacterianas también puede ser perjudicial para el tratamiento de aguas residuales, influyendo negativamente en las propiedades de sedimentación de los lodos, contribuyendo a la formación de espuma y microorganismos necesarios para la eliminación de nutrientes (Wagner y Loy, 2002).

1.3.4 Contaminantes en lodos residuales

Las aguas residuales no solo contienen desechos fecales humanos, sino también contaminantes (metales pesados) provenientes de hogares, empresas, industrias, lixiviados de vertederos (Harrison et al, 1999). Los lodos residuales pueden

contener metales pesados que se presentan en formas inorgánicas o complejos orgánicos (Olowu et al, 2012), sustancias químicas y bioquímicas, detergentes, pesticidas, que pueden limitar su uso agrícola (Colomer et al, 2010) ya que representan una fuerte amenaza al ambiente.

Los elementos minerales comunes como, Al, Fe, Ca, Na, K están presentes en cantidades significativas, los elementos traza y metales pesados como Cd, Pb se bioacumulan (Olowu et al, 2012) y pueden unirse al suelo a través de procesos químicos e intercambio de iones, o pasar al agua subterránea por lixiviación (Camobreco et al, 1996), son no biodegradables y pueden permanecer indefinidamente en el ambiente del suelo (Wu et al, 2015). El objetivo del tratamiento es limpiar el agua, por lo que muchos contaminantes se concentran en los lodos (Harrison et al, 1999), y su destino final es la descargada al drenaje, o son desechados sin ningún tipo de tratamiento previo en presas, terrenos, y en el mejor de los casos han sido dispuestos en lagunas y rellenos sanitarios, o han sido incinerados (Campos et al, 2009).

1.3.4.1 Metales pesados

El término "metales pesados" se usa a menudo para cubrir una amplia gama de elementos, que constituyen una clase importante de contaminantes, haciendo referencia a los elementos químicos metálicos que tienen una alta densidad mayor a la del agua y pertenecen principalmente al grupo de transición de la tabla periódica, constituyen un grupo de 65 elementos que tienen una densidad mayor o igual a 4.5 g/cm³ y poseen diferentes características físicas, químicas y

biológicas (Prieto et al, 2009; Tahar y Keltoum, 2011; Marrero et al, 2012; Gawdzik y Gawdzik, 2012).

Los metales pesados y metaloides representan un serio peligro ambiental en todo el mundo. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales no son biodegradables y por lo general no son móviles, por lo que su tiempo de permanencia en el suelo puede ser de miles de años (Brunetti et al, 2009; Eshan et al, 2013).

Los metales pesados del suelo provienen de fuentes naturales, pero principalmente de las actividades humanas (procesos de la industria química, metalúrgica y manufactura). En particular, la actividad de explotación de minerales metálicos produce abundantes residuos tóxicos que contienen elevadas concentraciones de diversos metales pesados, los cuales son depositados en espacios abiertos. La extracción de Zn, por ejemplo, produce residuos que contienen Pb, Cd, Cu o As. Aún que muchos de ellos son esenciales para el crecimiento como el Na, K, Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn y Mo, se ha reportado que también tienen efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas, la absorción excesiva de metales por las plantas puede causar enfermedades agudas y crónicas, así cambios en la composición microbiana del suelo, lo que afecta negativamente las características del suelo. El Cd por ejemplo, es considerado como el contaminante más grave de la era moderna, concentraciones elevadas de Cd podrían ser cancerígenas, mutagénicas y teratogénicas para un gran número de especies animales, el Cd también se ha implicado como un disruptor endocrino

ya que tiene una influencia negativa en el sistema enzimático de las células (Cañizares, 2000; Ehsan et al, 2009; Rodríguez et al, 2010; Ali et al, 2012; Gawdzik y Gawdzik, 2012; Ehsan et al 2013).

En el suelo, los metales pesados están presentes como iones libres, compuestos metálicos solubles, compuestos insolubles como óxidos, carbonatos e hidróxidos. La movilidad y la biodisponibilidad de los metales están determinadas por factores ambientales, y la fijación de metales en los sedimentos ocurre por adsorción y reacciones con la materia orgánica, debido al tipo de suelos, la textura, capacidad de intercambio catiónico, pH y el potencial oxido-reductor (Brunetti et al, 2009; Prieto et al, 2009; Olivares et al, 2013).

Los efectos de los metales sobre el funcionamiento de los ecosistemas varían considerablemente y son de importancia económica y de salud pública. Entre los mecanismos moleculares que determinan la toxicidad de los metales pesados se encuentran:

1. El desplazamiento de iones metálicos esenciales de biomoléculas y bloqueo de sus grupos funcionales.
2. modificación de la conformación activa de biomoléculas, especialmente enzimas y polinucleótidos.
3. ruptura de la integridad de biomoléculas.
4. modificación de otros agentes biológicamente activos (Cañizares et al 2000).

Los metales pesados pueden participar en una serie de procesos, incorporándose al ciclo del agua, principalmente en la fase relacionada con el suelo y el agua

subterránea, puede acumularse en el suelo como resultado de reacciones químicas (potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio (catiónico y/o aniónico), presencia de carbonatos), pH, materia orgánica, textura, vía procesos de adsorción, solubilización, precipitación y cambios en su estado de oxidación, o bien pueden estar presentes en tejidos vegetales, debido a su asimilación por las plantas, muchos metales pesados (esenciales y no esenciales) son absorbidos por las plantas a un nivel muchas veces sin ningún motivo de preocupación, pero cuando se encuentran en suelos contaminados las concentraciones pueden llegar a niveles fitotóxicos. La naturaleza de la contaminación y el origen de los metales y formas de deposición y condiciones ambientales producen acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad en los suelos (Cajuste y Reggie 2001; Navarro et al, 2007; Prieto et al 2009).

Los metales pesados se encuentran de manera natural en la litósfera, hidrósfera y atmósfera, constituyen componentes muy importantes de la corteza y son considerados como recursos naturales no renovables. Su concentración por lo general no perjudica las diferentes formas de vida. Sin embargo, las actividades humanas han ocasionado un paulatino aumento de dichas concentraciones en los diferentes componentes del ambiente. Los principales metales pesados presentes en los lodos son el Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Hg, Cr. Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su bio-magnificación suscitan preocupaciones. Los metales están siempre presentes en concentraciones bajas en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones que preocupan a los especialistas se

encuentran en las aguas residuales industriales (Fytianos y Charantoni, 1998; Gawdzik y Gawdzik, 2012).

1.3.4.1.1 Plomo (Pb)

El Plomo (Pb) es un metal pesado que se acumula fácilmente en el suelo y es reconocido como un contaminante ambiental perjudicial. Se ubica en el grupo IVA (metales) en la tabla periódica. El Pb es un metal gris azulino que se presenta en forma natural y en pequeñas cantidades (0.002 %) en la corteza terrestre. Este elemento, es generalmente obtenido de la galena (PbS), la anglesita (PbSO₄) y la curositita (PbCO₃). En el ser humano, puede tener una amplia variedad de efectos biológicos según el nivel y la duración de la exposición. Se han observado efectos en el plano subcelular y efectos en el funcionamiento general del organismo que van desde la inhibición de las enzimas hasta cambios morfológicos y la muerte. El Pb es tóxico para el sistema nervioso y se asocia con la depresión de muchas funciones endócrinas, aunque no hay evidencia de efectos teratogénicos o carcinogénicos. Algunos de los efectos no específicos de toxicidad de Pb en las plantas incluyen el cese rápido de crecimiento de las raíces, la reducción y retraso en el crecimiento y clorosis, provoca perturbaciones en la nutrición mineral y el balance de agua y altera el estado hormonal de la planta. El uso más amplio del Pb elemental es para la fabricación de acumuladores; también es usado para la fabricación de tetra-etilo de plomo, pinturas, cerámicas, forros para cables, elementos de construcción, vidrios especiales, pigmentos, soldadura suave y municiones. El Pb, en el suelo, se encuentra principalmente en forma de Pb²⁺, también es conocido su estado de oxidación +4. Algunos de los compuestos

insolubles son $\text{Pb}(\text{OH})_2$, PbCO_3 , PbS , PbSO_4 . La velocidad de oxidación depende de factores como la humedad, la temperatura, el pH, el potencial redox, la cantidad de materia orgánica o la roturación de los suelos (Alloway et al, 1998; Guitart, 2005; Prieto et al, 2009; Ribeiro et al, 2012).

Las fuentes más frecuentes de contaminación por plomo son el tráfico, los lodos residuales, la combustión del carbón, la incineración de residuos.

1.3.4.1.2 Cadmio (Cd)

El cadmio (Cd) es un metal altamente tóxico y ha sido clasificado número 7 entre las 20 toxinas, principalmente debido a su negativa influencia en los sistemas enzimáticos de las células. Parece ser esencial para el metabolismo de algunos roedores, aunque en general no lo es para el resto de los seres vivos. La respuesta de las plantas a niveles elevados de cadmio en el suelo incluye reducida altura de la planta, biomasa, número de hojas, flores o número de frutos, o muerte en concentraciones relativamente bajas. Es un metal pesado de gran toxicidad y presenta una alta peligrosidad ya que es muy bioacumulable a nivel radicular. Presenta un estado de oxidación estable Cd^{2+} , siendo un elemento relativamente raro en la corteza terrestre. Aparece como octavita (CdCO_3), greenokita (CdS) y monteponita (CdO). El cadmio es uno de los elementos traza que tiene movilidad en los suelos y, a menudo se toma de manera significativa por plantas. La movilidad es media, salvo en condiciones reductoras que es muy baja. El aumento de la fuerza iónica de la solución del suelo reduce la adsorción de cadmio, siendo los cloruros uno de los aniones que más contribuyen a incrementar su movilización. Presenta una fuerte tendencia a ser adsorbido por el carbonato

cálcico, por lo que en suelos carbonatados su biodisponibilidad se ve muy mermada. El Cd es residual en el suelo durante miles de años y se transfiere fácilmente a la cadena alimenticia, la contaminación con Cd es una gran amenaza para la salud humana. Su biodisponibilidad en los suelos es alta comparado con otros metales, como resultado de su alta solubilidad (influenciada por el pH).

Las principales fuentes de contaminación de Cd son: la combustión de carbón, el uso de fertilizantes, lodos y aguas residuales, desechos de incineración, el desgaste de los neumáticos, la actividad en las fábricas de hierro y acero, baterías (Alloway et al, 1998; Al- Khedhairiy et al, 2001; Eshan et al, 2009; Tessa et al, 2013).

1.4 Norma Oficial Mexicana

En México no se tiene un control adecuado de las emisiones contaminantes al suelo, sin embargo, existe la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los residuos, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) en 2003 y reformada en 2007, y la NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004, reformada en 2007 y publicada en la DOF.

La norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 establece, que durante el tratamiento de aguas residuales se generan grandes volúmenes de lodos, que en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen, considera que los lodos 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 (Cuadro 1).

Cuadro 1 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos y lodos residuales (NOM-004-SEMARNAT-2002).

CONTAMINANTE (En forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Fuente: "Norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002".

1.5 Lodos residuales en la agricultura

La necesidad de preservar los recursos naturales a optimizado el uso del reciclaje y la valorización de desechos orgánicos es una alternativa interesante (Ramdani et al, 2015). La aplicación de lodos de aguas residuales en la agricultura como enmienda orgánica es una práctica que ha aumentado en los últimos años (Bravo et al, 2015). Existen antecedentes de que los lodos residuales tienen valor fertilizante y pueden actuar también en el mejoramiento de las propiedades físicas de los suelos (Paz et al, 2007), el contenido en nutrientes de los lodos es destacable, ya que pueden contener materia biodegradable, nitrógeno, fósforo y otros micronutrientes como B, Mn, Cu, Mb y Zn que lo convierten en una interesante enmienda agrícola. Además, de mejorar la estructura de los suelos

(Colomer et al, 2010). Su uso como mejoradores de suelos con o sin tratamiento previo, depende de las condiciones particulares de cada caso (Ortiz et al, 1995).

Los lodos tienen alto potencial de aprovechamiento agrícola debido a que mejoran los niveles de materia orgánica, aportan al suelo los macro y micronutrientes que contienen y que son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como estructura, permeabilidad y poder de amortiguamiento (Ortiz et al, 1995; Torres et al, 2008) y esto puede contribuir a la rehabilitación de las reservas nutritivas de los suelos explotados (Ramdani et al, 2015).

Los suelos agrícolas y forestales sufren un desequilibrio en el mantenimiento de niveles estables de materia orgánica (M.O) debido a diversas razones (excesivo laboreo, producción intensiva, uso de fitosanitarios, deforestaciones irracionales, incendios forestales, pastoreo inadecuado, entre otras), ocasionando una disminución de la fertilidad natural del horizonte superficial, más acentuada en regiones con poca producción de biomasa. Como consecuencia de ello se presentan problemas ambientales tales como mayor erosión, poca infiltración y menor capacidad de almacenamiento de agua, dificultad para el desarrollo radical y deficiente establecimiento de poblaciones microbianas benéficas. La valoración del uso de lodos como abono orgánico en suelos de México ha sido poco explorada y documentada (Salcedo et al, 2007), Se conocen trabajos de la aplicación de lodos municipales, como factor de crecimiento de plantas de ornato y follaje de maíz (Campos et al, 2009).

La legislación actual en la Unión Europea recomienda que los lodos de depuradora de aguas residuales se utilicen como fertilizante. Alemania, Reino Unido, Francia y España son los países que más aprovechan los lodos como enmienda orgánica en agricultura. Irlanda, Finlandia y Reino Unido son los que tienen un mayor porcentaje de aprovechamiento de los lodos en agricultura (Colomer et al, 2010).

Otros estudios han mostrado efectos positivos de la adición de biosólidos en zonas montañosas de Nuevo México y en Colorado. En Estados Unidos Barbarick et al, 2004, experimentaron durante seis años con aplicaciones de biosólidos en suelos de praderas y de arbustos, concluyendo que el suelo tratado mostró un aumento de la respiración (CO_2), de la mineralización de N, de las asociaciones micorrízicas, y de la biomasa activa, al compararlos con los suelos no tratados y concluyeron que los biosólidos pueden contribuir a mejorar la calidad del suelo relacionada a la actividad microbiana (Paz et al, 2007).

Cuadro 2 Ensayos de lodos residuales aplicados en cultivos.

Tipo de Lodo	Cultivo	Contaminante	Resultados	cita
Primario	Sorgo	Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Mn, Fe	La aplicación de lodos no presenta riesgos de toxicidad para los cultivos, su concentración de metales pesados está por debajo de los límites establecidos en la NOM-004, aumenta la producción del forraje.	Hernández et al, 2005
Fresco y compostado	Tomate, espinaca, lenteja, maíz, trigo, rey-grass	Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, Pb	Con lodos compostados incrementa el rendimiento de rey-grass en materia seca y estimula el sistema radicular	Miralles et al, 2002
Crudo	Lechuga	As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn	Aumento de la concentración de N, K, P, Ca, Na, Zn, Cu, Mn, Fe y vitamina C. aumento la capacidad antioxidante en las hojas de lechuga.	Narváez et al, 2014
Primarios	<i>Nothofagus pumilio</i>		Mejora las características físico-químicas y biológicas del suelo. La cobertura vegetal varió de 14 a 65%.	Varela et al. 2011

Cuadro 2 Ensayos de lodos residuales aplicados en cultivos.

Tipo de Lodo	Cultivo	Contaminante	Resultados	cita
Digeridos	Maíz		Los lodos proporcionan una mayor disponibilidad de nutrientes.	Warman et al. 2004
Deshidratado	Maíz Pinus douglasiana	As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Supervivencia del 67% en semillas de pinus, incremento en la altura y el diámetro. Incremento del 18% en el rendimiento del maíz	Salcedo et al. 2007
Primarios	Pasto ballico	Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd	Aumento en el rendimiento del 53% con respecto al testigo	Robledo et al. 2010
Primarios	Cebada, colza, repollo chino	Cu, Zn	Producen efecto positivo sobre la germinación de colza y aumenta el rendimiento de cebada y col china	Wei and liu, 2004

1.6 Revegetación con lodos residuales

El uso de biosólidos para restaurar suelos degradados es un tema importante de investigación (Navas et al, 1999). En algunas zonas alteradas las propiedades físicas y químicas no son adecuadas para el establecimiento de la vegetación, ya que presentan suelos poco fértiles (escasez de nutrientes y de materia orgánica), de texturas poco equilibradas y/o pedregosos (Tormo 2009). La vegetación es el componente que más rápidamente evidencia los impactos y el que mejor permite acciones de recuperación. La recuperación de la vegetación a través de la sucesión natural puede ser considerablemente larga, especialmente cuando se afecta la estructura del suelo (Dalmaso 2010) y por este motivo el reciclaje de lodos es una atractiva alternativa ambiental para la conservación (Tormo 2009).

La revegetación en un sitio específico intenta cambiar la composición de la vegetación actual y orientarla hacia estados más deseables (Dalmaso 2010). Los criterios de restauración ecológica en las zonas degradadas por actividades mineras implican la utilización de sus propios residuos es necesaria la incorporación de enmiendas orgánicas para obtener un sustrato que presente propiedades físicas, químicas y físico-químicas adecuadas para el desarrollo vegetal (Sánchez et al, 2010)

La revegetación se propone revertir las condiciones de las áreas degradadas con la plantación de especies vegetales nativas, que lleven a restituir la estructura y la cobertura vegetal. (Dalmaso 2010). Ippolito et al, (2010) reporta que la aplicación de lodos residuales fue favorable para el crecimiento de

hierbas perennes, aumentando la cobertura vegetal. Sullivan et al, (2006) reporta aumentos en el crecimiento de pasto perenne nativo asociado con el aumento de las tasas de aplicación de biosólidos.

1.7 Conclusiones de la literatura citada

El excesivo uso y desperdicio del agua por la población ha traído como consecuencia, un incremento en sus descargas, las cuales principalmente provienen del uso doméstico e industrial. Su tratamiento genera grandes volúmenes de lodos residuales los cuales principalmente son semisólidos, que debido a su origen contienen nutrientes, contaminantes y microorganismos nocivos. Su disposición final ha sido un amplio tema de discusión, debido a que se cree que podrían contaminar el ambiente.

Algunos autores, proponen el uso de lodos residuales como mejoradores de suelos agrícolas o degradados, por esta razón, se han dedicado al estudio de sus propiedades físico-químicas, beneficios, procesamiento y daños que su aplicación podría causar al medio ambiente. El uso de lodos se está volviendo una alternativa de fertilización en algunos países europeos, debido a que sus resultados han sido favorables en algunos cultivos, en cuanto al aumento en el rendimiento de los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la mina de San Miguel Tlaixpan, localizada entre los paralelos $19^{\circ} 30'$ latitud norte y entre los meridianos $98^{\circ} 50'$ longitud oeste, y una altitud de 2400 m, en el municipio de Texcoco, estado de México (Figura 1). Cuenta con un clima C, templado semiseco, según la clasificación de Köppen y una temperatura media de 12 a 18 °C. La precipitación es de 686 mm anuales.

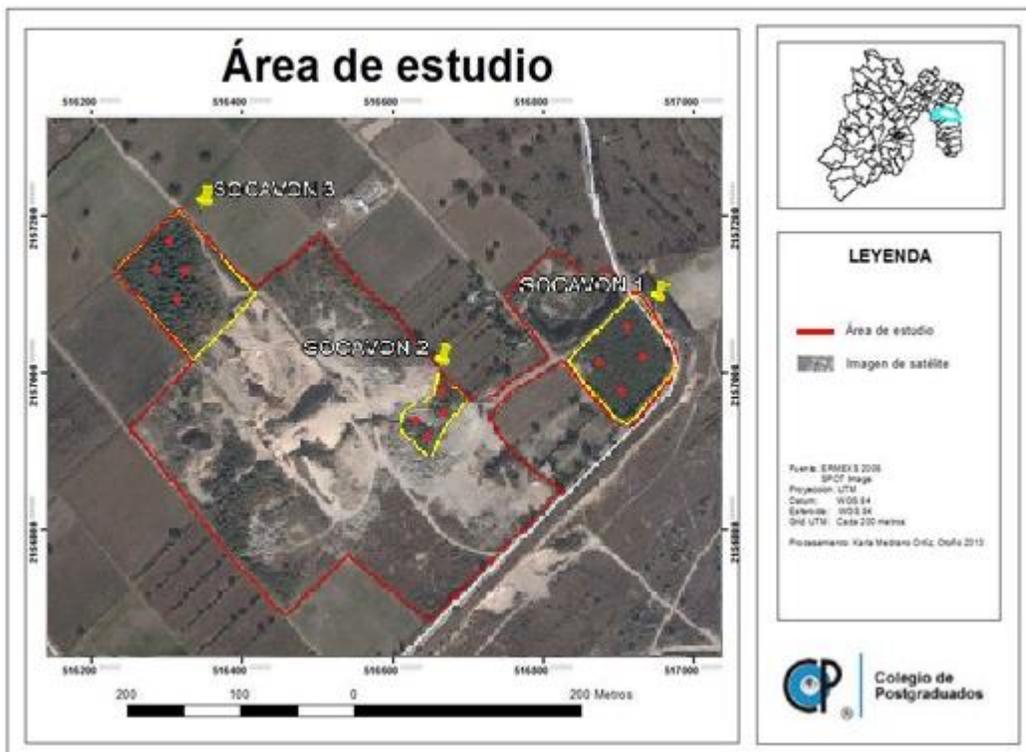


Figura 1. Vista aérea de la mina de San miguel Tlaixpan, Texcoco.

Etapa 1. Análisis físico-químico de los lodos residuales

1.1 Muestreo

El muestreo de los lodos se realizó representando cada época estacional (época de secas y lluvias). El primer muestreo se efectuó en marzo 2014, para la época de secas y el segundo muestreo se llevó a cabo en septiembre 2014 considerando la época de lluvias. Las muestras fueron tomadas de tres socavones diferentes. El muestreo realizado fue al azar superficial de 0 a 20 cm y otro de 20 a 70 cm de profundidad. De cada socavón se colectaron cuatro muestras de lodo de 2 kg de peso aproximadamente, estas fueron colocadas en bolsas de plástico y trasladadas al laboratorio para la determinación de los parámetros fisicoquímicos señalados en la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

1. 2 Acondicionamiento de muestras

1.2.1 Secado

Las muestras se extendieron sobre charolas de plástico y se dejaron a temperatura ambiente. Para los análisis físico-químicos que requerían que las muestras estuvieran secas.

1.2.2 Tamizado

La disgregación de las muestras se llevó a cabo con un mortero de porcelana con la finalidad de obtener mayor cantidad de suelo fino. Una vez disgregadas las muestras se tamizaron en una malla de 2 mm de diámetro.

1.3 Análisis químicos

Las características Fisicoquímicas se realizaron por triplicado.

1.3.1 Determinación de pH

Para medir el pH del suelo se preparó una mezcla de suelo-agua con una relación peso-volumen (1:2) la cual se agitó durante 5 minutos, se midió el pH directamente en la suspensión obtenida con un potenciómetro.

1.3.2 Materia orgánica

El procedimiento para la determinación de materia orgánica del suelo se realizó a través del método de Walkley y Black, contenido en la norma Oficial Mexicana NOM- 021-RECNAT-2000.

1.3.4 Capacidad de Intercambio Catiónico

La determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se realizó a través del método AS-12 de la NOM-021-SEMARNAT-2000 con acetato de amonio 1 N, pH 7.0.

1.3.5 Nitrógeno total

La determinación del Nitrógeno Total fue realizada por digestión Kjeldahl, se pesaron 0.5 g de muestra y vertieron en tubos Kjeldahl, a estos se les adicionó 1 g de sulfato de sodio (Na_2SO_4), 5 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y una pizca de óxido de Mercurio (HgO_2), se puso a digerir a una temperatura de 150-250 °C por dos horas. Posteriormente, los tubos Kjeldahl se lavaron con 100 mL de agua destilada y se les adicionó 80 mL de hidróxido de sodio (NaOH) al 32 %, para su destilación, el producto destilado se recolectó en un

matraz que contenía 20 mL de ácido bórico y se tituló con ácido clorhídrico (HCl) 0.005 N.

1.3.6 Determinación de nitratos

Se pesaron 5 g de suelo, se le agregó 50 mL de Cloruro de potasio (KCl) y se agitaron durante una hora, posteriormente, las muestras fueron centrifugadas obteniendo el sobrenadante, del cual se tomó una alícuota de 20 mL, al cual se tituló con H_2SO_4 a 0.005 N.

1.3.7 Metales totales

Se utilizaron muestras de 0.5 g de suelo y se sometieron a una digestión con HNO_3 concentrado, se agitaron a baño maría durante 4 hrs a una temperatura de 150 °C. El sobrenadante se filtró y se aforó a 25 mL con HNO_3 . Posteriormente se leyó Cd y Pb en el espectrofotómetro de absorción atómica.

1.3.8 Metales biodisponibles

Se pesaron 10 g de suelo y se les adicionó 20 mL de DTPA a un pH de 7.3, se agitaron durante 4 hrs, posteriormente se centrifugaron y se recuperó el sobrenadante, se aforo a 25 mL. Se leyó Cd y Pb en el espectrofotómetro de absorción atómica.

1.4 Análisis físicos

1.4.1 Determinación de textura

El método para la determinación de la proporción de las partículas minerales (arena, limo y arcilla) en suelos muestreados se realizó por el procedimiento de Boyoucos.

La textura del suelo en cada sitio muestreado fue determinada por el método del triángulo de textura de suelo.

2.4.2 Densidad aparente

Para esta determinación se utilizó el método del terrón parafinado. La densidad aparente de una muestra de suelo es calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso. En el caso de la masa, ésta se conoce pesando la muestra (terrón) y en el caso del volumen, éste es determinado de manera indirecta recubriendo el terrón con una capa de parafina y pesándolo sumergido en un líquido (alcohol).

1.5 Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza, como a la prueba de separación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) en el programa SAS (1995), para conocer si existen diferencias significativas en cuanto a la concentración de metales pesados en los lodos.

Etapa 2. Análisis botánico de la zona de estudio

San Miguel Tlaixpan es una delegación del municipio de Texcoco, pertenece a la región natural de somontano (pie de monte) del valle de México (Gaytán et al, 2001), con la finalidad de conocer la vegetación asociada a los lodos residuales, se realizaron recorridos en el área de la mina y se determinó el área de muestreo basado en la metodología descrita por Mostacedo y Fredericksen (2000).

2.1 Muestreo de vegetación

Para la evaluación de la riqueza de especies herbáceas y arbustivas se determinó que el método a utilizar para sería el del cuadrante. Se escogieron tres puntos de forma sistemática en cada uno de los socavones en donde fueron colectados los lodos, para tener un punto de referencia de la vegetación del lugar, en un área aledaña a los socavones que no tuviera influencia de lodos se realizó el muestreo de vegetación para posteriormente realizar la comparación de especies presentes en cada sitio. Se utilizó un cuadrado de 25 m² (5m x 5m), haciendo un total de 12 cuadrantes (Figura 2 y 3).



Figura 2. Sitio de muestreo. Composición florística área aledaña al socavón 1.



Figura 3. Sitio de muestreo. Composición florística socavón 3.

En cada uno de ellos se registraron las especies observadas y se cuantifico a cada uno de individuos determinando el número de especies que aparecían.



Figura 4. Especie colectada en el área aledaña al socavón 1.



Figura 5. Especie colectada en el socavón 2.

El muestreo se realizó en septiembre a mediados de la época de lluvias. Se realizaron colectas botánicas obteniendo un total de 28 números con tres ejemplares por especie, las cuales fueron fotografiadas en vivo y herborizadas para su determinación.

2.2 Descripción de las especies colectadas

Posteriormente, se llevó acabo la identificación del material colectado, mediante la utilización de claves taxonómicas, y se cotejó con los especímenes depositados en la colección científica del Herbario “Jorge Espinosa Salas” de la Preparatoria Agrícola de la Universidad de Chapingo, en el cual se depositaron los ejemplares con los números de registro 25259 – 25285.



Figura 6. Identificación de ejemplares por la M.C Ernestina Cedillo.



Figura 7. Fruto de un ejemplar de la familia Malvaceae.

2.3 Estimación de la diversidad alfa y beta

Se realizó un listado florístico y se calculó la riqueza florística en las áreas de estudio, la riqueza es entendida como el número de especies, es la medida de biodiversidad empleada con mayor frecuencia (López y Williams, 2006).

Además, se obtuvieron las estimaciones de diversidad alfa (intra-hábitat) usando el índice de Shannon-Wiener:

$$H' = -\sum p_i \ln p_i,$$

Donde p_i = es la proporción del total de la muestra encontrada para la especie i y \ln = logaritmo natural.

Índice de equidad de Pielou:

$$J = H' / \log^2 S$$

Siendo, S = número de especies.

Para estimar la diversidad beta y conocer la semejanza entre los sitios se emplearon índices de similitud / disimilitud:

Índice de similitud de Jaccard:

$$I_j = \frac{c}{a+b-c}$$

El coeficiente de similitud de Sorensen:

$$I_s = \frac{2c}{a+b}$$

Donde a = número de especies presentes en el sitio A, b = número de especies presentes en el sitio B y c = número de especies presentes en ambos sitios A y B.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del suelo de la mina

Se realizó un análisis físico- químico al suelo de la mina, para determinar si la presencia de los lodos que fueron vertidos en los socavones de la mina de San Miguel, Tlaxpan mostraba algún beneficio o perjuicio para el mismo. El pH es un factor importante para la disponibilidad de los metales pesados, ya que muchos sitios de adsorción en los suelos son dependientes del pH. Los tratamientos con lodos residuales aumentan el pH del suelo a valores neutros, lo cual favorece la retención de algunos metales y la disponibilidad de los nutrientes (Guacaneme y Barrera, 2007). En pH ácidos la mayoría de los metales están más disponibles (Parra y Espinoza, 2008; Reyes, 2010). En el análisis realizado al suelo, se pudo observar que el pH es medianamente alcalino en ambas profundidades, según la NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 3).

Por otra parte, la materia orgánica también está relacionada con la movilidad de los metales pesados, un elevado contenido de esta puede intervenir en su inmovilización (Parra y Espinoza, 2008), en los resultados obtenidos en el suelo de la mina se observa que el porcentaje de M.O es muy bajo (Cuadro 3), según la NOM-021. La materia orgánica del suelo guarda una relación directa con la presencia de metales pesados; afecta sustancialmente el destino de los metales en el suelo, a su vez, la presencia de éstos cambia significativamente la naturaleza y dinámica de la materia orgánica y con el tiempo puede afectar negativamente las condiciones biológicas de los organismos del suelo y de las plantas (Reyes y Barreto, 2011).

La CIC es una función del contenido de arcilla y materia orgánica del suelo, que controla también la disponibilidad de los metales, La capacidad de enlace de los metales está directamente relacionada con la CIC, por lo general, a mayor CIC, mayor es la cantidad de ion adsorbido (Reyes, 2010), en los resultados obtenidos de la CIC en el suelo presenta un nivel medio.

Cuadro 3 Características químicas del suelo de la mina de Texcoco.

Sitio	pH	MO %	CIC Cmol / Kg
suelo 0-20	7.72	0.21	22.28
suelo 20-70	7.67	0.13	18.2

Los valores obtenidos para el nitrógeno total, muestran que el porcentaje de nitrógeno es muy bajo, en ambas profundidades su valor es de 0.03 %, lo que indica una deficiencia de este en el suelo de la mina. Mientras que los valores obtenidos para el N-NO₃ son bajos según la NOM-021. Groffman *et al*, (2001) señalan que un sitio con impacto o perturbado tiene valores bajos de nitrógeno en comparación con un sitio intacto o no perturbado, lo cual podría ser el caso de la mina que aún se encuentra en uso.

La concentración de metales pesados en el suelo estudiado se considera baja, sin embargo, la concentración de Pb total y biodisponible es más alta en la profundidad de 20-70 cm. Para el caso del Cd total se encuentra en un rango de 2.25 a 2.37 mg Kg⁻¹, mientras que el Cd total va de 0.28 a 0.34 mg Kg⁻¹ en las profundidades de 0-20 y 20-70 cm.

Cuadro 4 Concentración de Cd y Pb en suelos de la mina de San Miguel, Tlaixpan

Sitio	Pb total	Cd total	Pb biodisponible	Cd biodisponible
	-----mg Kg ⁻¹ -----			
suelo 0-20	2.59	0.28	2.25	0.26
suelo 20-70	2.74	0.34	2.37	0.22

La textura del suelo es un factor importante para el comportamiento de los metales pesados como Pb, Cd, Ni, Cu y Cr ya que su movilidad depende del contenido y tipo de arcilla (Reyes, 2010) este suelo se clasificó de acuerdo al tamaño de partículas arcilla, limo y arena, con las cantidades relativas de cada tipo de partícula mineral se determinó la textura del suelo y se determinó que es un suelo que va de franco-arenoso en la profundidad de 0-20 cm, a un suelo franco en la profundidad de 20-70 cm, lo cual concuerda con lo reportado por Gaytán et al, (2001), quien hace mención que los suelos de San Miguel Tlaixpan son suelos delgados y de textura fina

Etapas 1. Análisis físico-químico de lodos residuales depositados en socavones.

pH

Los resultados obtenidos con respecto de los valores de pH (Cuadro 5), en temporada de secas para el socavón 1 y 2 la NOM-021 clasifica esos valores en rangos neutros, el socavón 3, tiene un pH medianamente alcalino en temporada de secas y lluvias respectivamente a una profundidad de 0-20 cm. En lo que corresponde a la profundidad de 20-70 cm, el pH en el socavón 1 y 2 presentan un pH con un rango neutro en temporada de secas y lluvias, en tanto que en el socavón 3 tiene un pH medianamente alcalino. Estos resultados nos indican que

en ningunos de los sitios hay un cambio en las temporalidades y profundidades, indicando que los valores se mantienen, Caciado et al, (2014) menciona valores para pH a diferentes profundidades que van de 6.1 a 6.7 a los doce años de ser aplicados, mientras que Hernández et al, (2005) reporta un valor de 7.1 en lodos residuales. Por lo que concierne al suelo de la mina, estos resultados no son muy diferentes, ya que el pH va de neutro a medianamente alcalino. Los valores usualmente encontrados en lodos residuales municipales, mayoritariamente, son cercanos a la neutralidad (Acosta et al, 2003). La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto el As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino (Kabata-Pendias, 2000). El pH es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos.

Materia orgánica

Los metales potencialmente biodisponibles pueden encontrarse adsorbidos a la materia orgánica por intercambio catiónico o formando complejos solubles e insolubles, actúa como agente acomplejante de algunos elementos, esto proporciona una mayor o menor movilidad de los metales en los suelos (Parra y Espinosa, 2008), la materia orgánica reportada en este trabajo presenta su valor máximo en el socavón 1 en temporada de lluvias, así mismo también en este socavón se refleja el valor mínimo en temporada de secas. Narváez et al, (2014) hace referencia a lodos textiles con un contenido de M.O de 4.69 %, los cuales según la nom-021 los clasifica como niveles buenos de fertilidad. Los valores que presenta la profundidad 20-70cm, no son diferentes, ya que el valor mínimo se

encuentra en el socavón 1 y el más alto en el socavón 2 en temporada de secas, para la temporada de lluvias los valores reportados se encuentran en el 3.5 % (Cuadro 3). Hernández et al, (2005) reporta un valor de 1.14 %, la NOM-021 hace mención de que este es un valor bajo, sin embargo, los valores obtenidos en los lodos muestreados se clasifican como buenos, Basta et al, (2005) reporta que el alto contenido de materia orgánica presente en los lodos industriales puede inhibir la biodisponibilidad de algunos metales (Narváez et al, 2014), la cantidad de materia orgánica reportada en este trabajo, puede ser la suficiente para que los metales pesados que se encuentra en los lodos residuales, no estén disponibles en la solución del suelo. Además, la materia orgánica presente en los lodos residuales es mayor a la que se encuentra presente en el suelo de la mina, lo que podría beneficiar a la fertilidad de estos suelos, debido a que contribuye a recuperar o mejorar la estructura, su capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes del suelo.

Capacidad de intercambio catiónico

La aplicación de lodos residuales como fertilizante orgánico a suelos agrícolas es una práctica habitual en países desarrollados, su aplicación al suelo favorece algunas de sus propiedades físicas y químicas, principalmente con el aporte de MO que proviene de estos materiales consiguiendo con esto mejorar la estructura y porosidad del suelo, su permeabilidad y retención hídrica; así como, incremento de la capacidad de intercambio catiónico (Medina et al, 2011). En lo que respecta a los resultados obtenidos en el análisis de la CIC, se puede observar que las muestras de los socavones 1 y 2 tienen alta capacidad de intercambio catiónico en

ambas temporadas y profundidades, exceptuando al socavón 3 en la profundidad 0-20 en temporada de lluvias, de igual forma en la profundidad de 20-70, en ambas temporadas, esto quiere decir que la capacidad de intercambio se encuentra de un rango bajo a medio (NOM-021). Acosta et al, (2003) reporta valores de 24.81 Cmol/kg, que indican una buena cantidad de ion adsorbido.

Cuadro 5 Características químicas de los lodos residuales depositados en socavones

Profundidad	socavón	pH		M.O %		CIC Cmol/kg	
		secas	lluvias	secas	lluvias	secas	Lluvias
0-20 cm	1	6.99	7.1	2.12	3.65	24.33	22.17
	2	6.82	7.06	3.4	3.57	25.87	23.27
	3	7.47	7.77	2.98	3.62	21.7	12.53
	*	7.09	7.31	2.83	3.61	23.97	19.32
20-70 cm	1	7.15	6.67	2.64	3.78	25	27.93
	2	6.89	7.04	3.37	3.38	27.7	28.17
	3	7.45	7.78	2.7	3.59	16.93	18.87
	*	7.16	7.16	2.90	3.58	23.21	24.99

*Promedio de los resultados obtenidos entre los socavones.

Nitrógeno total

El nitrógeno es un constituyente esencial en la materia orgánica, La liberación por transformación de la materia orgánica a nitrógeno (N₂), azufre (S), magnesio (Mg), y otros oligoelementos es uno de los beneficios de la valorización de los lodos (Ramdani et al, 2012). Gardner et al, (2012) menciona que debido a la aplicación de lodos residuales muchos nutrientes aumentaron significativamente, entre ellos el nitrógeno, la concentración promedio para el nitrógeno en la profundidad de 0-20 cm el socavón 1, en temporada de lluvias y secas fue 0.3 %, sin embargo para el socavón 2 varió de 0.29 a 0.35 respectivamente, en el socavón 3 los resultados

obtenidos fueron muy similares aunque disminuyó un poco de 0.19 a 0.17. Por otra parte, en la profundidad de 20-70, en el socavón 1 se obtuvo el mayor porcentaje con un 0.40 % en temporada de secas y en el socavón 3, los datos muestran valores de 0.19 y 0.17 en temporadas de secas y lluvias respectivamente (Cuadro 6). A pesar que se tienen valores bajos de N en los lodos muestreados y que, Solís et al, (2012) menciona que los lodos residuales contienen la mayor cantidad de N total (3.19 %), los estudios realizados por Álvarez et al (2002), muestran valores de 0.8 % de nitrógeno total en lodos primarios, Algo similar en los resultados de Ramdani et al, (2015), quien publica resultados de 0.5 % de nitrógeno total, en el caso de Kijo- Kleczkowska, (2012) reporta diferentes valores desde 0.5 % en lodos digeridos, hasta 7 % en lodos primarios. Siuris (2012), reporta que un promedio del 24% del nitrógeno total está en forma de amonio. Por otro lado, podemos decir que la cantidad de nitrógeno total en los lodos es hasta 10 veces mayor a la que existe en el suelo de la mina (0.03 %).

Nitratos

El N debe estar principalmente en forma de nitratos (NO_3^-), de no ser así, denotaría un material muy poco estabilizado (Acosta et al, 2003). La cantidad de nitratos obtenido fue más evidente en el socavón 2, teniendo un valor que va de 16.80 ppm en temporada de secas a 27.88 ppm en lluvias a la profundidad de 0-20, es evidente que sucede lo mismo en la profundidad de 20-70 cm, sin embargo el valor la concentración de nitratos disminuye en época de lluvias de 26.48 a 15.53 mg Kg^{-1} (Cuadro 6), esto podría deberse a que se lixivian, por el contrario

de lo que sucede en el suelo de la mina que reporta cantidades bajas de nitratos, Pogrzeba et al, (2015) reporta un 0.11 % de nitratos en lodos, no podemos olvidar que los nitratos son la forma más común en como las plantas absorben el nitrógeno.

Cuadro 6 Contenido de nitrógeno total y nitrógeno de nitratos en lodos residuales

Profundidad	socavón	N		N-NO ₃	
		secas	Lluvias	secas	Lluvias
0-20 cm	1	0.33	0.34	3.97	4.67
	2	0.29	0.35	16.8	27.88
	3	0.19	0.17	8.28	5.37
	*	0.27	0.29	9.68	12.64
20-70 cm	1	0.4	0.32	4.32	10.63
	2	0.3	0.33	26.48	15.53
	3	0.19	0.17	3.15	9.68
	*	0.30	0.27	11.32	11.95

*Promedio de los resultados obtenidos entre los socavones.

Textura (Clase textural)

Dentro de las características físicas el lodo (Cuadro 8), en el socavón 1 y 2 de 0-20 cm y en el socavón 3 de 20-70 cm presentó una textura franco-arenosa-arcillosa, en tanto el socavón 2 y 3 presentan una textura arcillosa en temporada de secas, en temporada de lluvias la textura va de franco- arcillosa a arcillosa. La densidad aparente va de 1.44 a 1.79 g/cm en temporada de secas y en temporada de lluvias va de 1.42 a 1.64 g/cm. Lo que se puede corroborar con lo que reporta Narváez et al, (2014) quien hace mención a lodos con una textura franco- arcillosa, y una densidad aparente de 1.05 g/cm, Hernández et al, (2005) reporta su trabajo con lodos de textura migajón-arenosa, con una Da de 0.996 g/cm, con esto podemos darnos cuenta que nuestros lodos están dentro de la clasificación de algunos autores.

Cuadro 6 Densidad aparente (Da) y textura de lodos residuales

Profundidad	socavón	Da		arenas		arcillas		limos		Clase de textura	
		g/cm		%		%		%		secas	lluvias
		secas	Lluvias	secas	Lluvias	secas	lluvias	Secas	lluvias		
0-20 cm	1	1.61	1.52	18.65	19.15	27.3	26.8	54.05	54.05	franco-arenoso-arcilloso	arcilloso
	2	1.59	1.42	14.57	13.91	26.76	27.43	58.67	58.67	franco-arenoso-arcilloso	arcilloso
	3	1.46	1.43	21.88	22.07	21.74	21.74	55.88	56.19	franco-limoso	franco- arcilloso
	*	1.55	1.46	18.37	18.38	25.27	25.32	56.20	56.30		
20-70 cm	1	1.79	1.64	16.76	19.51	37.74	38.99	45.5	41.5	franco-arenoso-arcilloso	arcillosos-limoso
	2	1.45	1.47	29.09	18.76	28.91	34.57	42	46.67	arcilloso	arcilloso-limoso
	3	1.44	1.56	44.07	40.01	21.24	21.74	34.69	38.25	arcilloso	franco- arcilloso
	*	1.56	1.56	29.97	26.09	29.30	31.77	40.73	42.14		

*Promedio de los resultados obtenidos entre los socavones.

Metales pesados

Cadmio

Ramdani et al, (2015) hace énfasis en que el conocimiento del contenido total de metales pesados es insuficiente para estimar el riesgo de la movilidad y la biodisponibilidad de metales para las plantas. En la figura 8, se muestran las medias de las concentraciones de metales pesados obtenidos en cada socavón, se puede observar que las concentraciones de Cd total, no supera los límites emitidos por la norma, si no por el contrario, están muy por debajo de ella. La concentración de Cd más alta se observa en el socavón 1 en la temporada de lluvias, sin embargo, este valor no es estadísticamente diferente a socavones 2 y 3 en época de secas y al 3 en época de lluvias, sin embargo para el socavón 1 en época de secas y 2 en época de lluvias a la profundidad de 20-70 si hay diferencia significativa. Los resultados de los niveles de Cd total oscilan de 0.20 a 0.64 en temporadas de secas, en temporada de lluvias los valores van de 0.34 a 0.72, mientras que el límite permisible da un rango de 39- 85 mg/Kg, García et al (2008) cita a Romero (2002) quien reporta que el cadmio, conjuntamente con el mercurio y el plomo son, en general, tóxicos y reciben gran atención por ser elementos que se magnifican biológicamente en el medio natural a través de la cadena alimenticia. Hernández et al, (2005) concluye que la concentración de los lodos residuales está por debajo de los límites establecidos y que su aplicación no presenta riesgos de toxicidad para los cultivos.

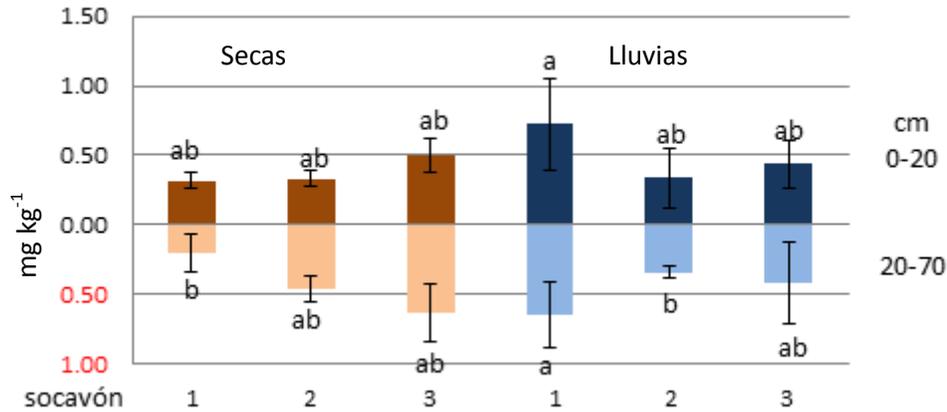


Figura 8. Concentración de Cadmio total en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes.

Para la fracción intercambiable se han extraído los metales unidos a especies químicas inestables bajo condiciones ligeramente ácidas (ácido nítrico), el Cd biodisponible para las plantas oscilan entre concentraciones de 0.08 a 0.21 mg Kg⁻¹ en temporada de secas y de 0.08 a 0.21 mg Kg⁻¹ en temporada de lluvias, el Cd es un elemento que se caracteriza tener una gran movilidad y asimilabilidad por parte de las plantas (García et al, 2008) por eso la gran importancia de su estudio, Gonzáles et al (2009), reporta que no se encontró Cd en la fracción intercambiable de los lodos residuales. Para este trabajo, la concentración de Cd que se encuentra disponible en los lodos, es muy similar al que se encuentra disponible en el suelo de la mina, la Figura 9 muestra que la concentración más alta se encuentra en el socavón 1 en época de lluvias, por otra parte, en el socavón dos en época de secas a la profundidad de 20-70, la movilidad de Cd aumenta, pero no muestra una diferencia significativa con respecto a los otros sitios.

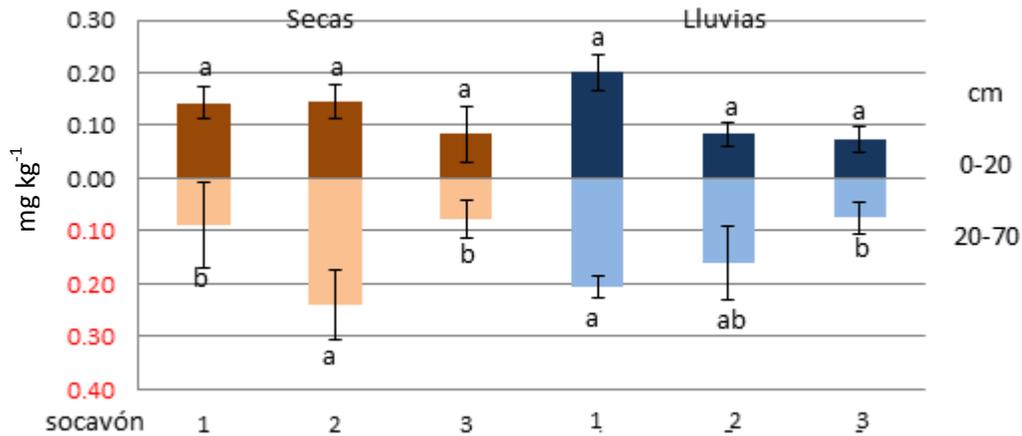


Figura 9. Concentración de Cadmio biodisponible en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes.

Plomo

Por otro lado las concentraciones de Pb total (Figura 10), en la profundidad de 0-20 cm se encuentran en un rango de 8.12 a 14.84 mg Kg- en época de secas, en lo que corresponde a la época de lluvias la concentración aumenta en el socavón 1 y 2, en la profundidad de 20-70 cm la concentración es de 4.35 a 17.61 mg Kg-1, de igual forma la concentración aumenta en los socavones 1 y 2 en la temporada de lluvias y disminuye en el socavón 3. En época de secas la movilidad de Pb se mantiene, la concentración de Pb total aumenta en la época de lluvias en los socavones 1 y 2, y son estadísticamente diferentes al socavón 3 y a los tres socavones en época de secas.

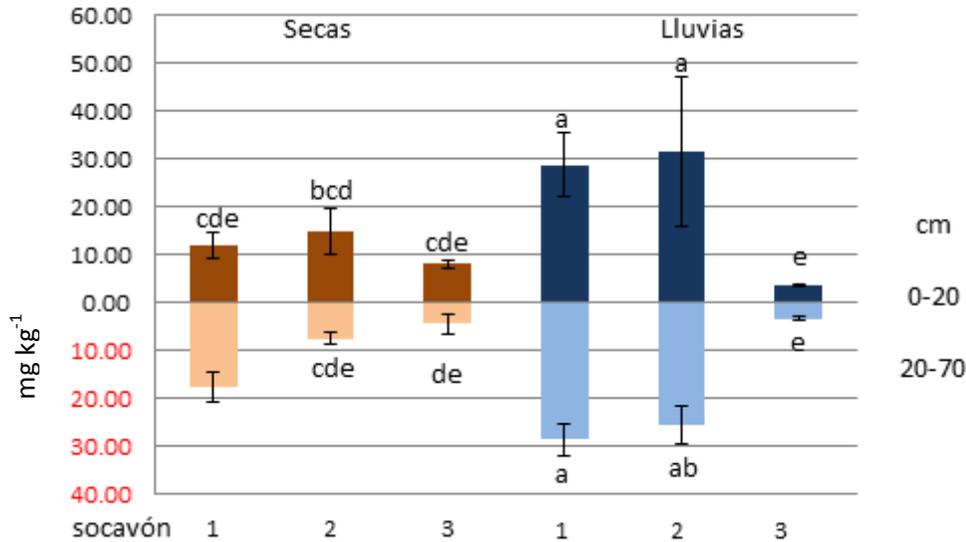


Figura 10. Concentración de plomo total en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes.

El Pb biodisponible se encuentra en un rango de 1.17 a 2.67 mg Kg⁻¹ en temporada de secas y en temporada de lluvias los valores van de 1.56 a 4.94 mg Kg⁻¹ (Figura 11). La norma maneja concentraciones de plomo que van de 300 a 840 mg Kg⁻¹ con lo cual podemos decir que los niveles de Pb encontrados en estos lodos no son fuente de contaminación. Estos resultados los podemos comparar por los obtenidos por Colomer et al, (2010), quien en reporta valores que van de 0 a 1.2 mg Kg⁻¹ para Cd en 7 diferentes tipos de lodos, Medina et al, (2011) en el análisis de su lodo obtiene valores de 0.009 mg Kg⁻¹. Por otra parte, Vicencio et al, (2011) reporta concentraciones de 21.91mg Kg⁻¹, Medina et al, (2011) en el análisis de su lodo obtiene valores de 0.116 mg Kg⁻¹ y Colomer reporta valores de 0.6 a 5.4 mg Kg⁻¹ de Pb, por lo que podemos decir que las concentraciones obtenidas en los lodos residuales no son rangos altos según la NOM-004 de cadmio y plomo que limiten su uso en la aplicación de los suelos.

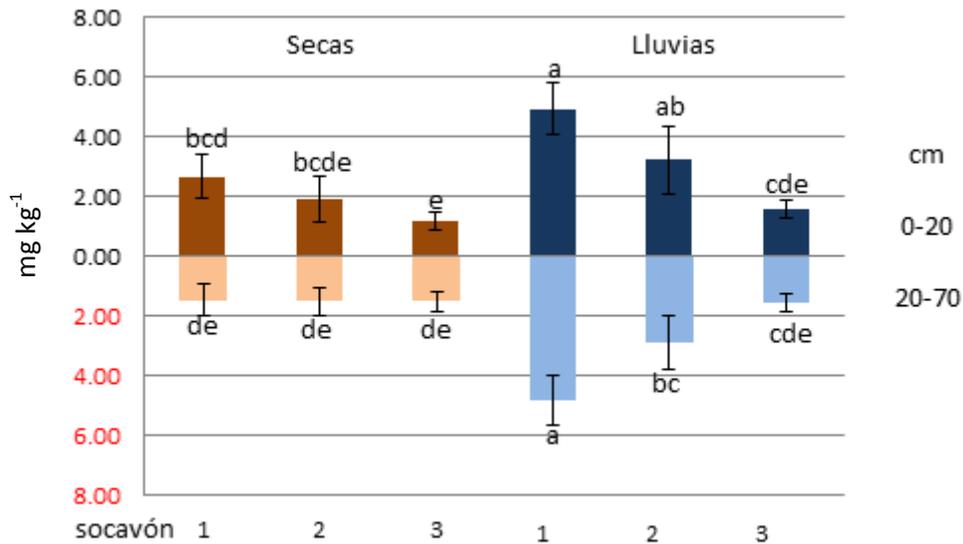


Figura 11. Concentración de plomo biodisponible en lodos residuales en época de secas y lluvias a dos profundidades diferentes

La concentración de los metales pesados en lodos residuales vertidos en los socavones no presenta diferencias significativas entre las profundidades, ni entre la época del año, lo cual indica que no hay movilidad de estos metales hacia mayores profundidades, esto puede deberse a que la concentración de Cd y Pb es baja, se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles según la NOM-004, además de que los lodos muestran un pH alcalino y un porcentaje bueno de materia orgánica lo que impide la movilidad de dichos elementos.

Etapas 2. Análisis botánico de la zona de estudio

La mina se encuentra en una zona con afloramiento de tepetate (toba volcánica endurecida por procesos geológicos y pedológicos), que la FAO- UNESCO clasifica como litosol-regosol éutrico, los tepetates presentan diversas limitantes edafológicas, en las que destacan su dureza, la baja cantidad de poros de tamaño

medio y grandes, el bajo contenido de materia orgánica y de N, así como la baja actividad biológica que limitan su capacidad agropecuaria y forestal (Prat et al, 2003), La extracción continua de arena y grava, es la causa principal de la pérdida del suelo en la mina de Texcoco, esto provoca la degradación del ecosistema, debido a que elimina el suelo, la vegetación y la fauna. Esta perturbación facilita los procesos erosivos y limita el desarrollo de las especies vegetales (Ochoa y Barrera, 2007). Bajo condiciones severas de degradación, se requiere de la implementación de técnicas de restauración para recuperar la vegetación y en consecuencia reducir la erosión de los suelos y propiciar su recuperación (Gómez et al, 2013). Algunas de las alternativas para enfrentar la recuperación de zonas degradadas por este impacto, ha sido el uso de biosólidos que como enmienda orgánica ayuda a recuperar suelos degradados (Moreno et al, 2004).

Varela et al, (2011) menciona que la adición de residuos orgánicos es una de las prácticas más recomendadas para suelos degradados. Los lodos contienen altos niveles de N y P, propiedades importantes para que puedan ser utilizados en la aplicación de tierras (Walter et al, 2006). Las enmiendas orgánicas pueden tener efectos sobre la composición de la comunidad vegetal, la trayectoria de sucesión y puede generar un ingreso de especies exógenas (Varela et al, 2011). Márquez et al, (2014) las traduce como una clara proliferación de la cobertura vegetal. Los lodos se han aplicado como una enmienda mineral orgánica en las prácticas agrícolas y forestales (Moreno et al, 2004). La presencia de árboles y arbustos permite una mayor diversidad estructural en los ecosistemas, además de ofrecer protección contra la erosión del suelo, crea regímenes locales favorables de

temperatura y humedad, permite la reposición constante de materia orgánica del suelo y son albergue para gran cantidad de especies de fauna (Gómez et al, 2013).

Muestreo de la vegetación

Se recolectaron 28 especies en total, a partir de los cuales se elaboró un listado florístico (Cuadro 9), en el cual se muestra que la riqueza taxonómica que incluye un total de 13 familias, 26 géneros y 28 especies. La familia mejor representada fue la Asteraceae con 32 %, seguida por la Poaceae con 18 %, y la Solanaceae con 11 %, la familia Myrtaceae quedo representada con 7 %, las demás familias tienen una riqueza de 4 %. El éxito en el establecimiento y crecimiento de las especies en un determinado ambiente está estrechamente relacionado con los caracteres morfológicos y fisiológicos asociados a la captura de recursos como luz y nutrientes (Girón, 2007). Las especies pioneras son de particular importancia para la restauración ecológica, especialmente las leguminosas, por su gran capacidad de fijar nitrógeno (Gómez et al, 2013).

Cuadro 7 Listado de las especies colectadas en la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco

Familia	Especie
Poaceae	<i>Echinochloa crus-pavonis</i> (Kunth)Schult <i>Cortaderia selloana</i> (J. A. Schultes & J. H. Schultes) Aschers. & Graebn <i>Setaria geniculata</i> (Lam.) Beauv. <i>Avena sativa</i> L. <i>Rhynchelitrum repens</i> (Willd.) C.E. Hubb
Boraginaceae	<i>Wigandia urens</i> (Ruíz & Pavón) Kunth
Salicaceae	<i>Salix bonplandiana</i> Kunth
Resedaceae	<i>Reseda luteola</i> L.
Myrtaceae	<i>Eucalyptus ovata</i> Labill <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh
Oleaceae	<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh
Anacardiaceae	<i>Schinus molle</i> L.

Malvaceae	<i>Kearnemalvastrum lacteum</i> (Ait.) Bates.
Asteraceae	<i>Tithonia tubiformis</i> (Jacq) Cass <i>Bidens odorata</i> Cav. <i>Picris echioides</i> L. <i>Baccharis salicifolia</i> (Ruíz & Pavón) Pers. <i>Cosmos bipinnatus</i> Cav. <i>Senecio inaequidens</i> DC. <i>Pseudognaphalium semiamplexicaule</i> (DC) Anderb <i>Gymnosperma glutinosum</i> (Spreng) Less <i>Conyza canadensis</i> (L) Cronquist
Buddlejaceae	<i>Buddleja cordata</i> Kunth
Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i> L.
Solanaceae	<i>Nicotiana glauca</i> Graham <i>Solanum americanum</i> Mill. <i>Solanum aff. Corymbosum</i> Jacq.
Phytolacaceae	<i>Phytolacca icosandra</i> L.

Salcedo (2007), reporta que la aplicación de lodos residuales en plantaciones forestales incrementa la sobrevivencia y el desarrollo inicial de árboles de *Pinus douglasiana*, por el aporte de nutrientes contenidos en ellos, principalmente N₂ y P, la biomasa microbiana y la incorporación de nuevas fuentes de carbono, por esta razón, no se hace raro que estas especies hayan colonizado el área de los socavones en donde se colocaron estos los residuos orgánicos. Andrés et al, (2007) menciona que la adición de biosólidos aumento la biomasa de cuatro arbustos silvestres y lo atribuyo especialmente al aumento de N, P y K, y a la mejora de las propiedades físicas y biológicas del suelo.

Riqueza de especies

La riqueza específica del área de estudio presento un total de 28 especies, en la figura 7 podemos observar que el área más diversa fue el socavón 3, en él se registraron un total de 20 especies, por el contrario del sitio mina 2, en donde solo se registró una especie. La riqueza hace referencia al número de especies por m²,

que es la medida más comúnmente utilizada para analizar comunidades vegetales (Girón, 2007).

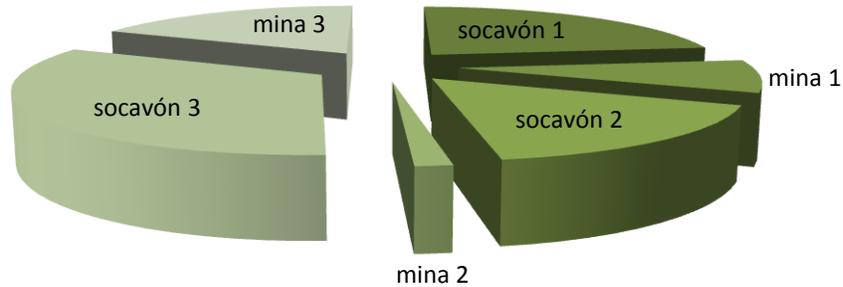


Figura 12. Número de especies encontrada en cada uno de los sitios de muestreo de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco.

Diversidad alfa

La diversidad de especies de acuerdo con el índice de Shannon-wiener (H') (Cuadro 8) fue bajo en todos los sitios muestreados, el socavón 1 y la mina 3 (exterior de la mina), en el socavón 3 el valor H' fue el más alto encontrado para este índice, lo que nos indica que este sitio tiene una o dos especies distintas a los demás sitios. El exterior del socavón 2 (mina 2) no presenta riqueza de especies, esto podría deberse a la influencia que hay en este sitio debido a que se encuentra perturbado por el paso de camiones de carga ya que esta mina se encuentra activa y de ella se extrae arena y grava. En el exterior del socavón 1, se obtuvo un valor de 0.52 debido a que en este sitio solo se encontraron cinco especies. El máximo valor para este índice es 3.5 e indica una mayor diversidad en el ecosistema, en este caso, por tratarse de un área pequeña se obtienen

valores inferiores a 1. Una explicación a lo anterior sería que el índice de Shannon toma en consideración dos variables: la riqueza de especies y la proporción de individuos de la especie i , con respecto al total de individuos (la abundancia relativa de la especie i), teniendo las especies una abundancia relativa similar (Alanís et al, 2010).

Cuadro 8 Índices Shannon-Wiener y Equitatividad de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco.

Sitio	Índice Shannon-Wiener	Índice de equidad de Pielou
socavón 1	0.92	0.56
mina 1	0.52	0.33
socavón 2	0.80	0.51
mina 2	0.00	0.00
socavón 3	1.06	0.53
mina 3	0.93	0.50

El índice de equidad de Pielou (J') (Cuadro 8), mostro que la abundancia de las especies es poca, se observa que en las afueras del socavón 2 (mina 2) el valor es de cero, esto quiere decir que no hay especies dominantes en este sitio, sin embargo, en el sitio mina 1, el valor es 0.33, lo que nos indica que al menos hay una o dos especies dominantes, en los siguientes sitios los valores están en 0.5, esto quiere decir que por lo menos la mitad de las especies encontradas en cada sitio es abundante y ocupan una gran parte del mismo. La falta de significancia en los índices de diversidad biológica estudiados obedece a que los cambios en la riqueza de especies se equilibran con los cambios en la abundancia (Espinoza y Návar, 2005).

Diversidad beta

La presencia de cada una de las especies se representa en el cuadro 9, se puede observar que *Echinochloa crus-pavonis* (Kunth) Schult se presenta dentro de los tres socavones pero esta ausente en los tres puntos muestreados fuera de la mina, también se puede observar que afuera de la mina no se tiene presencia de pastos, sin embargo si hay vegetación presente como la *Avena sativa* L, ya que dentro de la mina se cuenta con dos cultivos de esta gramínea, *Schinus molle* L., *Bidens odorata* Cav., entre otras. *Reseda luteola* L. es otra especie que se comparte entre los tres socavones, así como *Kearnemalvastrum lacteum* (Ait.) Bates, por mencionar algunas.

Cuadro 9 Listado de presencia y ausencia de las especies encontradas dentro y fuera de los lodos vertidos en los socavones de la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco

Especie	socavón 1	mina 1	socavón 2	mina 2	socavón 3	mina 3
<i>Echinochloa crus-pavonis</i> (Kunth)Schult	x		x		x	
<i>Cortaderia selloana</i> (J. A. Schultes & J. H. Schultes) Aschers. & Graebn	x					
<i>Setaria geniculata</i> (Lam.) Beauv.	x		x		x	
<i>Avena sativa</i> L.	x				x	
<i>Rhynchelitrum repens</i> (Willd.) C.E. Hubb	x		x		x	
<i>Wigandia urens</i> (Ruíz & Pavón) Kunth					x	
<i>Salix bonplandiana</i> Kunth	x				x	
<i>Reseda luteola</i> L.	x		x		x	
<i>Eucalyptus ovata</i> Labill					x	x
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh					x	
<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh					x	x
<i>Schinus molle</i> L.		x		x	x	x
<i>Kearnemalvastrum lacteum</i> (Ait.) Bates.	X		x		x	
<i>Tithonia tubiformis</i> (Jacq) Cass		x				x
<i>Bidens odorata</i> Cav.		x				
<i>Picris echioides</i> L.	x				x	x
<i>Baccharis salicifolia</i> (Ruíz & Pavón) Pers.					x	x
<i>Cosmos bipinnatus</i> Cav.		x				
<i>Senecio inaequidens</i> DC.					x	x
<i>Pseudognaphalium semiamplexicaule</i> (DC)						x

<i>Gymnosperma glutinosum</i> (Spreng) Less				x
<i>Conyza Canadensis</i> (L) Cronquist	x		x	x
<i>Buddleja cordata</i> Kunth			x	
<i>Ricinus communis</i> L.	x	x	x	
<i>Nicotiana glauca</i> Graham	x	x	x	
<i>Solanum americanum</i> Mill.	x	x		
<i>Solanum aff. Corymbosum</i> Jacq.	x	x		
<i>Phytolacca icosandra</i> L.	x	x	x	

Por otra parte, se calcularon los índices de similitud de Jaccard y Sorensen con la finalidad de conocer las diferencias entre la vegetación establecida dentro y fuera de los socavones (Cuadro 10). El índice de similitud de Jaccard y el índice de Sorensen están muy relacionados, son los dos más viejos y ampliamente utilizados para la valoración de la similitud en la composición de los ensamblajes (a veces llamado ‘solapamiento de especies’), describen la diferenciación espacial y las diferencias en riqueza de especies entre las comunidades. Con base en ellos, el grado de similitud entre los sitios es muy bajo, estos índices van de 0-1, con lo que podemos observar que el valor más alto en $I_j = 0.29$ entre el socavón 1 y 2, lo cual se refleja en el índice de Sorensen con un valor de 0.45. Por otra parte se observa que entre el socavón 1 y el exterior de la mina su valor va de 0.04 en el índice de Jaccard a 0.07 en Sorensen, mientras que en el socavón 2 ambos valores son de cero, con lo que podemos decir es que entre estos socavones no tenemos especies en común. Según Espinoza y Návar, (2005) esto explica que pocas especies comparten sitios similares, tal vez por su baja plasticidad o sus bajas posibilidades de sobrevivir a la competencia en sitios desfavorables.

Cuadro 10 Índices de similitud Jaccard y Sorensen de las especies encontradas en los socavones de la mina.

Sitio	Índice de Jaccard	Índice de Sorensen
socavón 1 y socavón 2	0.29	0.45
socavón 1 y socavón 3	0.24	0.39
socavón 1 y mina	0.04	0.07
socavón 2 y socavón 3	0.21	0.35
socavón 2 y mina	0.00	0.00
socavón 3 y mina	0.18	0.30

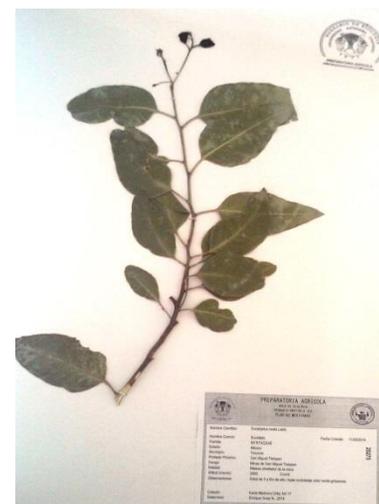
Aunque con los índices de diversidad se puede observar que la presencia de vegetación no es numerosa, se ha logrado obtener información acerca de las especies que se han podido establecer en los lodos residuales que fueron vertidos en tres socavones de la mina y las especies que ya estaban presentes en la mina, las especies pioneras son las primeras en establecerse y forman una comunidad herbácea dominada por gramíneas de carácter sucesoral. Crecen rápidamente y tienen una alta tasa de reproducción; siendo además competitivas en condiciones ambientales muy favorables (Rondón y Vidal, 2005).

Especies presentes en la mina de San Miguel Tlaixpan.

***Eucalyptus ovata* Labill**

Nombre común: Eucalipto de pantano

Descripción: Es un árbol de una talla mediana, la corteza que se muda de casi todo el tronco revela una superficie lisa, de color gris- negro o gris rosácea, poco fibrosa. La corteza áspera se mantiene en la base de los árboles maduros.



Las hojas son pedunculadas, anchas lanceoladas, onduladas de 19 x 8.5 cm, opacas y verdes. Hojas lanceoladas u ovadas de 6-15 cm de largo, verde brillante. Las flores blancas aparecen desde el otoño a mitad del invierno. El árbol puede alcanzar una altura de 30 metros.

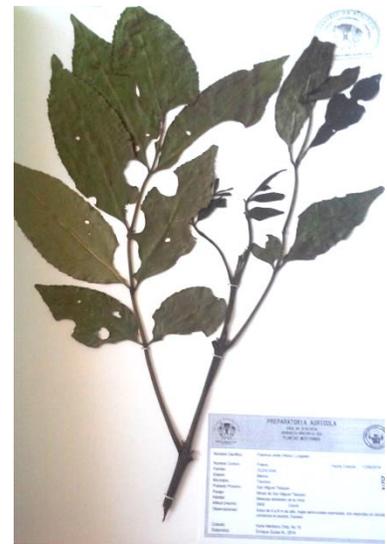
Hábitat: Se encuentra frecuentemente en bosque bajos y permanente mente húmedos.

Distribución: su distribución principal se encuentra en Australia (CONABIO).

***Fraxinus uhdei* (Wenz) Lingelsh**

Nombre común: Fresno

Descripción: Arbol perennifolio o caducifolio, de 15 a 20 m (hasta 30 m) de altura. Copa compacta y redondeada hacia la punta, su sombra es densa. Hojas pinnaticompuestas, opuestas, sueltas, de 20 a 30 cm de longitud, 5 a 9 folíolos, generalmente 7, ovado-



lanceoladas, margen entero o crenulado serrado hacia el tope. En el otoño las hojas adquieren una tonalidad rojo-púrpura, rosada o amarillenta. Tronco recto con ramas ascendentes. Corteza externa es de color gris claro a café oscura, agrietada con placas cuadrangulares. Flores unisexuales, en panículas estaminadas y pistiladas, racimos estaminados cortos y densos, racimos pistilados de 5 cm de largo; flores diminutas verde a rojas, sin pétalos, cáliz campanulado. Fruto elongado alado (sámara) con una sola semilla creciendo en racimos densos de 15 a 20 cm de largo. El cuerpo de la semilla es rollizo de 2.5 a

6 cm de largo por 0.6 cm de ancho, presenta una ala oblonga a espatulada, delgada, lisa, aplanada, de color amarilla a café.

Hábitat: Crece en laderas de cerros, barrancas y cañadas, esporádicamente a orillas de corriente de agua, le favorecen climas templados.

Altitud: 1100- 2600 m

Distribución: Desde Sinaloa y Durango hasta Veracruz y Chiapas (CONABIO).

***Schinus molle* L.**

Nombre común: Pirul

Descripción: Árbol perennifolio, de 4 a 8 m (hasta 15 m) de altura. Copa redondeada y abierta, proporcionando sombra moderada. Hojas compuestas, alternas, de 15 a 30 cm de largo, colgantes, con savia lechosa; imparipinnadas de 15 a 41 folíolos, generalmente apareados, de 0.85 a 5 cm de largo, estrechamente lanceolados, color verde



amarillento. Tronco nudoso. Ramas flexibles, colgantes y abiertas. Corteza rugosa, fisurada, color marrón oscuro. Madera dura y compacta. Panículas axilares en las hojas terminales, de 10 a 15 cm de largo, flores muy pequeñas y numerosas, de color amarillento, miden 6 mm transversalmente. Drupas en racimos colgantes, cada fruto de 5 a 9 mm de diámetro, rosados o rojizos, con exocarpo coriáceo, lustroso, seco en la madurez, mesocarpio delgado y resinoso, cada fruto contiene una o dos semillas. Las semillas poseen un embrión bien

diferenciado que llena toda la cavidad; la testa y el endospermo son delgados, el mesocarpo forma parte de la unidad de dispersión.

Hábitat: Prospera a orilla de caminos, en zonas perturbadas con vegetación secundaria, en pedregales y lomeríos, terrenos agrícolas. Clima entre subtropical, cálido-templado, semiárido, templado seco y templado húmedo. No tiene exigencias en cuanto a suelo, pero prefiere suelos arenosos. Tolera texturas pesadas, suelos muy compactados y pedregosos.

Altitud: 1500 a 2700 m.

Distribución: Se distribuye en la zona templada seca de la Altiplanicie o Mesa Central, sobre todo en las regiones semiáridas. De Durango a Coahuila, Veracruz y Oaxaca. Originario de la región andina de Sudamérica, principalmente Perú, aunque se extiende de Ecuador a Chile y Bolivia. Vive en los Andes Peruanos a altitudes de hasta 3,650 m. Ampliamente distribuido en México, en Centroamérica y en el sur de California y oeste de Texas, en Estados Unidos (CONABIO).

***Tithonia tubiformis* (Jacq.) Cass.**

Nombre común: Gigantón, acahual

Descripción: Planta anual, erecta, por lo general muy robusta de hasta 4 m de alto. Es atractiva, muy parecida al girasol, puede dominar paisajes enteros al principio de otoño. Tallo: Cilíndrico, finamente estriado, rojizos o verdosos, más o menos ramificado. Hojas: Alternas con pecíolos de 1.5 a 11 cm de largo.



Inflorescencia: Cabezuelas solitarias o agrupadas por varias en el extremo de las ramas, sobre pedúnculos fistulosos, ensanchados y cubiertos por pubescencia larga y densa hacia su extremo, involucro anchamente campanulado, sus brácteas 15 a 25, de largo subigual o algo desigual, oblongas a lanceoladas, de 1.5 a 3.5 cm de largo, hípido-pilosas; receptáculo convexo a hemisférico, paleas ovadas, de 10 a 18 mm de largo, cuspidadas o aristadas y a menudo oscuras en el ápice. Flores liguladas de 11 a 20, sus corolas amarillas a anaranjadas, las láminas elípticas, hasta de 5 cm de largo, sus corolas amarillas o anaranjadas, 5 a 7 mm de largo, el tubo de 0.5 mm de largo. Frutos y semillas: Aquenio oblongo-cuneado, grueso, de 4 a 6 mm de largo, pálido, 12 a 14 escamas desiguales, lacerado-fimbriadas, de 0.3 a 1.2 mm de largo, sin pelos. Planta anual, erecta, por lo general muy robusta de hasta 4 m de alto.

Hábitat: Arvense y ruderal, bosque pino-encino, selva baja caducifolia(CONABIO).

Altitud: Hasta los 2450 m

Distribución: Se encuentra en Aguascalientes, Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Zacatecas

***Bidens odorata* Cav.**

Nombre común: Aceitilla

Descripción: Hierba anual, generalmente erecta o ascendente. Mide hasta 1.5 m de alto. Tallo escaso o profusamente ramificado, casi glabro o algo piloso, estriado a acanalado, a veces teñido de púrpura. Hojas opuestas sobre peciolo de hasta 10 cm de largo, ovadas o lanceoladas y aserradas. Cabezuelas solitarias o agrupadas. Flores liguladas, sus corolas blancas, blanquecino amarillentas.



Hábitat: Campos de cultivo, orillas de camino, lugares perturbados.

Altitud: 1000-2900 m

Distribución: México y Guatemala (CONABIO)

***Picris echioides* L.**

Nombre común: Lengua de gato

Descripción: Planta anual o persistiendo a veces por más tiempo, erecta. Provista de pelos rígidos, ganchudos en el ápice y a menudo tuberculados en la base y con frecuencia también de espinas; planta con látex. De hasta un metro de altura. Tallo ramificado y estriado. Hojas basales angostamente oblanceoladas a



elípticas, hasta de 30 cm de largo, obtusas a agudas en el ápice, sinuadas a dentadas en el margen, atenuadas hacia una base que parece pecíolo, las del tallo abrazando el tallo en la base. Cabezuelas dispuestas en cimas. Flores alrededor de 50, las lígulas amarillas, oblongas de aprox. 7 mm de largo.

Hábitat: En la vegetación urbana.

Altitud: 1750- 2100 m

Distribución: Se conoce principalmente del Altiplano y de los valles centrales: Coahuila, Distrito Federal, Hidalgo, Estado de México, Michoacán, Querétaro (CONABIO).

***Baccharis salicifolia* (Ruiz & Pavón) Pers.**

Nombre común: Jarilla

Descripción: Un arbusto con hojas como un sauce, ramas largas y rectas, flores en cabezuelas de alrededor de 7 x 7 mm, casi esféricas, estrechamente lanceoladas a oblanceoladas, con 24 a 41 flores blanquecinas y creciendo en lugares húmedos. Mide de 0.8 a 2 m de alto, a veces más. Tallo cilíndrico, leñoso, glabro. Hojas acumuladas en las axilas, láminas linear-lanceoladas, oblongas o estrechamente elípticas, margen dentado-aserrado.



Hábitat: Márgenes de arroyos y ríos, orillas de caminos y parcelas.

Altitud: desde el nivel del mar hasta los 2800 m

Distribución: Se registra como maleza de Nayarit, Jalisco, Colima, Estado de México, Distrito Federal (CONABIO).

***Cosmos bipinnatus* Cav.**

Nombre común: Girasol morado, mirasol

Descripción: Es una especie llamativa de las partes altas de México, de las regiones de pino-encino puede dominar el paisaje cultural a partir de la segunda quincena de septiembre. Generalmente crece como arvense, y menos frecuentemente como ruderal. Casi no se encuentra en bosques. Tiene generalmente 8 flores liguladas (que parecen a pétalos) de color rosa largas (hasta 3 cm de largo); el



centro (las flores tubulares) son amarillas; en forma silvestre la mayoría de los ejemplares tienen este color aunque ocasionalmente se pueden encontrar individuos blancas o más oscuras. Las hojas son opuestas, por lo menos abajo, y finamente partidas. Llega a medir de 20 cm a 1.20 m de alto. Tallo erecto poco ramificado, escasamente aspero-pubescente, casi glabro.

Hábitat: Ruderal y arvense, pastizales, superficies rocosas o tepetatosas.

Altitud: 1500-3000 m

Distribución: Se reporta casi en todos los estado, excepto en la península de Baja California y Yucatá. Pero es más común en el centro del país (Edo. México, Puebla, Tlaxcala, Michoacan y Jalisco) (CONABIO).

***Senecio inaequidens* DC.**

Nombre común: Manzanilla de llano

Descripción: Esta planta de reciente introducción es considerada como una invasiva seria a nivel mundial. Sus poblaciones todavía son restringidas y susceptibles a erradicación. Herbácea de 15-70 cm de alto. Tallo estriado y sin pelos o a veces con algunos esparcidos. Hojas alternas, lanceoladas u oblanceoladas. Cabezuelas dispuestas en racimos, sobre pedicelos cortos. Flores amarillas. No prospera en la sombra y bajo competencia.

Hábitat: orillas de caminos, vías férreas y algunos ríos, lotes baldíos urbanos, prados y pastizales.

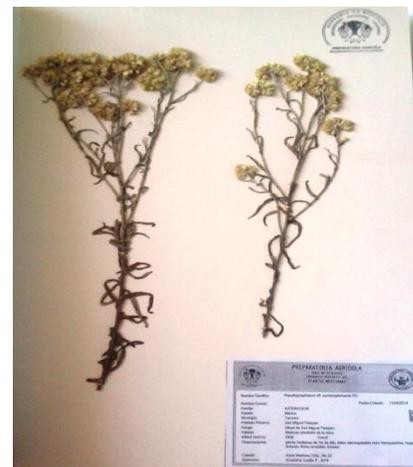
Altitud: 2000 m

Distribución: Europa central y occidental, Colombia, Kenia y México (CONABIO).



***Pseudognaphalium semiamplexicaule* (DC.) Anderb**

Descripción: Herbácea de 40cm a 1.5m de altura con los tallos aterciopelados de color blanquecino. Las hojas son más largas que anchas pero pequeñas, un poco velludas. Las flores son amarillentas o blanquecinas y están reunidas en cabezuelas, se ven plateadas con la luz del sol.



Habitat: Asociadas a vegetación perturbada de pastizal, bosque de encino, de pino.

Altitud: 2000-3000 m

Distribución: México (CONABIO).

***Conyza canadensis* (L.) Cronquist**

Nombre común: Cola de caballo

Descripción: Hierba anual o bianual, erecta. Mide hasta 2 m, uno o más tallos estriados, erectos, glabros a hispídos que surgen de una roseta basal. Hojas alternas

numerosas, lineares a angostamente oblanceoladas o lanceoladas, margen de la hoja ciliado y con pelos conspicuos cerca de la base. Flores femeninas blancas y hermafroditas amarillentas.

Habitat: ruderal o en lugares perturbados, campos abandonados.

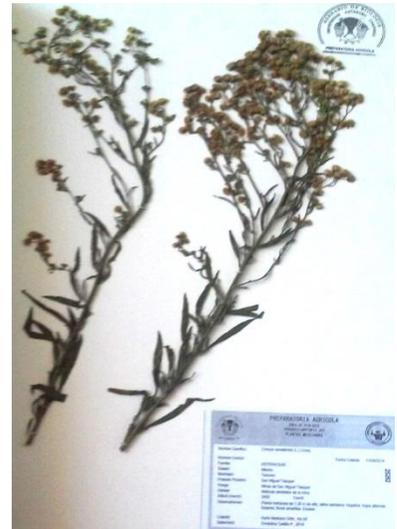
Altitud: 1000-2850 m

Distribución: cosmopolita (CONABIO).

***Gymnosperma glutinosum* (Spreng.) Less.**

Nombre común: Tatalencho

Descripción: Planta herbácea, perenne, erecta, glabra o casi glabra, pegajosa. Mide hasta 1m de alto. Tallo más o menos ramificados, estriados. Hojas alternas lineares a lanceoladas, de 1 a 8.5 cm de largo, de 1-9 mm de ancho,



agudas o acuminadas en el ápice, margen entero, trinervadas, densamente punteadas en ambas caras, sésiles a casi sésiles. Cabezuelas numerosas, dispuestas en densos conjuntos corimbiformes terminales. Flores liguladas, corola color amarillo.

Habitat: áreas perturbadas y vegetación secundaria

Altitud: 1200-2850 m

Distribución: Norteamérica, Aguascalientes, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Estado de México, Morelos (CONABIO).

Especies cuya presencia se debe a la aplicación de lodos residuales en el socavón.

***Echinochloa crus-galli* (L.) Link**

Nombre común: hierba del espolón de gallo del Golfo.

Descripción: Hierba robusta perenne (raramente anuales) con tallos gruesos 50-200 cm de altura, a menudo enraizamiento en los nudos inferiores. Láminas foliares grandes y blandas, 15-60 cm de largo y 5-25 mm de ancho; lígula ausente. La Inflorescencia es grande y 10-30 cm de largo, sobre todo con los racimos poco ramificados de 3-15 cm de largo. Espiguillas elípticas, de 2-3 mm de largo (rara vez más), hispidas; lema inferior agudo, acuminado o con una corta arista curvada 1-3 mm, o hasta 7 mm de largo; superior lema 2-2.5 mm de largo.



Hábitat: Los pantanos y lados de arroyos, en aguas poco profundas.

Altitud: 0 a 1 900 m.

Distribución: Kenya, Uganda, la República Unida de Tanzania, África tropical y del Sur; América tropical (FAO)

***Cortaderia selloana* (J. A. Schultes & J. H. Schultes) Aschers. & Graebn.**

Nombre común: Pasto de pampas

Descripción: Planta cespitosa dioica, forma macollos de aprox. 2-3 m de diámetro, los culmos llegan a medir hasta 3m de alto. Presenta vainas anchas, redondeadas, lisas, sin pelos o con anillo de pelos alrededor del collar. Su inflorescencia presenta panículas de color blanco-plateado, de 25 cm a 1 m de largo.



Hábitat: Se presenta a lo largo de caminos y carreteras.

Distribución: Nativa de Sudamérica, distribuida en México como ornamental, se ha registrado en Chiapas, Sonora, laderas de la autopista México-Toluca (CONABIO).

***Setaria geniculata* (Lam) Beauv.**

Nombre común: Cola de zorra

Descripción: Planta perenne, que mide de 30- 120 cm de alto. Forma una corona de rizomas cortos y una ramificación desde los nudos inferiores, que en ocasiones produce raíces. Los tallos son huecos, decumbentes y



glabrosos. Los nudos inferiores son gruesos y forman un codo. Las hojas son aplanadas y glabras o con algunos pelos en la parte superior y hacia la base. Su inflorescencia es una panícula terminal, cilíndrica y densa, parecida a una espiga. Las espiguillas están rodeadas por un grupo radiado de 5-8 cerdas persistentes y ásperas de color bronceado o amarillo.

Hábitat: es bastante común en muchas regiones de cultivos, potreros, orilla de carretera y sabanas.

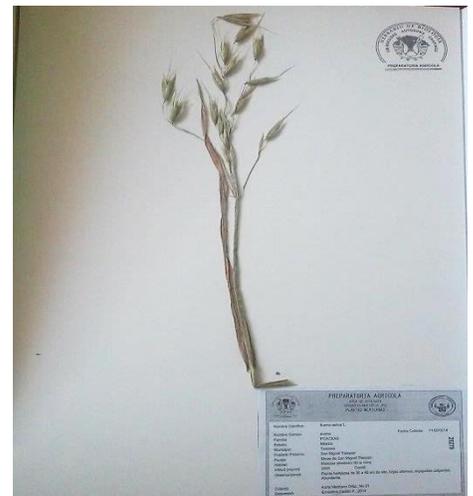
Altitud: 762 a 1370 m

Distribución: se distribuye a nivel mundial (Montiel, 1976)

***Avena sativa* L.**

Nombre común: Avena

Descripción: hierba anual de 1,5 metros de altura; cañas copetudo o solitaria, erguido o doblado en la base, lisa. Las hojas son no-auriculadas, verde y las vainas redondeadas en la parte posterior; lígulas contundente, membranosa. La inflorescencia es una panícula difusa



con 2-3 floretes, todos bisexuales o distales, Glumas sub-iguales 7-11 venas, ya gluma 17-30 mm; lemas 7-9 venas, ya sea bífida o con una cerda en su ápice. El grano está estrechamente rodeado por el lema y palea con fuerza. Tamaño de la semilla varía con el cultivar, es comúnmente cerca de 30 000 semillas por kilogramo.

Hábitat: se extiende a lo largo de terrenos secos

Altitud: 1 600 a 2800 m

Distribución: Países templados, tropicales y subtropicales (FAO).

***Rhynchelitrum repens* (Willd) C.E. Hubb**

Nombre común: Pasto rosado

Descripción: hierba perenne, tallos erectos, ramificados, de 1 m de altura; internudos con los pelos de la tuberculosis, nodos suaves peludos. Lígula de un anillo de pelos largos 1 mm de largo; vaina suelta, más corto que internodo, usualmente cubierto de pelos. Panícula abierta, 15 cm de largo, ramas capilares; pedicelos largo peludo. Espiguillas comprimidas lateralmente, ovadas, densamente cubiertas



de pelos de color rosa, pelos de 6 mm de largo; pedicelos delgados, espiguilla fácil caerse del pedicelo;

Hábitat: Arvense y ruderal: orillas de caminos, bordes y dentro de los terrenos de cultivo, así como huertos y componente de la vegetación secundaria.

Altitud: 0-2 400 m

Distribución: Se origina en África y se distribuye en centro y Sudamérica y regiones cálidas de Europa (CONABIO).

***Wigandia urens* (Ruiz & Pavón) Kunth**

Nombre común: Ortiga de tierra caliente, tabaco cimarrón

Descripción: Planta arbustiva o arbórea, cubierta de diferentes tipos de pelos, de hojas alternas, grandes y gruesas, ovadas a casi circulares, flores moradas, violáceas, azules o lila-blanquecinas, casi sin pedicelos, se disponen sobre ejes cuyos ápices tienden a enroscarse, ubicados generalmente hacia las puntas de las ramas. Llega a medir hasta 6 m de alto.



Hábitat: En matorrales, lugares perturbados y como ruderal, a orilla de caminos, lugares abandonados y áreas alteradas

Altitud: 20-3000 m

Distribución: De México a Colombia y Venezuela, California, Australia y África (CONABIO).

***Salix bonplandiana* Kunth**

Nombre común: Sauce, Aguejote

Descripción: Árbol perennifolio o caducifolio, de 6-15 m de altura, hojas simples, alternas, linear-lanceoladas a oblongas, glabras, de 6-15 cm de largo por 1-3 cm de ancho, margen finamente serrulado, verdes en el haz, glaucas en el envés. Ramas abundantes, delgadas, ascendentes, glabras. Sus



inflorescencias aparecen con las hojas emergentes y presenta flores densas. Su fruto es una cápsula corta color pardo-amarillento o rojizo claro.

Hábitat: ruderal, orilla de canales, presas, parques y jardines.

Altitud: 1200-2500 m

Distribución: Sureste de la ciudad de México (CONABIO)

***Reseda luteola* L.**

Nombre común: Gualda, acocote, mosquito.

Descripción: hierba erecta, sin pelos, de 40-100 cm de alto, con roseta basal y hojas casi siempre sésiles, lineares o lanceoladas de 2-12 cm de largo, enteras y a veces onduladas. Presenta racimos especiformes de 20-35 cm de largo de muchas flores sobre pedicelos cortos. Las flores son de color amarillento y el fruto es una capsula subglobosa.

Hábitat: ruderal y arvense

Altitud: 1800-3000 m

Distribución: Europa, se ha registrado en Aguascalientes, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Estado de México, Hidalgo, Jalisco, Veracruz (CONABIO)



***Eucalyptus camaldulensis* Denhn**

Nombre común: Eucalipto rojo

Descripción: Árbol siempre verde, que puede alcanzar 50-60 m de altura, con copa amplia y el tronco muy grueso, con la corteza lisa, de color blanco con tonos marrones o rojizos y que se desprende en placas con los años. Hojas alternas, colgantes, pecioladas, de color verde-griseáceo, algo coriáceas, de 8-30 cm de longitud, con la punta algo torcida.

Inflorescencias en umbelas de 7-11 flores en forma de copa

con numerosos estambres de color blanquecino-amarillento. Fruto en capsula cupuliforme con opérculo puntiagudo de 5-8 mm de longitud. Florece de abril a julio.

Hábitat: Se encuentra cerca de cursos de agua, en sitios ribereños, es más usual en suelos arcillosos.

Distribución: Es nativa de Australia, ha sido introducida a diferentes regiones del mundo, principalmente con clima mediterráneo y subtropical (CONABIO).



***Kearnemalvastrum lacteum* (Ait) Bates.**

Nombre común: Malvavisco, malvón, malva

Descripción: Hierba leñosa hacia la base, con pelos ramificados. Mide de 1-3 m de alto. Tallo ramificado, a veces con pelillos. Hojas alternas de hasta 10 cm de largo, más cortas hacia el ápice de los tallos, divididas en 3-7 lóbulos, con dientes



redondeados en los márgenes. Las flores pediceladas se disponen en racimos de racimos. Flores con tres hojillas pequeñas y angostas que se localizan en la base de cada flor. Frutos secos, envueltos en el cáliz, que tienen forma de gajos.

Hábitat: Lugares perturbados

Altitud: 1000- 2350 m

Distribución: México, Guatemala y Colombia (CONABIO).

***Buddleja cordata* Kunth**

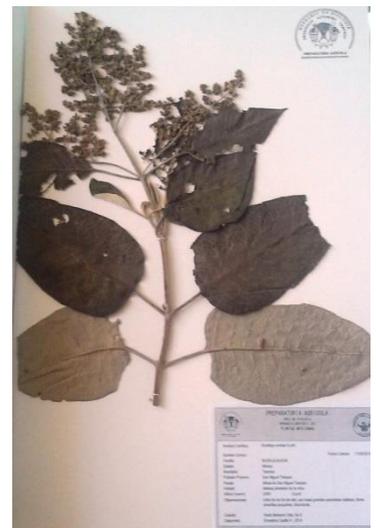
Nombre común: Hierba de tepozán

Descripción: Árboles o arbustos, 2.0-12.0 m alto, dioicos. Tronco 10.0-45.0 cm diámetro en la base, corteza rugosa, parda a negruzca. Hojas con pecíolos 1.0-4.0 cm largo, lanceoladas, ovadas, oblongas o elípticas, base cordata, obtusa o truncada, en ocasiones atenuada u oblicua, ápice agudo a acuminado, margen entero, serrado o serrulado, coriáceas, haz tomentoso, con tricomas glandulares cerca de las nervaduras, glabrescente

o glabro, envés con abundante pubescencia flocosa. Inflorescencias terminales, paniculadas, címulas con 5-10 flores. Flores con cáliz campanulado, tomentoso a glabrescente, corola campanulada, amarillenta con tonos anaranjados en la garganta.

Habitat: Maleza ruderal, se encuentra en lugares perturbados, a orillas de camino, terrenos baldíos. Pastizales, bosques y lugares desmontados.

Altitud: 1700-2800m



Distribución: América, desde el norte de México hasta Guatemala (CONABIO).

***Ricinus communis* L.**

Nombre común: Higuera

Descripción: Planta herbácea alta, a veces algo arbustiva, de color verde claro a azul-grisáceo, en ocasiones rojiza.

Mide hasta de 6 m de alto. Tallo engrosado, ramificado.

Hojas ovado-oblongas a lanceoladas, agudas o acuminadas, borde irregularmente dentado-glanduloso.

Flores masculinas con un perianto de 6 a 12 mm de largo,

el de las flores femeninas de 4 a 8 mm de largo, ovario densamente cubierto por largos tubérculos blandos, que parecen pelos gruesos. El fruto es una cápsula subglobosa, de 1.5 a 2.5 cm de largo, con espinas cortas y gruesas (equinado).

Hábitat: Ruderal; además cultivada.

Distribución: Distribuida en los trópicos, en México se registra en Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Distrito Federal, Guanajuato, Guerrero, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, entre otros (CONABIO).



***Nicotiana glauca* Graham**

Nombre común: Tabaquillo

Descripción: Arbusto poco ramificado o árbol de vida corta.

De 1.5 a 6 m de alto. Tallo verdoso o azul-purpúreo.

Hojas cordado-ovadas, elípticas o lanceoladas, ápice



agudo, base obtusa, sin pelos. Flores con cáliz de 5 a 15 mm de largo, cilíndrico, sin pelos o escasamente pubescente, sus dientes triangulares, mucho más cortos que el tubo; corola en forma de trompeta, de 3 a 4 cm de largo por 4 a 7 mm de ancho, generalmente amarilla, sin pelos o escasamente pubescente. El fruto es una cápsula de 7 a 15 mm de largo, ampliamente elipsoide; semillas más largas que anchas, más o menos angulares, lateralmente comprimidas.

Hábitat: Ruderal, común a orillas de caminos y carreteras, a lo largo de ríos y arroyos, cerca de cultivos y patios de casas.

Altitud: 1700-2650 m

Distribución: América tropical, Australia, África, Oceanía, Asia y probablemente Sudamérica (CONABIO).

***Solanum americanum* Mill.**

Nombre común: Hierva mora

Descripción: Planta herbácea, erecta o rastrera. Llega a medir hasta de 1 (1.5) m de alto. Tallo ramificado, con pelos encorvados hacia arriba o casi sin pelos. Hojas a menudo en pares, siendo una más grande que la otra, entera a sinuado dentada en el margen, cuneada en la base, con pelos contra la superficie en ambas caras o sin pelos. Inflorescencias laterales, en forma de umbelas o cimbras. Flores Con cáliz de 1



a 2 mm de largo, sus lóbulos 5, más o menos del mismo largo que el tubo, ovados a oblongos, doblados hacia abajo en fruto; corola morada o blanca, de 4 a 7.5 mm

de largo, sus lóbulos triangulares, mucho más largos que el tubo, pubescentes por fuera. Fruto globoso, de 4 a 8 mm de diámetro, negro en la madurez.

Hábitat: ruderal y arvense

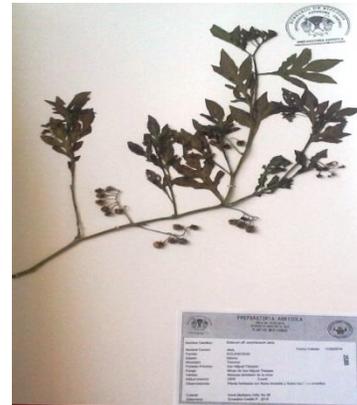
Altitud: 1000-2300 m

Distribución: Canadá a Sudamérica (CONABIO).

***Solanum aff. Corymbosum* Jacq.**

Nombre común: Tomatillo silvestre

Descripción: Hierba perenne, más o menos erecta, de hasta 1 m de alto. Tallo ramificado, a veces con conspicuas líneas que parecen continuarse desde el pecíolo tallo abajo, a veces con pelos largos, suaves y entrecruzados en la base. Hojas alternas, ovadas, de hasta 14 cm de largo, con un pecíolo de hasta 2 cm de largo. Las flores pediceladas, pocas a numerosas, agrupadas formando inflorescencias laterales sobre los tallos. Flores con cáliz acampanado y termina en 5 dientes triangulares; la corola parecida a una estrella, de 5 pétalos unidos hacia la base, de color azul-morado a blanquecino, el fruto carnoso, globoso, de color rojo o anaranjado, de aproximadamente 6 mm de diámetro.



Hábitat: maleza ocasional

Altitud: hasta los 2450 m

Distribución: México a Perú (CONABIO).

***Phytolacca icosandra* L.**

Nombre común: Jaboncillo

Descripción: Hierba anual o perenne de vida corta, con frecuencia robusta, sin pelos o poco pubescente, algo succulenta. Mide hasta de 2 m de alto. Tallo ramificado, hueco, anguloso. Hojas elípticas u ovado-elípticas, ápice agudo, acuminado, base atenuada a acuminada; pecíolos bien manifiestos. Racimos pedunculados, numerosos, axilares y terminales, de 8 a 15 cm o más de largo en estado de fructificación. Flores subsésiles, brácteas subuladas, tépalos verdosos, blancos o rojizos. Fruto carnoso, globoso-aplanado, verde cuando tierno, pasando a rojo oscuro y luego negro en la madurez



Habitat: Lugares perturbados

Altitud: 900- 3000 m

Distribución: México y Antillas de Sudamérica, Algunas partes de Europa (CONABIO).

CONCLUSIÓN

Las características físico-químicas de los lodos residuales vertidos en los socavones de la mina de San Miguel Tlaixpan, presentan beneficios en la zona de estudio, debido a que tienen nutrientes que permite su uso como mejoradores de la fertilidad del suelo.

La concentración de metales pesados, en particular de cadmio y plomo, se encuentran en concentraciones bajas en ambas temporadas del año, las cuales se encuentran muy por debajo de los límites establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Se encontraron 28 especies que van de pastos a arbustos, que a pesar de no mostrar una gran diversidad, presentan una mejor abundancia que en el suelo de la mina, observando un cambio en la vegetación dentro de los socavones en donde fueron vertidos los lodos residuales.

LITERATURA CITADA

- Acosta Y., Paolini J., Flores S., Benzo Z., El Zauahre M., Toyo L., Senior A. 2003. Evaluación de metales pesados en tres residuos orgánicos de diferente naturaleza. *Multiciencias*. 3 (1): 15-60.
- Alanís E., Aranda R., Mata J., Canizales P., Jiménez J., Uvalle J., Valdecantos A., Ruiz M. 2010. Riqueza y diversidad de especies leñosas del bosque tropical caducifolio en San Luis Potosí, México. *CIENCIA UANL*. 13(3): 287-294
- Ali H., Khan E. Sajad A. 2013. Phytoremediation of heavy metals--concepts and applications. *Chemosphere*. 91(7):869-81
- Ali H., Naseer M., Sajad A. 2012. Phytoremediation of heavy metals by *Trifolium alexandrinum*. *International journal of environmental sciences*. 2(3): 1459-1469.
- Al-khedhairi A., Al-rokayan S., Al-misned F. 2001. Cadmium toxicity and cell stress response. *Pakistan J Biol Sci*. 4: 1046-1049.
- Alloway J., Thornton I., Smart A., Sherlock J., Quinn J. 1998. Metal availability. *The Science of total environment*. 75: 41-69
- Álvarez E.A., Mochon M.C., Sanchez J.C.J. Rodríguez M.T. 2002. Heavy metals extractable form in sludge from wastewater treatment plants. *Chemosphere*. 47: 765-775.
- Andrés F, Walter I, Tenorio J. 2007. Revegetation of abandoned agricultural land amended with biosolids. *Science of the Total Environment*. 378: 81–83

- Barbarick K., Doxtader K., Rédente E., Brobst R. 2004. Biosolids effects on microbial activity in shrubland and grassland soils. *Soil Science*.169(3): 176-187
- Basta T., Ryan J., Chaney R. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34, 49-63
- Bravo S., Consuegra M., García F., Amorós J., Pérez C., Higuera P. 2015. Effect of the addition of sewage sludge as a fertilizer on a sandy vineyard soil. *Journals of Soils and Sediments*. 15 (4)
- Brunetti P., Rovira G., Farrag K., Senesi N. 2009. Tolerance and accumulation of heavy metals by wild plant species grown in contaminated soils in Apulia region, Southern Italy. *Plant Soil* 318: 285–298.
- Caicedo P., Rahman K., Kusch P., Blumberg M., Paschke A., Janzen W., Schüürmann G. 2014. Comparison of heavy metal content in two sludge drying reed beds of different age. *Ecological Engineering* 74: 48–55
- Cajuste L. and Reggie L. 2001. The relationship between the phytoavailability and the extractability of heavy metals in contaminated soils. In: *Environmental Restoration of Metals-Contaminated soils*. Iskandar I.K. Lewis Publishers. Boca ratón, Florida. Pp 189-198.
- Camobreco J. V., Richards K. B., Steenhuis S. T., Peverly H. J. McBride B. M. 1996. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. *Soil Science* 161:740-750
- Campos M., E., N. García R., A. Velásquez R., y M. García F. 2009. Análisis básico del reuso de lodos residuales de una planta de tratamiento

de aguas residuales en suelos de pradera del parque nacional nevado de Toluca. Quivera 11(2):35-51

- Cañizares R. 2000. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. Revista Latinoamericana de Microbiología. 42:131-143
- Cherian S, Oliveira M. 2005. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. Environ Sci Technol. 39(24):9377-90
- Colomer F., Gallardo A., Robles F., Bovea, Ma., Herrera L. 2010. Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. Ingeniería. 14 (3): 177-190
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas.htm#POACEAE>
- Dalmaso A. 2010. Revegetación de áreas degradadas con especies nativas. Bol. Soc. Argent. Bot. v.45 n.1-2
- Delgadillo A., González C., Prieto F., Villagómez J. Acevedo o. 2011. Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 14: 597-612.
- Dell'Aglio M., Gaudiuso R., Senesi G., De Giacomo A., Zaccone C., Miano T., De Pascale O. 2011. Monitoring of Cr, Cu, Pb, V and Zn in polluted soils by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). Journal of Environmental Monitoring. 13: 1422-1426
- Epstein E. 2010. Land application of sewage sludge and biosolids. Lewis: Boca Raton. Pp. 1-10.

- Espinoza R., Návar, J. 2005. Producción de biomasa, diversidad y ecología de especies en un gradiente de productividad en el matorral espinoso tamaulipeco del Nordeste de México. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 11 (1): 25-31
- Estévez, J., Andrade M., Marcet P., Montero M. 2000. Fijación y Movilidad de Cadmio y Zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. Ciencia del Suelo 18 (1): 28-35.
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/ag/agp/AGPC/doc/gbase/latinsearch.htm>
- Fytianos, K., Charantoni, E. 1998. Leaching of Heavy Metals from Municipal Sewage Sludge. Environment International, 24, 467-475.
- García H., El Zauahre M., Acosta Y, Morán H., Toyo L. y Fernández N. 2008. Evaluación del contenido de meta les pesados en lodos residuales aerobios. Multiciencias. 8(3): 281 – 293
- Gardner W., Naeth M., Broersma K., Chanasyk D., Jobson A. 2012. Influence of biosolids and fertilizer amendments on element concentrations and revegetation of copper mine tailings. Can. J. Soil Sci. 92: 89-102
- Gawdzik J. and Gawdzik B. 2012. Mobility of Heavy Metals in Municipal Sewage Sludge from Different Throughput Sewage Treatment Plants. Pol. J. Environ. Stud. 21(6): 1603-1611
- Gaytán C., Vibrans H., Navarro H., Jiménez M., 2001. Menejo de huertos familiares periurbanos de San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Estado de México. Boletín de la sociedad botánica de México. 69: 39-62.

- Girón M. 2007. Composición florística y diversidad en rodales de *elaeagnus angustifolia* L. (elaegnaceae). *Actual Biol* 29 (87): 173-186.
- González E., Tornero M., Cruz Y., y Bonilla y Fernández N. 2009. Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (1): 15-22
- Groffman M., Mcdowell, H., Myers C., Merriam L. 2001. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 1339-1348.
- Guacaneme S., Barrera J., 2007. Efecto de la aplicación de biosólidos, como enmienda orgánica, en la recuperación de un suelo disturbado por actividad extractiva en la cantera de soratama, localidad de Usaquén, Bogotá. *Universitas Scientiarum.* 12 (2): 85-98
- Guitart, R., Vernon T. 2005. ¿Es el plomo empleado en deportes (caza, tiro y pesca deportiva) un problema de salud pública infravalorado? *Revista Española de Salud Pública.* 79 (6)
- Harrison Z., E., Murray B.M., Bouldin R. D. 1999. Land application of sewage sludges: an appraisal of the US regulations. *Int. J. of Environment and Pollution.* 11 (1): 1-36
- Hernández J., Olivares E., Villanueva I., Rodríguez H., Vázquez R., Pissani J. 2005. Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare* Per s.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental.* 21(1).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=31

- Ippolito A., Barbarick K., Paschke M., Brobst R. 2010. Infrequent composted biosolids applications affect semi-arid grassland soils and vegetation. *J.A. Journal of Environmental Management* 91: 1123–1130
- Kabata-Pendias, A. 2000. Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp. 365, 413
- Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H. y Środa K. 2012. Properties and production of sewage sludge in Poland with reference to the methods of neutralizing. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*. 14 (4): 59-78.
- Klinge C., Gejlsbjerg B., Ekelund F. y Madsen T. 2001. Effects of Sludge-amendment on Mineralization of Pyrene and Microorganisms in Sludge and Soil. *Chemosphere*. 45 (4-5): 625-634.
- Kosobucki P., Chmarzyński A. y Buszewski B. 2000. Sewage Sludge Composting. *Polish Journal of Environmental Studies*. 9(4): 243-248
- Liu X., Zhang Y., Yang M., Wang Z. y Wen-zhou L. 2007. Analysis of bacterial community structures in two sewage treatment plants with different sludge properties and treatment performance by nested PCR-DGGE method. *Journal of Environmental Sciences*. 19: 60-66.
- Lone M., Zhen- Li H., Stoffella P., Yang X. 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*. 9(3):210-220
- López A. y Williams G. 2006. Evaluación de métodos no paramétricos para la estimación de riqueza de especies de plantas leñosas en cafetales. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 78: 7-15

- Malinowska E., Jankowski K., Wiśniewska B., Sosnowski J., Kolczarek R. 2015. Effect of different methods of treatment of municipal sewage sludge on their physicochemical properties and their agricultural utilization. *Journal of Ecological Engineering*. 16 (2): 76–81
- Marambio, C. y Ortega, R. 2003. Uso potencial de lodos derivados del tratamiento de aguas servidas en la producción de cultivos en Chile. *Revista Agronomía y Forestal UC* 20.
- Márquez J., Jiménez L., Alonso N., García P., Díez C., Bienes R. 2014. Revegetación arbustiva y aplicación de lodos compostados como elementos de protección del suelo y de control de la erosión hídrica. *Ensayos de lluvia simulada. Researchgate*. 193-197
- Marrero J., Sánchez I., Coto O. 2012. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Sistema de Información Científica*. 46(3): 52-61
- Medina E., Velázquez A., Gómez A. 2011. Predicción y comparación de transferencia de nutrientes de dos tipos de vermicomposteo de lodos residuales a suelos forestales. *Quivera*. 13(1): 1-15
- Metcalf and Eddy. 1996. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera edición. McGraw-Hill. México.
- Miralles I., Beltrán E., Porce L M, Delgado M., Beringola M., Martín J., Calvo R., Walter I. 2002. Emergencia de seis cultivos tratados con lodo, fresco y compostado, de estaciones depuradoras. *Rev. Int. Contam. Ambient*. 18 (3) 139-146

- Mostacedo B., Fredericksen T. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal.
- Narváez W., Benavides A., Vázquez M., Cabrera M. 2014. Efecto de la aplicación de lodos crudos de la industria textil en la productividad y en la composición química de lechuga (*Lactuca sativa*) Rev. Int. Contam. Ambient. 30 (4): 379-391
- Navarro J., Aguilar I., López J. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en planas. Ecosistemas. 16(2): 10-25
- Navas A., Machón J., Navas B. 1999. Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). Bioresource Technology 69: 199-205
- 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. DOF. 15 DE AGOSTO DE 2003
- NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- Ochoa A., Barrera J. 2007. Efecto de la aplicación de biosólidos, sobre el desarrollo de la vegetación en las primeras etapas sucesionales, en la cantera soratama, localidad de Usaquén, Bogotá. Universitas Scientiarum. 12(2): 57-72

- Olivares S., García D., Lima L., Saborit I., Llizo A., Pérez P. 2013. Niveles de cadmio, plomo, cobre y zinc en hortalizas cultivadas en una zona altamente urbanizada de la ciudad de la habana, cuba. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (4): 285-294
- Olowu R., A., Sundiya M., O., Onwordi C.,T., Denloye A., A., Okoro C., G., Tovide O., O., Majolagbe A., O., Omoyeni O., A., Moronkola B., A., 2012. Pollution status of brewery sewage sludge in lagos, nigeria. *IJRRAS.* 10(1): 159-165
- Oropeza G., N. 2006. Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia* 1: 51-58
- Ors S., Sahin U., Khadra R. 2015. Reclamation of Saline Sodic Soils with the Use of Mixed Fly Ash and Sewage Sludge. *Arid Land Research and Management.* 29(1): 41-54
- Ortiz Ma., Gutiérrez M., Sánchez E. 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 11 (2): 105-115
- Parra J., Espinoza L. 2008. Distribución de metales pesados (pb, cd y zn) en perfiles de sedimento asociado a *Rhizophora mangle* en el río Sevilla - ciénaga grande de Santa Marta, Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 37(1): 95-110
- Paz C., Henríquez O., Freres R. 2007. Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. *Revista de Geografía Norte Grande,* 37: 35-45

- Pogrzeba M., Galimska R., Krzyżak J., Sas-Nowosielska A. 2015. Sewage sludge and fly ash mixture as an alternative for decontaminating lead and zinc ore regions. *Environ Monit Assess* 187:4120
- Prat, Ch., Ordaz Ch., V., Rugama U., J.A. 2003. Impacto de la roturación y del manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura. *Terra Latinoamericana*. 21 (1): 109-115
- Prieto J., González C., Román A., Prieto-García F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystem*. 10 (1): 29 – 44
- Ramdani N., Hamou A., Lousdad A. and Al-Douri Y. 2015. Physicochemical characterization of sewage sludge and green waste for agricultural utilization. *Environmental Technology*, 36 (12): 1594–1604
- Ramos R., Cajuste L., Flores D., García N. 2001. Metales pesados, sales y sodio en los suelos de Chinampa en México. *Agrociencia*. 35(4): 385-395
- Reyes M., Barreto L. 2011. Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. *Revista Épsilon*. 16: 31-45
- Ribeiro S., López S., Anjos L., Aparecida M. 2012. Lead tolerance and phytoremediation potential of Brazilian leguminous tree species at the seedling stage *Journal of Environmental Management* 110: 299-307
- Robledo S. E., Espinosa H. V., Maldonado T. R., Rubiños J. E., Hernández A. E., Ojeda T. E., y Corlay Ch. L. 2010. Sales solubles y metales pesados en suelos tratados con biosólidos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(2): 241-251

- Rodríguez M., Delgado A., Gonzáles M., Carrillo R., Mejía J., Vargas M. 2010. Emergencia y crecimiento de las plantas ornamentales en sustratos contaminados con residuos de mina. *Interciencia*. 35(1):26-32.
- Rojas, R., y Mendoza, L. 2012. Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Revista producción más limpia*. 7(2):74-94.
- Rondón J y Vidal R. 2005. Establecimiento de la cubierta vegetal en áreas degradadas (principios y métodos). *Revista forestal latinoamericana*. 38: 63-82
- Salcedo E., Vázquez A., Krishnamurthy L., Zamora F., Hernández E. y Rodríguez R. 2007. Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en jalisco, México. *Interciencia*. 32 (2) : 115-120
- Sánchez J., García I., Moral F., Haro J., González V., Simón M., Martín F., Iriarte A. 2010. Utilización de lodos de corte y pulido del mármol en la recuperación de escombreras de mármol. *Rev. de Ciências Agrárias* v.33 n.1
- Siuris A. 2011. Properties of sewage sludge resulted from urban wastewater treatment in the Republic of Moldova. *Scientific Papers, UASVM Bucharest*. 14: 103-108.
- Soil Survey Taxonomy. 2010. Claves para la Taxonomía de suelos. Traducido por Ortiz C., Gutiérrez M., Hernández L. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Natural Resorces Conservation Service.

- Solis L., Islas M., Vicenta E. 2012. Vermicomposting of sewage sludge: Earthworm population and agronomic advantages. *Compost Science & Utilitation*. 20(1): 11-17
- Sullivan T., Stromberger M., Paschke W., Ippolito J., 2006. Long-term impacts of infrequent biosolids applications on chemical and microbial properties of a semi-arid rangeland soil. *Biology and Fertility of Soils* 42, 258–266
- Tahar K., Keltoum B. 2011. Effects of Heavy Metals Pollution in Soil and Plant in the Industrial Area, West ALGERIA. *Journal of the Korean Chemical Society*. 55(6): 1018-1023
- Tessa H., Cory W., Rutter M. 2013. Extensive Variation in Cadmium Tolerance and Accumulation among Populations of *Chamaecrista fasciculata*. *Plos one*. 8:1-11.
- Tormo J., Bochet E., P. García-Fayos. 2009. Restauración y revegetación de taludes de carreteras en ambientes mediterráneos semiáridos: procesos edáficos determinantes para el éxito. *Ecosistemas* 18 (2): 79-90
- Torres P., Madera C. y Martínez G. 2008. Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín* 61(1):4432-4444
- Urzelai A., Cagigal E., Antepara M., Bonilla A., Gurtubay K. 2001. Potencial de fitorremediación de especies vegetales. Tratamiento de suelos contaminados con metales. *Revista Ingeniería química*. 33(308): 205-210

- Varela S., Miriam E., Laos F. 2011. Can biosolids compost improve, in the short term, native vegetation and soils fertility in burned *Nothofagus pumilio* forest in Patagonia, Argentina? *Bosque*. 32 (3): 267-278
- Vicencio M., Pérez E, Medina E., Martínez A. 2011. producción de composta y vericomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27(3): 263-270
- Wagner M. y Loy A. 2002. Bacterial community composition and function in sewage treatment systems. *Current Opinion in Biotechnology*. 13:218–227
- Walter I., Martínez F., Cala V. 2006. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environmental Pollution*. 139: 507-514
- Warman P. and Termeer W. 2004. Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: yields and N, P and K content of crops and soils. *Bioresource Technology* 96: 955–961
- Wei Y. y Liu Y. 2005 .Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study. *Chemosphere*. 59(9):1257-65.
- Wu Q., Cui Y., Li Q. y Sun J. 2015. Effective removal of heavy metals from industrial sludge with the aid of a biodegradable chelating ligand GLDA. *Journal of Hazardous Materials* 283: 748–754
- Wuana R. and Okieimen F. 2011. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*. Review. 1-21.

- Zhang T., Ming-Fei S y Lin Y. 2012. 454 Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants. *International Society for Microbial Ecology*. 6: 1137–1147.