



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**POSGRADO DE INGENIERIA – INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LOS TIEMPOS DE ESTABILIZACIÓN DE  
SITIOS YA CLAUSURADOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS, MEDIANTE LA RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS INOCULADOS**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**DAYANIRA JOVITA GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**COMITÉ TUTORAL**

**DR. IVAN MORENO ANDRADE, INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**MTRO. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS, FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DR. DANIEL DE LOS COBOS VASCONCELOS, INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**MTRA. GLORIA MORENO RODRÍGUEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**CD. MEXICO, ENERO 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Daniel de los Cobos Vasconcelos

Secretario: Dr. Iván Moreno Andrade

Vocal 1: M. C. Gutiérrez Palacios Constantino

Vocal 2: M. C. Moreno Rodríguez Gloria

Vocal 3: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

**Lugar donde se realizó la tesis:** El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del 09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020.

Otros laboratorios que apoyaron:

- Laboratorio De Cromatografía de Iones de la Sección de Contaminación Ambiental, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

**TUTOR DE TESIS**

Dra. María Neftalí Rojas Valencia

## **AGRADECIMIENTOS**

Al doctor **Rodolfo Sosa**, del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), quien a pesar del cambio que hubo con el tema de tesis, siempre estuvo dispuesto a apoyarme.

A la doctora **Neftalí**, por haberme aceptado a mitad de maestría, no tenía planeado hacer un cambio tan radical, sin embargo, las cosas siempre suceden por algo, le agradezco infinitamente la paciencia hacia conmigo y por haberme comprendido en las dificultades con mi hijo, muchas gracias.

Al doctor **Daniel de los Cobos**, y su equipo por su gran apoyo en la determinación de la técnica de PCR y secuenciación.

## **DEDICATORIA:**

A **Dios**, por ser el centro de mi vida y familia, guiarme en cada decisión que doy.

A mi hijo **Maximiliano**, eres ese pedacito de motor que me impulsa a querer ser la mejor versión de mi persona, gracias porque a tu lado me has permitido aprender cosas nuevas y darme valor para enfrentar retos que jamás pensé podría hacerlos, te pido disculpas cuando tuve que dejarte semanas con tus abuelos, además de las horas que pude pasar a tu lado jugando y yo trabajando.

A mis **Padres**, sin su ayuda yo no hubiera podido lograr esto, cuidando de mi hijo que es lo más valioso que tengo y estar al pendiente de su formación, no hay palabras para agradecer esto.

A **Fer**, gracias pelón.

## Contenido

Resumen .....	- 10 -
Abstract .....	- 11 -
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>- 12 -</b>
1.1 Justificación.....	- 15 -
<b>2. HIPÓTESIS.....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>- 17 -</b>
3.1 Objetivos Generales.....	- 17 -
3.2 Objetivos específicos.....	- 17 -
3.3 Alcances.....	- 18 -
<b>4. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>- 18 -</b>
4.1 Residuos Sólidos Urbanos en México.....	- 18 -
4.2 Tipos de Sitios de Disposición final de Residuos Sólidos Urbanos en México.....	- 20 -
4.3 Tiraderos a Cielo Abierto: Clausura y Saneamiento.....	- 22 -
4.4 Lixiviados .....	- 25 -
4.5 Clasificación de los Lixiviados .....	- 27 -
4.6 Sistemas de Tratamiento de Lixiviados.....	- 28 -
<b>5. ANTECEDENTES.....</b>	<b>- 29 -</b>
5.1 Investigaciones Relacionadas .....	- 29 -
5.2 Rumen.....	- 30 -
5.3 Material Estabilizado (ME).....	- 32 -
5.4 Propuesta de Tratamiento y aporte en la Investigación .....	- 32 -
<b>6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>- 34 -</b>
6.1 Descripción del área de estudio.....	- 34 -
6.2 Extracción y Caracterización del Material Estabilizado (ME).....	- 38 -
6.3 Muestreo de Lixiviados y su caracterización .....	- 39 -
6.4 Microorganismos en Material Estabilizado y Lixiviados.....	- 42 -
6.5 Construcción y operación de los Biofiltros.....	- 42 -
6.6 Análisis estadístico .....	- 44 -
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>- 46 -</b>
7.1 Caracterización del Material Estabilizado (ME).....	- 46 -
7.2 Caracterización de los Lixiviados .....	- 47 -
7.3 Microorganismos en Material Estabilizado y Lixiviados.....	- 48 -
7.3.1 Bacterias en Material Estabilizado y Lixiviados.....	- 48 -
7.4 Biofiltros .....	- 52 -

<b>7.5 Análisis estadístico .....</b>	<b>- 61 -</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>- 63 -</b>
<b>9. REFERENCIAS.....</b>	<b>- 65 -</b>
<b>10. ANEXOS .....</b>	<b>- 70 -</b>

## **Índice de Tablas**

Tabla 1. Sitios de disposición final 2010-2012

Tabla 2. Clasificación de los lixiviados

Tabla 3. Composición de un lixiviado

Tabla 4. Comparación de las técnicas de tratamiento de lixiviados

Tabla 5. Parámetros para la caracterización de lixiviados

Tabla 6. Equipos usados en la caracterización de lixiviados

Tabla 7. Matriz Experimental

Tabla 8. Composición y distribución de tamaño de partícula en material estabilizado

Tabla 9. Porcentaje de Materia Orgánica en Material Estabilizado

Tabla 10. Caracterización de lixiviado de Ciudad Jardín Bicentenario

Tabla 11. Caracterización de las bacterias aisladas

Tabla 12. Resultados de la DQO en la entrada de los biofiltros

Tabla 13. Resultados de la DQO de salida de los biofiltros y porcentaje de remoción

Tabla 14. Resultados de la DBO<sub>5</sub> en la entrada y salida de los biofiltros y porcentaje de remoción

Tabla 15. Resultados de la N-NH<sub>4</sub> en la salida de biofiltros



## Índice de figuras

- Fig. 1. Generación de RSU por región en México (2012)
- Fig. 2. Composición de los RSU en México (2012)
- Fig. 3. Disposición final de los RSU generados en México, 1995-2012
- Fig. 4. Disposición final de los RSU en México
- Fig. 5. Localización de los sitios de disposición final en Cd. De México
- Fig. 6. Ex Tiradero Bordo Xochiaca antes y después de ser saneado
- Fig. 7. Línea de tiempo de los ex tiraderos a cielo abierto: Alameda Poniente, Prados de la Montaña y Ciudad Jardín Bicentenario
- Fig. 8. Distribución de las regiones del ex tiradero Bordo Xochiaca
- Fig. 9. Diagrama de la metodología experimental
- Fig.10. Muestreo del material estabilizado en Ciudad Jardín Bicentenario
- Fig.11. Muestreo de Lixiviados generados en Ciudad Jardín Bicentenario
- Fig.12. Esquema de un Biofiltro utilizado en el presente proyecto
- Fig.13. Caracterización del material estabilizado muestreado
- Fig.14. Presencia de bacterias en medios nutritivos
- Fig.15. Tinción de Gram en medios selectivos
- Fig. 16. Absorbancia de muestra de salida biofiltro 3
- Fig. 17. Electroforesis de muestra de salida biofiltro 3
- Fig.18. Comportamiento en la entrada de DQO de los cuatro biofiltros
- Fig.19. Comportamiento de DQO, en la salida de los cuatro biofiltros
- Fig.20. Comportamiento en la salida de los cuatro biofiltros
- Fig.21. Porcentaje de eliminación de DQO, en los cuatro biofiltros
- Fig.20. Comportamiento en la eliminación de DQO, de los cuatro biofiltros
- Fig.22. Comportamiento en la entrada de DBO<sub>5</sub>, de los cuatro biofiltros
- Fig.23. Comportamiento de la DBO<sub>5</sub>, en la salida de los cuatro biofiltros
- Fig.24. Comportamiento de N-NH<sub>4</sub>, en la salida de los cuatro biofiltros
- Fig.25. Comportamiento de Alcalinidad, en la salida de los cuatro biofiltros
- Fig.26. Comportamiento de Color, en la salida de los cuatro biofiltros
- Fig.27. Tonalidad en la salida de los biofiltros después de dos semanas de operación

Fig. 28. Comportamiento en la salida de los cuatro biofiltros

## Abreviaturas

RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RS	Relleno Sanitario
RC	Relleno Controlado
TCA	Tiradero a Cielo Abierto
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
SAARB	Biofiltro semi-aeróbico con desechos envejecidos
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
ME	Material Estabilizado
SEMARNAT	Secretaria de Marina y Recursos Naturales
NMX	Norma Mexicana
ANOVA	Análisis de varianza
SEDESOL	Secretaria de Desarrollo Social
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
NOM	Norma Oficial Mexicana
EPA	Agencia de Protección Ambiental
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Bióxido de Carbono
APHA	Asociación Americana de Salud Pública
UNE	Una Norma Española
PVC	Policloruro de vinilo
DE	Desviación estándar
BR	Biofiltro

## **Resumen**

La forma más común de disponer residuos sólidos en México son los tiraderos a cielo abierto, como el caso del ex tiradero “Ciudad Jardín Bicentenario”, donde recibió más de 1,200 toneladas de desechos provenientes de la Ciudad de México iniciando su operación en 1975 y clausurado y saneado en 2006, hoy en día alberga instalaciones deportivas y comerciales. A 13 años de su cierre y siguiendo los protocolos pos clausura de la legislación ambiental mexicana (NOM-083-SEMARNAT-2004), continúa generándose una cantidad importante de biogás y de lixiviados, lo que conlleva a buscar un método para disminuir tiempos de estabilización de estos sitios de disposición final clausurados.

Una de las técnicas viables para lograr disminuir los tiempos de estabilización en sitios de disposición final, se centra en el uso de material estabilizado como material de empaque en un biofiltro anaerobio, ya que presenta eficiencia de remoción importante en términos de DQO. Las eficiencias en estos biofiltros se encuentran atribuidas a la existencia de comunidades microbianas en el material estabilizado y que se han aclimatado a altas concentraciones de contaminantes, desarrollando una capacidad para degradar materia orgánica. Es por ello que el presente trabajo consistió en hacer uso de cuatro biofiltros empacados con material estabilizado, haciendo circular en ellos lixiviados con dos factores:

- Sin empleo de inóculo y sin recirculación
- Uso de inóculo y recirculación de lixiviado

Este tratamiento permitirá utilizar los lixiviados para usos internos en los sitios de disposición final, convirtiéndolo de un líquido contaminante a un potencial recurso, además de evitar que tales líquidos se infiltren al subsuelo o escurran hacia cuerpos de agua superficiales.

## **Abstract**

The most common way to dispose municipal solid waste in Mexico is the open-air dumps, such as the former “Ciudad Bicentenario Garden” ex dump site, where it received more than 1,200 tons of waste from Mexico City beginning its operation in 1975 and closed and sanitized in 2006, today this site is houses sports and commercial facilities. 13 years after its closure and following the post-closure protocols of Mexican environmental legislation (NOM-083-SEMARNAT-2004) a significant amount of biogas continues to be generated and leachate, which entails looking for a method to reduce stabilization times of these closed final disposal sites.

One of the viable techniques to reduce stabilization times at final disposal sites, focuses on the use of stabilized material as packaging material in an anaerobic biofilter, since it has significant removal efficiency in terms of COD. The efficiencies in these biofilters are attributed to the existence of microbial communities in the stabilized material and that have acclimatized to high concentrations of pollutants, developing a capacity to degrade organic matter. That is why the present work consisted of making use of four biofilters packed with stabilized material, circulating in them leached with two factors:

- No use of inoculum and no recirculation
- Use of inoculum and leachate recirculation

This treatment will allow the use of leachate for internal use at the final disposal sites, converting it from a contaminating liquid to a potential resource, in addition to preventing such liquids from infiltrating the subsoil or draining into surface water bodies.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población, la urbanización, las actividades industriales, comerciales y la acelerada obsolescencia de productos comerciales, ha tenido como consecuencia un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos en el mundo (Aguilar *et al.*, 2017). Una de las alternativas de disposición final de los residuos sólidos urbanos aceptada y empleada en países como Francia, Suiza, Países Bajos, Alemania, Bélgica, Suecia, Austria y Dinamarca es la de aprovechar aquellos residuos que son susceptibles a reincorporarse al sistema productivo, para disminuir la demanda y explotación de nuevos recursos, y los que no, insertarlos a la disposición final en los rellenos sanitarios (Xie *et al.*, 2010; Salem *et al.*, 2008, SEMARNAT 2015), debido a sus ventajas económicas de construcción, operación y de alejar los residuos de la población para evitar riesgos a la salud y plagas. En el relleno sanitario se esparcen los residuos sólidos urbanos y posteriormente son sometidos a una compactación para disminuir su volumen, cubriéndolos con una capa de tierra con el fin de evitar la proliferación de olores y enfermedades (Jojoa -Unigarro, 2016).

La cifra más reciente que se tiene de generación diaria de residuos sólidos urbanos en México es del 2017 que reporta 145,479.00 toneladas/día, mientras que en 2015 se generaron 102,895.00 toneladas/día, que representa un incremento al 42 % (SEMARNAT, 2015), de los cuales del total de estos residuos sólo se recolectan el 83.93% y se disponen en sitios de disposición final 78.54% reciclando únicamente el 9.63% de los residuos generados. Se ha reportado que en el año de 1997 la disposición de residuos en México el 87% se realizaba en tiraderos a cielo abierto, mientras que para el año 2017 el panorama cambio el 79% de la disposición de estos residuos se realizó en sitios controlados y rellenos sanitarios (Aguilar *et*

*al.*, 2017), que son lugares que deben cumplir con la normativa ambiental NOM-083-SEMARNAT-2003, al igual que cuando son clausurados para su desuso.

Una de las afectaciones que pueden causar estos sitios de disposición final, son la generación de biogás y lixiviados (Fernández *et al.*, 2015). El lixiviado contiene una cantidad considerable de compuestos orgánicos, nutrientes (nitrógeno, fósforo), minerales y metales pesados (Xie, B., *et al.*, 2010), Foo *et al.*, 2009 concluyeron que el lixiviado pueden ser clasificado según su edad, de acuerdo a la carga orgánica y la cantidad de contaminantes, por otro lado, Ramos *et al.*, 2010; Wiszniowski *et al.*, 2006 concluyeron que la cantidad de lixiviado generado y su composición son puntos importantes que definen el tipo de tratamiento. Entre las tecnologías que se utilizan para tratar el lixiviado, se encuentra aquellas basadas en procesos fisicoquímicos, como adsorción, sistemas de filtración por membrana, coagulación-floculación, oxidación química, mientras que por procesos biológicos se tienen sistemas de recirculación y uso de lodos activados (Renou *et al.*, 2008; Wiszniowski *et al.*, 2006; Aguilar *et al.*, 2017), sin embargo el costo de tratamiento de estos procesos en lixiviados es mayor que el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales (Kjeldsen *et al.*, 2002; Renou *et al.*, 2008).

Es bien sabido que la basura envejecida en los sitios de disposición final ya clausurados, tiene una gran área específica y alta porosidad, y contiene un gran número de predominantes bacterias que se han aclimatado a una alta concentración de contaminantes durante años, transformándose en un residuo estable sobre el tiempo (Han, Z. Y., *et al.*, 2011). Durante este proceso, los metales son oxidados y sales inorgánicas se pueden disolver en el lixiviado. Sin embargo, ha estado bien demostrado que el contenido de metales pesados y fosfatos en el lixiviado es bastante bajo. Esto puede deberse a un alto pH del lixiviado (7.5-8.5) llevando a

la precipitación de los metales o fosfato, o estos constituyentes pueden simplemente adsorberse a los sólidos de desecho degradados (Zhao *et al.*, 2007). Por lo tanto, el uso de residuos viejos para tratar lixiviados es una alternativa prometedora.

Actualmente, los residuos bien descompuestos a través de los años, en el relleno sanitario (residuos viejos) se utilizan comúnmente como medio de empaque de biofiltros para el tratamiento de lixiviados (Xie, B., et al., 2010). Un biofiltro, es un reactor de tipo biológico para eliminar contaminantes como nitrógeno amoniacal en particular, en un lixiviado. El medio de empaque, como componente principal de un biofiltro, no sólo debe ser beneficioso para la eliminación de contaminantes, sino que también debe ser resistente a las obstrucciones y disponible a bajo costo (Jokela *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2007). Se han reportado eficiencias importantes de remoción del rango en DQO de 86 - 96%, DBO<sub>5</sub> en 95.8-99% y NT en 60 – 75%; estas altas eficiencias se encuentran atribuidas a la gran actividad microbiana que existe en este material estabilizado para biofiltros aerobios (Song *et al.*, 2011; Aguilar *et al.*, 2017).

En México se tienen pocas investigaciones usando como material de empaque residuos estabilizados, así mismo se pretende demostrar en el presente trabajo que mediante la recirculación de un lixiviado inoculado en un biofiltro empacado con residuo estabilizado en condiciones anaeróbicas, puede disminuir el tiempo de estabilización de la materia orgánica de un sitio de disposición final ya clausurado.

## 1.1 Justificación

Cuando un sitio de disposición final de residuos sólidos ha llegado a su término para ser clausurado, se siguen los lineamientos que la NOM-083-SEMARNAT-2004 establece:

Clausula 9.3.

***Mantenimiento.** Se debe elaborar y operar un programa de mantenimiento de pos clausura para todas las instalaciones del sitio de disposición final, por un periodo de al menos 20 años. Este periodo puede ser reducido cuando se demuestre que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente. El programa debe incluir el mantenimiento de la cobertura final de clausura, para reparar grietas y hundimientos provocados por la degradación de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como los daños ocasionados por erosión (escurrimientos pluviales y viento).*

Clausula 9.4

***Programa de monitoreo.** Se debe elaborar y operar un programa de monitoreo para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente por la emisión de biogás y generación de lixiviado, el cual debe mantenerse vigente por el mismo periodo que en el punto 9.3 de la presente Norma.*

En el caso del ex tiradero a cielo abierto en México denominado “*Ciudad Jardín Bicentenario*”, que en 1975 comenzó a operar y con el tiempo fue convertido a relleno sanitario, hasta 2006 que fue definitivamente clausurado después de recibir más de 1,200 toneladas de desechos provenientes de la Ciudad de México y alrededores. Derivado de la clausura de este sitio surgió el proyecto “*Ciudad Jardín Bicentenario*”, que consistió en sanear el sitio para albergar



áreas deportivas, sociales, culturales, comerciales, educativas y de salud. (Alcántar-Negrete, 2015). Sin embargo aunque en este sitio ya han transcurrido 12 años y se encuentran zonas comerciales y deportivas que son concurridas y siguiendo los protocolos que establece la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, continúa generándose una cantidad de biogás y lixiviados que alcanza en promedio 50-60 % de CH<sub>4</sub>, 35-45 % de CO<sub>2</sub> y 1% de O<sub>2</sub> para el biogás, mientras que para los lixiviados se generan 12 m<sup>3</sup>/año, lo que implica un tema de seguridad por el abandono que se le da a estos sitios derivado de cambios políticos que ocurren. Es por esto que el presente trabajo plantea evaluar mediante la recirculación de un lixiviado crudo y un lixiviado inoculado operando de forma anaerobia, en una serie de cuatro biofiltros con residuos estabilizados como medio de empaque. En la recirculación con lixiviado inoculado se incrementará la carga bacteriana metanogénica presente, de tal manera que la infiltración de estos ya enriquecidos con microorganismos al interior de un residuo estabilizado, incremente las tasas de degradación, (medidos mediante la remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO) posibilitando que los tiempos de estabilización se reduzcan drásticamente y paralelamente se incremente la tasa de generación de metano. Este tratamiento permitirá utilizar los lixiviados en los sitios de disposición final de residuos, convirtiéndolo de un líquido contaminante a un potencial recurso, además de evitar que tales líquidos se infiltren al subsuelo o escurran hacia cuerpos de agua superficiales. También se hará la identificación de bacterias que intervienen en el proceso de degradación de lixiviado, para ello se dispondrá de material estabilizado y lixiviado proveniente del ex tiradero “Ciudad Jardín Bicentenario”.

Para lograr lo anteriormente planteado se establece la siguiente hipótesis y objetivos.

## **2. HIPÓTESIS.**

Mediante el uso de inóculo en la recirculación de lixiviados en un biofiltro empacado con material estabilizado del mismo sitio clausurado de disposición final de residuos en condiciones anaeróbicas, es posible disminuir el tiempo de estabilización de los lixiviados en términos de remoción de DQO.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivos Generales.**

- Determinar si el tiempo de estabilización de un sitio de disposición final de residuos ya clausurado disminuye mediante la recirculación de lixiviado inoculado determinando la eficiencia de remoción de la materia orgánica (DQO).

### **3.2 Objetivos específicos.**

- Obtener la caracterización de los residuos estabilizados y los lixiviados muestreados, previamente a su recirculación e inoculación.
- Montar un sistema de biofiltros a escala laboratorio, donde se aplique dos variables y dos factores.
- Obtener la caracterización final del lixiviado remanente.
- Evaluar la factibilidad de análisis vía PCR para el lixiviado remanente.
- Evaluar la factibilidad técnica del sistema probado, aplicando análisis estadístico ANOVA.

### **3.3 Alcances.**

El presente estudio trabajará con material estabilizado con edad superior a 9 años y lixiviados de la zona clausurada del ex tiradero Bordo de Xochiaca hoy denominado “*Ciudad Jardín Bicentenario*”.

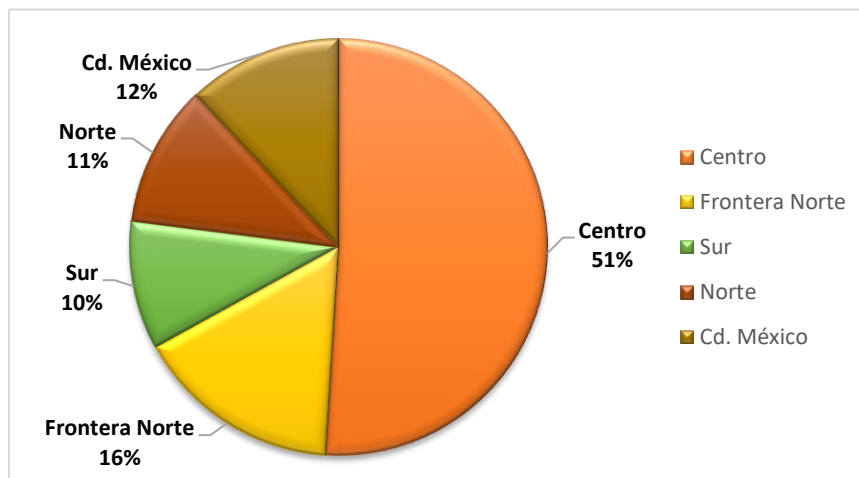
## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 Residuos Sólidos Urbanos en México.**

Los residuos urbanos presentan una composición muy variada constituida por elementos bastante inertes (metales, vidrios, restos de reparaciones domésticas, tierra, escorias y cenizas). Otros son elementos fermentables como sustancias orgánicas putrescibles (pan, pescado, restos de hortalizas, frutas y en general, restos de alimentos). Por último, como combustibles, se encuentran el papel, cartón, plásticos, gomas, cueros, textiles y otros (Alía *et al.*, 1991; Aguilar, *et al.*, 2017). Numerosos factores influyen sobre su composición y entre ellos las características de la población: zona rural, urbana, residencial, zonas de servicio, así como el clima, la estación y el modo o nivel de vida de la población, por lo general países con menores ingresos producen menos residuos, predominando residuos de composición orgánica, mientras en los países con mayores ingresos predominan residuos de tipo inorgánicos debido al consumo de productos manufacturados (Alía *et al.*, 1991).

En México el aumento en la generación de estos residuos sólidos urbanos se debe al crecimiento urbano, desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas aunado al cambio en los patrones de consumo de la población (SEMARNAT, 2015). Las diferencias en la distribución de la población provocan que la generación de residuos varíe geográficamente, los mayores volúmenes se producen en las zonas con mayor concentración de población. En 2012 SEDESOL reportó que la región centro concentró el 51% de la generación de RSU,

seguido de la frontera norte con 16%, la zona sur el 10%, zona norte el 11% y la ciudad de México con el 12%. Ver Fig. 1



**Fig. 1. Generación de RSU por región en México (2012)**  
Fuente: Adaptada de SEMARNAT (2015)

La composición de residuos que se produjeron en México en el año 2012, corresponden a residuos orgánicos (52.4%), papel, cartón (13.8%), plásticos (10.9%), otro tipo de basura (12.1%), textiles (1.4%), vidrio (5.9%), aluminio (1.7%), metales (1.1%), el resto otros metales. Ver Fig. 2.

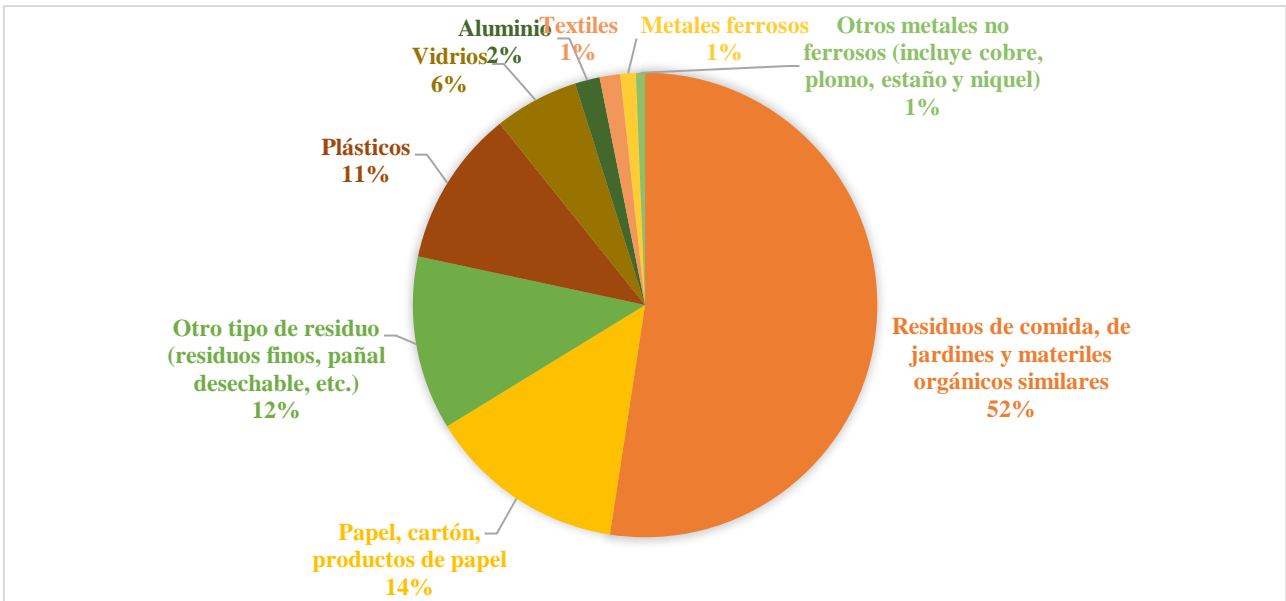


Fig. 2. Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en México (2012)  
Fuente: Adaptada de SEMARNAT (2015)

#### 4.2 Tipos de Sitios de Disposición final de Residuos Sólidos Urbanos en México.

En México, las prácticas más comunes para disponer los residuos sólidos urbanos en el suelo por ser económico y de fácil operación para los municipios son:

- *Relleno sanitario (RS),*
- *Relleno controlado (RC) y*
- *Tiradero a cielo abierto (TCA).*

Un RS es una obra de infraestructura de disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial que cumple con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003. Se reportan 260 en el 2016, lo que indica un aumento del 10% con respecto al año 2010 que se tenían 216 (INEGI, 2012; Nájera *et al.*, 2010; Rojas-Valencia, 2012), (Tabla 1). Un RC es un sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario más no las condiciones de impermeabilización, se tienen reportes del año 2012 con 121. Finalmente, un TCA es un lugar donde se vierten los residuos directamente al suelo sin cubrirse con tierra, operando de forma clandestina se ha reportado que en el año 2012 se contaban con 1,264, una

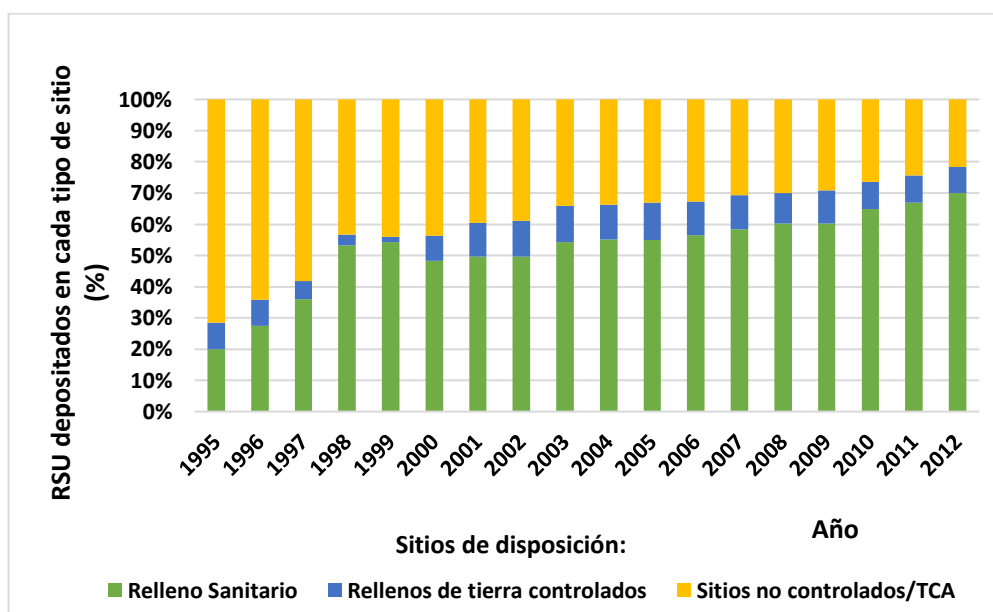
disminución del 24% con respecto al 2010 que eran de 1,644 sitios. Los estados que presentan más TCA son: Veracruz (581), Aguascalientes (265), Oaxaca (221), Nayarit (116) y Coahuila (81).

**Tabla 1. Sitios de disposición final 2010-2012**

Sitio de disposición final	Número	Año
Tiraderos a Cielo Abierto	1,644	2010
	1,264	2012
Relleno Controlado	0	2010
	121	2012
Relleno Sanitario	216	2010
	260	2012

Fuente: INEGI (2012)

En el 2012 SEMARNAT reporta que la disposición de estos residuos a rellenos sanitarios y rellenos controlados se incrementó un 75%, con respecto al año 1997 donde se disponía sólo el 41% de los residuos. Mientras que, para los tiraderos a cielo abierto en 2012, esta disposición se vio disminuida al 25% con respecto al año 1997 donde el 70% de los residuos se disponían en estos lugares. Ver Fig. 3



**Fig. 3. Disposición final de los RSU generados en México, 1995-2012**

Fuente: SEMARNAT (2013)

En 2015 SEMARNAT reporta que la disposición de los residuos sólidos urbanos fue como sigue: el 61% se concentra en rellenos sanitarios, 16% en tiraderos a cielo abierto, 12% no se encuentra determinado, mientras que el restante 11% ya se recicla. Ver Fig. 4.

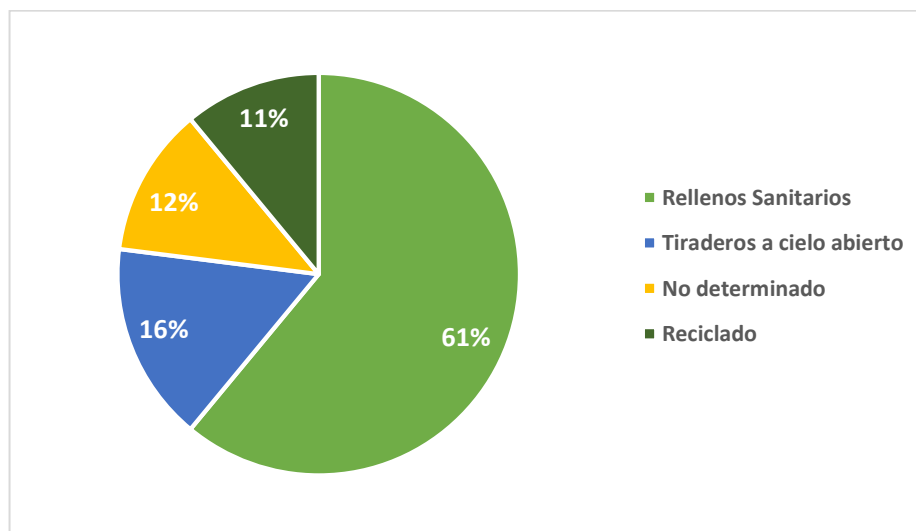


Fig. 4. Disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos en México. SEMARNAT (2015)

#### 4.3 Tiraderos a Cielo Abierto: Clausura y Saneamiento.

La clausura de cualquier sitio de disposición final de residuos sólidos, es necesaria cuando se tienen las siguientes condiciones:

- Cuando un sitio está por alcanzar su capacidad volumétrica disponible, así como de la estabilidad de los residuos depositados.
- Cuando el sitio representa problemas para el ambiente y la salud de la población, por falta de control.
- Cuando causa molestias importantes a los vecinos y se tiene una queja pública.

- Cuando se implementa un programa de reordenamiento del sistema de aseo urbano a nivel regional.

La NOM-083-SEMARNAT-2003, establece la obligatoriedad de cerrar y reinsertar estos lugares, con periodos de vigilancia ambiental de más de 20 años, tras la clausura. (De Cortázar *et al.*, 2017).

En la ciudad de México, por comodidad y tradición, se había optado por los tiraderos a cielo abierto como método de disposición final de residuos sólidos urbanos. Se contaba con ocho de éstos ubicados en: *Santa Cruz Meyehualco* (que operó por más de 40 años), *Santa Fe, Tláhuac, Tlalpan, Milpa Alta, San Lorenzo Tezonco, Bordo de Xochiaca y Santa Catarina*. Es a partir de 1987, que el gobierno comenzó a cerrarlos y a construir áreas verdes, como es el caso de las *Alameda Poniente*; por la dimensión de la clausura del tiradero de *Santa Cruz Meyehualco* (150 hectáreas), actualmente se ubican dos parques recreativos. Posteriormente en 1985 se clausuró el tiradero de *San Lorenzo Tezonco*, ya que recibía cerca de dos mil toneladas diarias de basura. En mayo de 1994, después de 35 años de operación se cerró el tiradero de *Santa Fe, Prados de la Montaña*, fue el primer ex tiradero de basura clausurado y seguidamente saneado según la normatividad de la EPA (*Jiménez Cisneros, 2002*). También otro de los sitios que se clausuro y saneo en 2006 fue *Bordo Xochiaca*, conocido hoy en día como “*Ciudad Jardín Bicentenario*”, y que alberga áreas deportivas, sociales, culturales, comerciales, educativas y de salud. Ver Fig. 5 y Fig. 6.



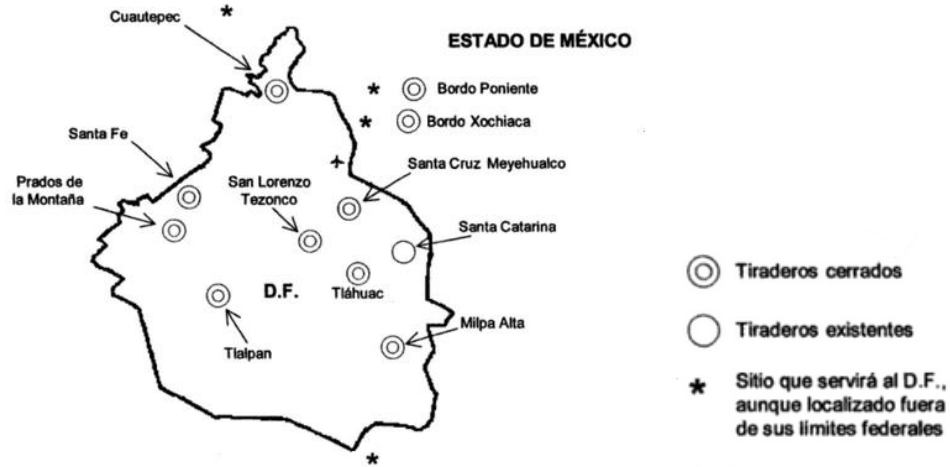


Fig. 5. Localización de los sitios de Disposición final en Cd. México. Fuente SEMARNAT (2001)



Ex Tiradero de Residuos Sólidos antes del Saneamiento



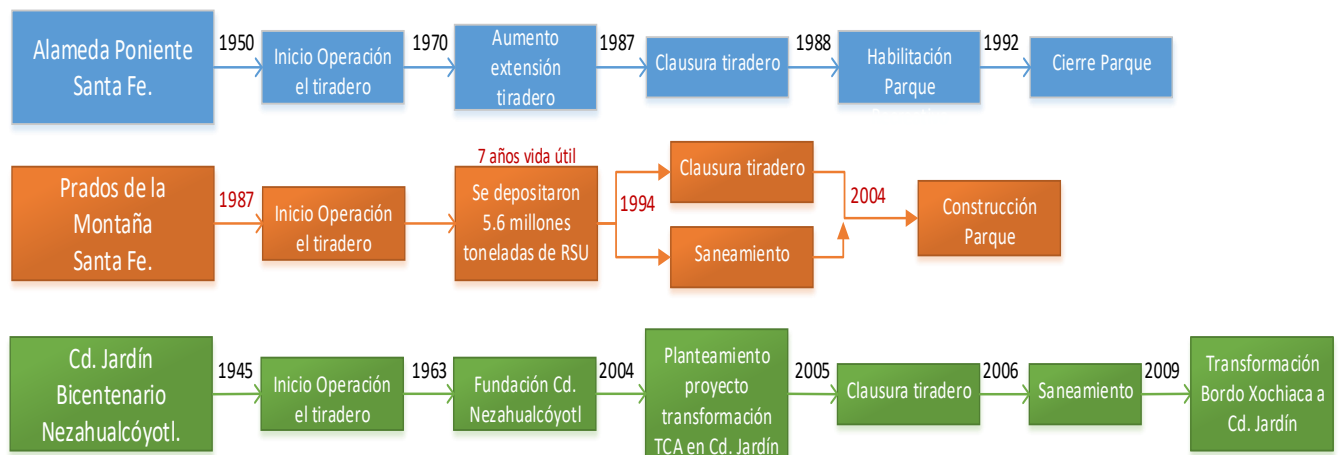
Ex Tiradero de Residuos Sólidos Clausurado y Saneado

Fig. 6. Ex Tiradero Bordo Xochiaca antes y después de ser saneado

De los ex tiraderos más importantes y saneados en la ciudad de México, se tienen:

- Alameda Poniente,
- Prados de la Montaña y,
- Ciudad Jardín Bicentenario

La Figura 7, indica la línea de tiempo de los 3 principales ex tiraderos.



**Fig. 7. Línea del tiempo de los ex-Tiraderos a Cielo Abierto: Alameda Poniente, Prados de la Montaña y Ciudad Jardín Bicentenario.**

#### 4.4 Lixiviados

En la operación de todos los sitios de disposición final como RS, RC y TCA se generan, principalmente, dos tipos de emisiones: gaseosas y líquidas. Las primeras, denominadas en conjunto biogás, están compuestas principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), en tanto que las segundas son líquidos llamados lixiviados que provienen de desechos heterogéneos en composición y arrastran concentraciones elevadas de todo tipo de contaminantes orgánicos e inorgánicos y una gran variedad de microorganismos existentes en la biomasa de los residuos sólidos, por lo que se considera que son de los residuos más complejos y difíciles de tratar (Luna *et al.*, 2007; Gray *et al.*, 2005). Alia *et al.*, (1991) mencionaron que los lixiviados son originados por el lavado de los residuos sólidos que contienen una gran cantidad de contaminantes, pudiendo ser elevado el total de sólidos disueltos al igual que la DQO y DBO<sub>5</sub>. Ritzkowski *et al.*, (2006) y Bilgili *et al.*, (2007) mencionaron que el lixiviado en sitios de disposición final es una de las fuentes más dañinas de contaminación en el medio ambiente circundante, debido a su compleja mezcla de contaminantes, alta demanda química de oxígeno (DQO) y alto contenido de nitrógeno amoniacal. (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N), siendo un riesgo para el suelo, el agua y la calidad del aire (Prantl *et al.*, 2006). Actualmente, existen muchos métodos de tratamiento para la descontaminación de

lixiviados, incluyendo métodos biológicos, físicos y químicos, tratamientos de la tierra, y varias combinaciones de los mismos (Han, Z. Y., *et. al.*, 2011)

Para describir la generación de los lixiviados en un relleno sanitario deben de considerarse los periodos de descomposición de los residuos en función del tiempo, desarrollándose cinco fases que se describen a continuación (Alcántar-Negrete, 2015).

- Fase I. Es la fase inicial, que incluye los primeros días donde son depositados los RSU presentándose condiciones aerobias.
- Fase II. Comienza el descenso de oxígeno y comienzan a darse las condiciones anaerobias de degradación. El pH de los lixiviados comienza a decrecer debido a la presencia de ácidos orgánicos y dióxido de carbono.
- Fase III. Se le conoce como la fase ácida donde se incrementa la actividad bacteriana que se inicia en la fase II, presentándose la hidrólisis de compuestos de alto peso molecular, lípidos, polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos seguido por la acidogénesis donde se presenta la conversión microbiana de las moléculas generadas en la hidrólisis en compuestos intermedios de bajo peso molecular: ácido acético, ácido fúlvico. El dióxido de carbono es el principal componente obtenido en esta fase, por lo que los lixiviados generados tiene un pH de 5 o menor. Aquí los valores de la DBO<sub>5</sub> y DQO se incrementan considerablemente debido a la disolución de los ácidos orgánicos presentes, además se favorece la solubilidad de los metales presentes.
- Fase IV. Etapa metanogénica donde se presentan reacciones de formación de metano, disminuyendo de manera simultánea la acidez, por lo que los lixiviados generados presentan pH entre 6.8 a 8.0 reduciéndose las concentraciones de la DQO, DBO<sub>5</sub> y conductividad presente.
- Fase V. Etapa de Oxidación o mejor conocida como etapa de maduración, se presenta después que la materia orgánica se ha convertido en metano y dióxido de carbono. En caso de presencia excesiva de humedad y de sustratos de degradación lenta, se

disminuye la formación de biogás, transformándose los lixiviados formados a ácidos húmicos y fúlvicos.

#### 4.5 Clasificación de los Lixiviados

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a criterios que diversos autores han realizado. Foo *et al.*, (2009) concluyeron que los lixiviados pueden ser clasificados según su edad, de acuerdo a la carga orgánica y la cantidad de contaminantes, las características se pueden ver en la Tabla 2. Johannesen, 1999 clasificó a los lixiviados en dos etapas principales: etapa ácida y etapa metanogénica, ver Tabla 3, aunque de acuerdo a diversas investigaciones que se han hecho en el área de tratamiento de lixiviados, la clasificación que tiene más uso es la que fue establecida por Bhalla *et al.*, 2012.

**Tabla 2. Clasificación de los lixiviados**

Característica	Jóvenes	Intermedios	Maduros/Estabilizados
Edad (años)	< 5	5 – 10	> 10
DBO/DQO	0.5 – 1.0	0.1 – 0.5	< 0.1

Fuente: Foo *et al.*, (2009)

**Tabla 3. Composición de un lixiviado**

Parámetro	Joven	Intermedio	Maduro
Edad (años)	<5	5 – 10	>10
pH	6.5	6.5 – 7.5	>7.5
DQO (mg/L)	>10,000	4,000 – 10,000	<4,000
DBO (mg/L)	>0.3	0.1 – 0.3	<0.1
Compuestos orgánicos	80% ácidos grasos volátiles	5-3% ácidos grasos volátiles más ácidos húmicos y fúlvicos	Ácidos húmicos y fúlvicos
Metales pesados	Bajo - Medio	Bajo	Bajo
Biodegradabilidad	Importante	Media	Baja

Fuente: Bhalla *et al.*, (2012)

#### **4.6 Sistemas de Tratamiento de Lixiviados.**

Los procesos químicos-físicos-biológicos integrados (en cualquier orden) mejoran las limitaciones de los procesos individuales y dan como resultado una mayor eficacia del tratamiento general (Renou *et al.*, 2008). En el tratamiento de los lixiviados, dentro de los tratamientos fisicoquímicos, destacan la coagulación y la oxidación química; además, de la adsorción con carbón activado, la precipitación química y los procesos con membrana (Amokrane *et al.*, 1997). En el tratamiento de lixiviados la coagulación se ha empleado como pretratamiento previo a los procesos biológicos o como etapa de pulimento para remover componentes orgánicos no biodegradables; o bien, bajo esquemas acoplados de procesos de oxidación avanzada (Orta *et al.*, 2006). Existen numerosas referencias de tratamientos fisicoquímicos de lixiviados que presentan los inconvenientes del costo de reactivos químicos y generación de lodos de difícil disposición (Marañón *et al.* 2008). Los lixiviados a los cuales se les aplica este tipo de tratamiento son en general viejos, en los cuales el índice de biodegradabilidad ( $DBO_5/DQO$ ) es bajo.

Los procesos de coagulación-floculación y flotación tienen como objetivo eliminar las partículas suspendidas de la fase líquida; a valores bajos de pH remueven las partículas de tamaño pequeño que le confieren color al lixiviado. Los procesos de adsorción y de oxidación Fenton intensiva pueden remover tanto partículas suspendidas como disueltas.

## 5. ANTECEDENTES

### 5.1 Investigaciones Relacionadas

Zhao *et al.*, 2007, realizaron un estudio que tuvo la finalidad de caracterizar los residuos de un relleno sanitario con más de 10 años de degradación, con el fin de evaluar si la fracción fina de estos residuos viejos son posibles de ser usados para procesos de biofiltración para el tratamiento de lixiviados. Li *et al.*, 2010 trabajaron en el tratamiento de lixiviados con una carga hidráulica de 14 L/m<sup>3</sup>-d realizando aspersiones 10 veces al día cada 30 minutos con remociones de 64% en DQO y 96 a 99% en DBO y 90% en color; otro estudio reportado por Xie *et al.*, 2010 donde se alcanzó una remoción del 80% en DQO y 90% en DBO con una carga hidráulica de 20 L/m<sup>3</sup>-d. Estos materiales estabilizados contienen un amplio espectro y gran cantidad de poblaciones microbianas, mismas que se han adaptado a lo largo de los años a altas concentraciones de contaminantes. Han, Z. Y., *et al.*, 2011 idearon un biofiltro semi-aerobico con desechos envejecidos (SAARB) donde el diámetro de tubería de recolección de lixiviados con la tubería de vías respiratorias se encuentra agrandadas y los extremos se conectan con el aire, conduciendo a una degradación completa, obteniendo eficiencias de remoción del 94% en términos de DQO. Bautista *et al.*, 2018 generaron información acerca del uso de biorreactores empacados con basura vieja, destacando la recirculación de los mismos en un sitio de disposición final. La eficiencia en la eliminación de contaminantes se debe principalmente a sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas (Zhao *et al.*, 2007), y ya se ha encontrado que el biofiltro es práctico y operativo en el tratamiento de lixiviados de vertederos en informes anteriores (Jiang *et al.*, 2007). La tabla 4 presenta una comparación de las técnicas de tratamientos alternativos.

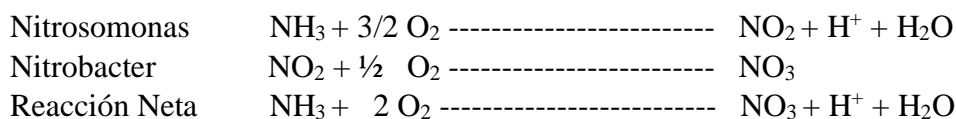
**Tabla 4. Comparación de las técnicas de tratamiento de lixiviados**

Tratamiento convencional	Tasa remoción DQO	Tasa remoción NH <sub>4</sub> -N	Tasa remoción NT	Rentabilidad
<b>Tratamiento Biológico</b>				
T. Aerobio	A	A	B	M
T. Anaerobio	A	B	B	B
T. Físico-químico	A	A	A	A
Procesos combinados	A	A	A	A
<b>Biofiltro con basura:</b>				
B. Aerobios con composta	A	A	A	M
B. aerobios con ladrillo triturado y composta	M	A	B	B
B. de basura estabilizado en torre	A	A	M	B
B. de basura envejecido anaerobio	A	B	B	B
B. con basura multietapas	A	A	M	M

A=Alto, M=Moderado, B=Bajo. Fuente: Han, Z. Y., *et al.* (2011)

En los biorreactores, además de degradación de la materia orgánica, se lleva a cabo el proceso de nitrificación. Este es un proceso biológico que se lleva a cabo en condiciones aerobias y utiliza microorganismos especializados (Nitrosomonas y Nitrobacter) para oxidar el amoníaco a nitrato. Este proceso involucra dos reacciones químicas que llevan a cabo microorganismos autótrofos (los cuales requieren de compuestos inorgánicos) diferentes en cada paso.

Las reacciones de nitrificación son:



## 5.2 Rumen

El rumen es un compartimento que se encuentra en la cavidad abdominal de un animal bovino, que contiene una diversidad de microorganismos encargados de convertir los complejos materiales vegetales en ácidos grasos volátiles (AGV), de bajo peso molecular, dióxido de carbono y metano. Estos microorganismos, se encuentra en un ambiente anaerobio estricto,

con un pH que oscila entre 5.5 y 6.5 a una temperatura entre 39 y 40°C. Las bacterias en el rumen varían entre 10<sup>8</sup> y 10<sup>11</sup> UFC/ml, su espectro se compone de numerosos géneros y especies, comprendidas entre bacterias anaerobias, arqueas, protozoos ciliados y hongos (Zhou *et al.*, 2015), de los cuales solo 5-15% han sido aislados; morfológicamente se pueden clasificar como: cocos, bacilos cortos, espiroquetas, bacilos flagelados. La población bacteriana del rumen puede subdividirse en cuatro subpoblaciones principales:

- Población asociada a líquidos, estas representan bacterias planctónicas o las que consumen alimento soluble.
- Población asociada a sólidos, estas bacterias son fundamentales en la digestión de la ingesta, representan el 75% de la comunidad bacteriana total del rumen.
- Población asociada al epitelio, representa el 1% de la comunidad bacteriana.
- Población asociada a eucariotas, representada por protozoos y hongos.

En 1998 Whitford *et al.*, 1998 realizó la descripción en la composición bacterioma del rumen a través de la identificación molecular; en su estudio reveló que existen 20 bacterias Gram-positivas y 6 bacterias Gram-negativas, formando una comunidad predominantemente que contiene: *Prevotella*, *Bacteroides* y *Clostridia*. Edwards *et al.*, 2004 aplicó el método basado en ADNr 16S para estudiar la comunidad bacteriana del rumen y reportó que el 54% eran bacterias Gram-positivas como grupo predominante, seguido de *Cytophaga*, *Flexibacter* y *Bacteroides* (40%).

Para este estudio se utiliza rumen de tipo sintético, es decir un estimulante de las funciones del rumen, con el objetivo de inocular un lixiviado y así poder acelerar el proceso de degradación, dentro del biofiltro.



### **5.3 Material Estabilizado (ME)**

Estudios recientes en el material estabilizado de un sitio de disposición final (Nájera-Aguilar *et al.*, 2018), han identificado 9 especies de microorganismos, la mayoría especializados en degradación y mineralización de compuestos orgánicos: *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa* que participan en el proceso de nitrificación; *Acinetobacter sp*, *Enterobacter sp*, *Bacillus thuringiensis*, *Desulfovibrio vulgaris*, *Lysinibacillus sphaericus*, *Lysinibacillus fusiformis*.

### **5.4 Propuesta de Tratamiento y aporte en la Investigación**

Una forma efectiva de poder eliminar contaminantes y nitrógeno amoniacal en un lixiviado, se realiza en un biofiltro Actualmente, los residuos bien descompuestos a través de los años, en un sitio de disposición final (residuos viejos) se utilizan comúnmente como medio de empaque de biorreactores/biofiltros para el tratamiento de lixiviados. Es por eso que se decide tomar un desecho estabilizado de más de diez años, en una celda de ex tiradero “*Ciudad Jardín Bicentenario*”, separando el desecho inorgánico y el resto separado en el laboratorio con una malla de (50 mm). Por otro lado, fabricar cuatro biofiltros hechos de columnas de plástico PVC, rellenas con este desecho estabilizado ya separado, colocados en una habitación controlada por termostato (35°C).

El medio como componente principal de un biofiltro, no sólo debe ser beneficioso para la eliminación de contaminantes, sino que también debe ser resistente a las obstrucciones y disponible a bajo costo (Xie, B., *et al.*, 2010). Este trabajo pretende fundamentar la recirculación de los lixiviados no solo para aportar la humedad que requiere la degradación de los residuos en condiciones anaerobias mesofílicas, sino para remover la carga orgánica

presente en los lixiviados, además mediante la adición de rumen sintético se pretende aportar material celular para incrementar las tasas de población bacteriana, posibilitando que los tiempos de estabilización se reduzcan (Rojas-Valencia *et al.*, 2012). Conocer las posibles especies bacterianas que son las responsables en la degradación del lixiviado.

## 6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

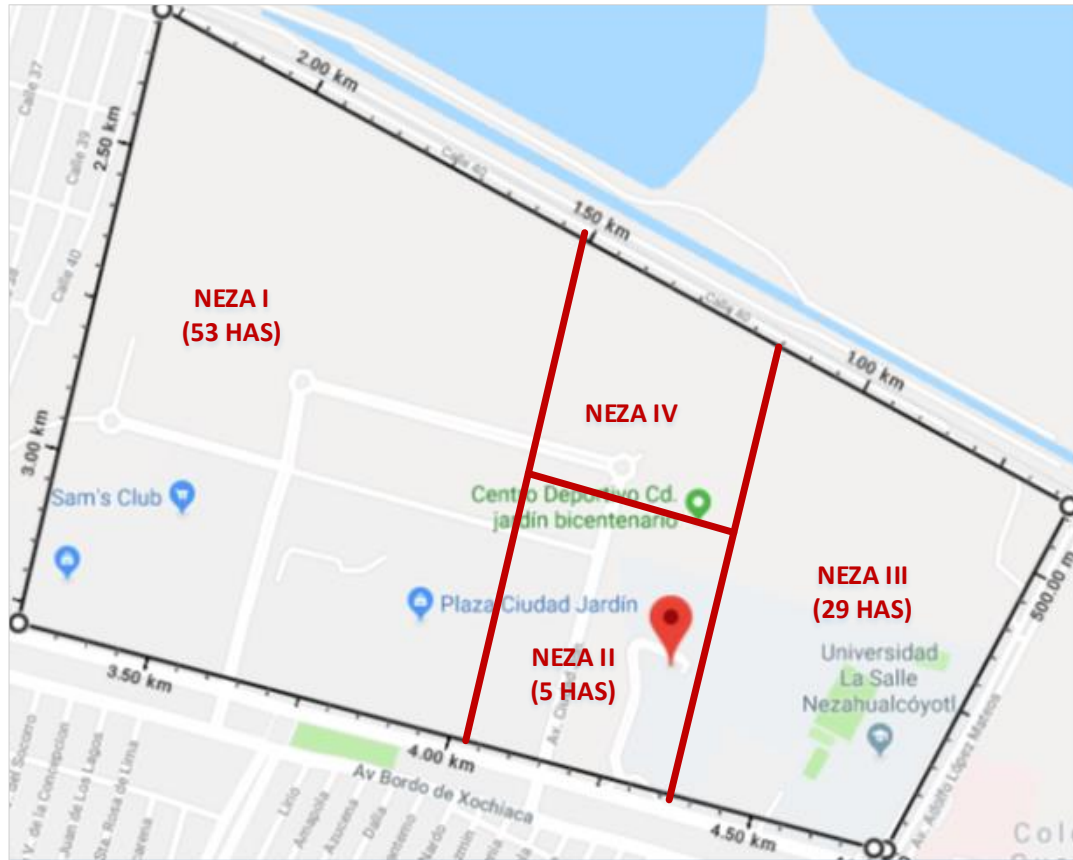
### 6.1 Descripción del área de estudio.

El ex tiradero *Ciudad Jardín Bicentenario*, se localiza en el municipio de Nezahualcóyotl situado en la región Oriente del estado de México, colinda al norte, con Ecatepec; al noroeste con la delegación Gustavo A. Madero de la ciudad de México; noreste con el municipio de Texcoco; al sur con las delegaciones Iztacalco e Iztapalapa; al este con los municipios de La Paz y Chimalhuacán, es el municipio 120 del estado de México y cuenta con una población de 1,039,867 habitantes (INEGI, 2015). El área de estudio, antes fue ocupada por las aguas del lago de Texcoco y después por colonias populares irregulares.

En 1945 como parte de una estrategia de contención de las aguas del lago, se construye el Bordo de Xochiaca (lengua náhuatl significa *lugar de las flores en el lago*), esta obra contribuyó de manera relevante para la formación de colonias populares del ex lago de Texcoco, que no contaban con los servicios públicos por ser de origen irregular y mientras llegaban los servicios, iniciaron el depósito de desechos en esta zona periférica, con lo cual inicia la historia del *Bordo de Xochiaca* como un tiradero clandestino a cielo abierto, consolidándose en 1975 con la llegada de maquinaria destinada a operar el tiradero y que durante décadas se llegó a recibir alrededor de 12,000 mil toneladas diarias de desechos/residuos sólidos urbanos prácticamente sin ningún tipo de control, la mayoría de estos desechos provenientes de la ciudad de México y algunos municipios aledaños del estado de México (Piña *et al.*, 2009; Rosas-Barrera, 2013).

De 1986 a 1991, la superficie creció a 80 hectáreas sumando 600 mil toneladas de desechos; siendo que de 1992 a 1994 ya se contaba con 105 hectáreas y 5 millones 819 toneladas de

desechos y para principios del 2007 ya eran 420 hectáreas y almacenando 30 millones de toneladas de desperdicios (Piña *et al.*, 2009). Con el paso del tiempo las expectativas de este tiradero cambiaron de manera inesperada, su vida útil había terminado e imposibilitados de seguir postergando un cierre. Para el año 2005, se anuncia el cierre definitivo de una parte de ese tiradero (Región Neza I, Fig. No. 8), fue entonces que surgió un proyecto de la iniciativa privada donde se propuso rescatar, reciclar e integrar el sitio a la dinámica urbana del municipio. Se construye un enorme complejo comercial, deportivo y ecológico de un rescate de área contaminada de 110 hectáreas, que llevaría el nombre de Plaza Ciudad Jardín Bicentenario en honor al segundo centenario de la independencia de México. Para lograr esta transformación, se utilizó tecnología para sanear el sitio y dotarlo de infraestructura y construir espacios que cumplan con funciones específicas como las lagunas de captación de agua de lluvia, sistema de manejo de lixiviados, sistema manejo de gas metano y otros residuos (Piña *et al.*, 2009).



**Fig. 8. Distribución de las regiones del ex Tiradero Ciudad Jardín Bicentenario**

La metodología experimental que desarrollará el presente trabajo se divide en seis etapas y se resume en el diagrama de flujo de la Figura 9.

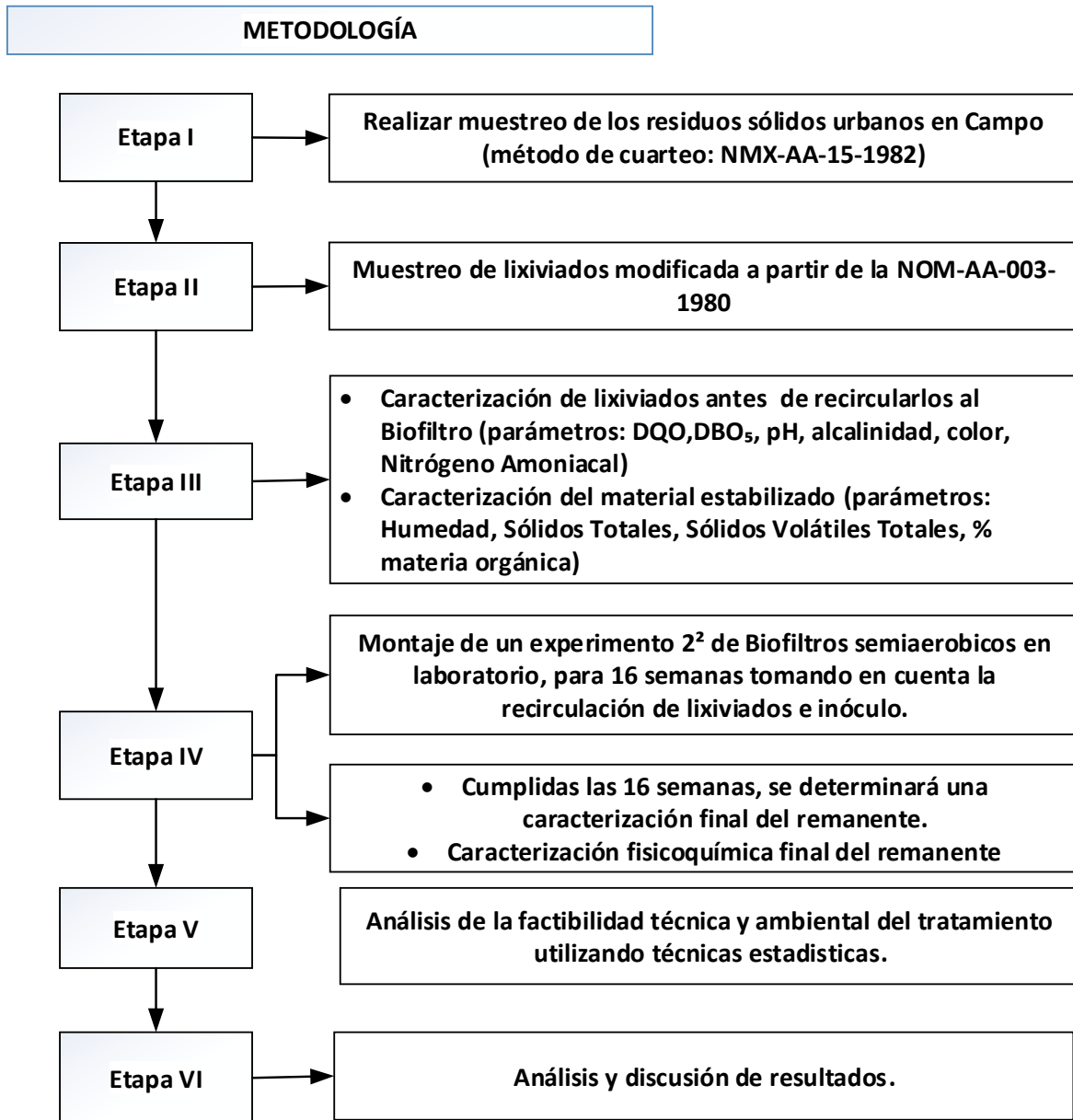


Fig. 9. Diagrama de la metodología experimental

## **6.2 Extracción y Caracterización del Material Estabilizado (ME)**

### **Etapa I**

La metodología empleada para acondicionar el punto para la toma de muestra dependió de las características del sitio clausurado (perforación en la cubierta de las celdas), tomando en cuenta el método de cuarteo modificado (NMX-AA-15-1982) se llevó la extracción del material estabilizado (ME) con edad de 9 años enterrados en el sitio. La muestra se tomó a una profundidad de 2 metros después de remover el material de cubierta final (Ver Figura 10). Se tomaron alrededor de 60 kg de muestra final, que se colocaron en costales sellados herméticamente y finalmente transportados a laboratorio. Del material extraído, una fracción fue caracterizada en base húmeda, determinando la composición de los materiales (plásticos, vidrio, tela, fierro, madera). El ME fue extendido sobre lona a la sombra y a temperatura ambiente durante 4 semanas, con el objeto de retirar la humedad suficiente. Durante ese periodo de secado, el ME fue caracterizado mediante la determinación del contenido de humedad y sólidos volátiles. Una vez seco, el material fue sometido a un análisis granulométrico, separando por tamaño de partícula mayor a 50 mm. Este material fue empleado como empaque para el biofiltro.

Para la caracterización del ME se utilizaron las técnicas analíticas siguiendo los métodos normalizados: Humedad, Sólidos Totales y Sólidos volátiles (APHA, 2012) y contenido de materia orgánica. Para la determinación del contenido de materia orgánica se empleó la norma española UNE-103204-93, donde especifica el método que determina el contenido de materia orgánica oxidable de un suelo mediante permanganato de potasio.



**Fig. 10. Muestreo del material estabilizado en Ciudad Jardín Bicentenario**

### **6.3 Muestreo de Lixiviados y su caracterización**

#### **Etapa II**

Se realizó la colecta de lixiviados del cárcamo principal tomando como base la Norma Oficial Mexicana vigente para aguas residuales **NMX-AA-003-1980**, acoplada a lixiviados. Se tomaron las recomendaciones de preservación de la muestra a 4 °C, así como el uso de recipientes de polietileno, Ver Fig. 11.



**Fig. 11. Muestreo de Lixiviados generados en Ciudad Jardín Bicentenario**



### Etapa III

Las muestras de lixiviados fueron caracterizadas con los siguientes parámetros: pH, DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno), Alcalinidad, Color, Nitrógeno Amoniacal (APHA, 2012). En la Tabla 5 se muestran los parámetros analíticos que se emplearán en el presente trabajo, así como su principio de aplicación.

**Tabla 5. Parámetros para la caracterización de lixiviados**

Parámetro	Norma o método de referencia	Principio de aplicación
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011	Método electrométrico basado en la medición de la fuerza electromotriz de una celda electroquímica, que consta de la muestra, un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia (APHA, 2012).
DQO	NMX-AA-030-SCFI-2012	Reflujo cerrado en presencia de sulfato de mercurio (II) de una porción de prueba con una cantidad conocida de dicromato de potasio y catalizador de plata en ácido sulfúrico concentrado en un período fijo, calculando del valor de la DQO a partir de la cantidad de dicromato reducido (DOF, 2013).
DBO	NMX-AA-028-SCFI-2012	Prueba respirométrica que se realiza a 20°C en un ambiente controlado. El periodo de prueba puede ser de 5, 7 o 10 días. Se mide la cantidad de oxígeno consumido por bacterias que oxidan la materia orgánica en una muestra de agua. Esta prueba se utiliza para medir las cargas de los residuos (APHA, 2012).
Alcalinidad	NMX-AA-036-1980	Los iones hidróxilo presentes en una muestra como resultado de la disociación o hidrólisis de los solutos reaccionan con las adiciones de ácido estándar. La alcalinidad depende del pH de punto final utilizado.
Color	NMX-AA-017-1980	Medir la transmisión de la luz producida a través de una muestra, la cual se comparará con un testigo (iluminante patrón), generalmente agua destilada cuya transmitancia es de 100% (DOF, 1980).
Nitrógeno Amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2010	El nitrógeno orgánico y el amoniacal se midieron por el método Kjeldhal, el cual se aplica para la determinación del contenido de nitrógeno en sustancias orgánicas e inorgánicas. El método Kjeldhal cuantifica el nitrógeno en su estado de valencia trinegativo (APHA, 2012).

DQO: Demanda química de oxígeno; DBO: Demanda bioquímica de oxígeno.

Los equipos que se utilizarán en las determinaciones se mencionan en la Tabla 6

**Tabla 6. Equipos usados en la caracterización de lixiviados**

<b>Parámetro</b>	<b>Equipos</b>	<b>Características</b>
pH	Potenciómetro	Marca Oakton, modelo pH11.
DBO <sub>5</sub>	BOD TrakII	Marca Hach, modelo Trak II
DQO	Termoreactor	Marca Hach, modelo DRB200.
	Espectrofotómetro	Marca Hach, modelo DR1900.
Color	Espectrofotómetro	Marca Hach, modelo DR1900, RANGO DE 0 A 500 U Pt-Co.
Nitrógeno Amoniacal	Destilador Büchi	Marca Büchi, modelo K-350
	Cromatógrafo iónico	Marca DIONEX, modelo ICS-1500

DQO: Demanda química de oxígeno; DBO: Demanda bioquímica de oxígeno.

El procedimiento en las determinaciones fue el siguiente:

- **pH:** se calibró el equipo usando soluciones de calibración con valores de pH de 4.01, 7.00 y 10.00. Se enjuagó la sonda con agua desionizada y se secó con un trapo que no tuviera pelusa. Se colocó la sonda en la muestra agitando suavemente, de forma que las uniones de referencia estuvieran completamente sumergidas.
- **DQO:** se siguió la metodología establecido en el método 8000 Hach (HACH, 2000) usando 2 mL de muestra, con digestión por 2 horas a 150 °C (debido al alto valor de DQO se realizaron diluciones 1:10; 1:30). El espectrofotómetro se usó a 620 nm. Para la preparación del blanco se usó agua desionizada.
- **DBO<sub>5</sub>:** se siguió el procedimiento establecido en el manual del equipo (HACH, 2013a). Su usó el rango de medición de 0 a 700 mg/L
- **Color:** se siguió el método 8025 Hach (HACH, 2000), usando 10 mL de muestra en cada determinación (debido a las características de alto color de los lixiviados se realizó dilución de 1:10). El espectrofotómetro se usó a una longitud de onda de 455 nm. Como blanco se usó agua desionizada.

#### **6.4 Microorganismos en Material Estabilizado y Lixiviados**

De cada columna, se recogieron 50 mL de muestra líquida y cada muestra se colocó en un tubo de 9 mL con agua destilada, luego se agitó en vórtex durante 30 minutos y los números de células de las bacterias se determinaron por dilución en serie. Para las muestras de material estabilizado y lixiviado, el medio de cultivo de estas bacterias heterótrofas fue el agar Soya Trypticaseína, posteriormente se realizó la separación de cepas puras en otro medio selectivo y finalmente se realizó la tinción de Gram. Para la identificación de bacterias se tomará en cuenta las características físicas y apariencia morfológica, así como el conteo de las colonias presentes en el medio de cultivo.

#### **6.5 Construcción y operación de los Biofiltros**

##### **Etapas IV**

Para efectos de simulación lo más real posible de los fenómenos que ocurren en los sitios de disposición final, se seleccionó el siguiente sistema:

- Construcción de 4 Biofiltros hechos de columnas de plástico PVC, de diámetro de 15 cm con una altura de 65 cm, empacados con 3.0 kg de mezcla de ME previamente cribados (Fig. 12), los Biofiltros fueron colocados en una habitación sellada y controlada a 35 °C. Las condiciones específicas de trabajo de cada biofiltro será la siguiente:
  - BR1.- Reactor que trabaja sin inóculo y sin recirculación de lixiviados.
  - BR2.- Reactor que trabaja sin inóculo y con recirculación de sus lixiviados.
  - BR3.- Reactor que trabaja con inóculo y con recirculación de sus lixiviados.
  - BR4.- Reactor que trabaja con inóculo y sin recirculación de sus lixiviados.

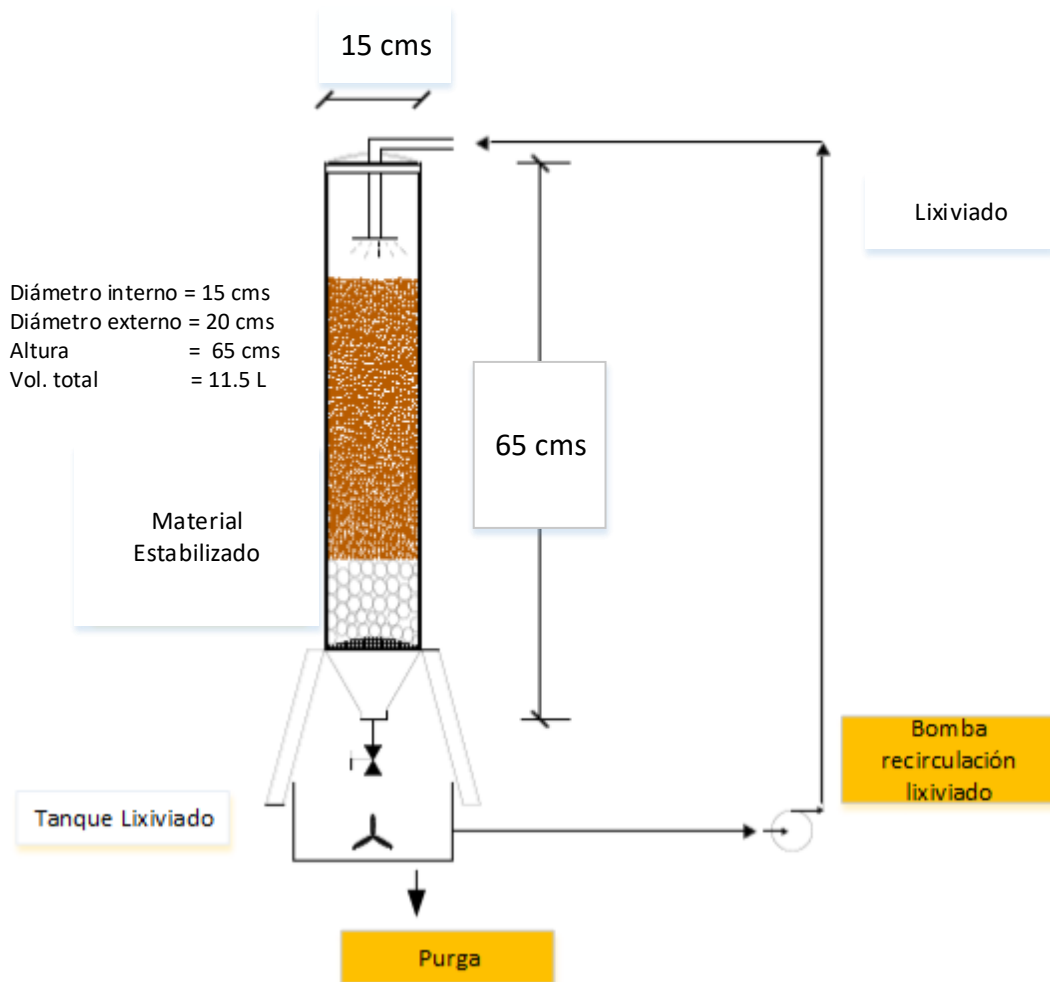


Fig. 12. Esquema de un biofiltro utilizado en el presente proyecto.

- Se empleará un inóculo o rumen sintético, que contendrá microorganismos esenciales para el proceso de digestión anaeróbica. La relación volumétrica lixiviado/inóculo será 5%, tomando en cuenta que relaciones mayores a 10% pueden desestabilizar procesos biológicos.
- Los Biofiltros serán operados en una etapa simple por 4 meses a temperatura de 35°C, con cargas hidráulicas de lixiviado de 16 L/m<sup>3</sup>-d. Se alimentarán en un tiempo al día con una duración de 15 minutos de recirculación de lixiviado, de acuerdo al volumen

correspondiente a la carga hidráulica evaluada. Se espera que la operación sea similar a la realizada en los rellenos sanitarios de RSU con recirculación de lixiviados producidos. Se hará una caracterización final del lixiviado remanente y se obtendrá la eficiencia del reactor mediante el % de Remoción de DQO y DBO<sub>5</sub>, según el siguiente parámetro.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{[C_i - C_f]}{C_i} * 100$$

*C<sub>i</sub>* = Concentración inicial

*C<sub>f</sub>* = Concentración final

En el laboratorio se realizará la caracterización de los lixiviados antes y después de recircularlos por el biofiltro.

## 6.6 Análisis estadístico

### Etapa V

Teniendo un diseño experimental 2<sup>2</sup>, con dos variables y dos factores en base a la siguiente matriz (Ver Tabla 7), se empleará en análisis de varianza estadístico ANOVA.

**Tabla 7. Matriz**

<b>Biorreactor</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>
<b>BR<sub>1</sub></b>	*	*
<b>BR<sub>2</sub></b>	*	+
<b>BR<sub>3</sub></b>	+	+
<b>BR<sub>4</sub></b>	+	*

Donde las variables son:

X<sub>1</sub>=Inóculo comercial/Rumen sintético

X<sub>2</sub>=Recirculación del lixiviado

Los factores son:

(\*) = Sin empleo de inóculo. Sin recirculación.

(+) = Uso de inóculo. Recirculación de lixiviado.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Caracterización del Material Estabilizado (ME)

El ME presentaba olor al ser extraído, posteriormente con el paso de los días, este dejó de ser percibido, lo que permite pensar que las fracciones orgánicas presentes ya han sido degradadas. La Tabla 8 muestra los resultados que se obtuvieron al realizar la separación e identificación de los subproductos del ME, lo que se observa que parte del residuo orgánico ya se encuentra degradado por el tiempo, aunque existe una fracción fina que puede ser aprovechada (mostrada en la Tabla 9), por otro lado, se determinó usar la fracción aprovechable con un tamaño de partícula hasta de 50  $\mu$ m, obteniendo que 76% de material tuvo un tamaño de partícula  $\leq 50$   $\mu$ m.

**Tabla. 8. Composición y distribución de tamaño de partícula en material estabilizado**

Subproducto	Plástico	Vidrio	Metal	Trapo	Fracción Fina	Otros	Total
Porcentaje (%)	9	2	1	2	76	10	100

**Tabla. 9. Porcentaje de Materia Orgánica en Material Estabilizado**

Prueba	Muestra (g)	Ci (mL)	f	M.O. (%)
M <sub>1</sub>	0.25	6.0	1.2255	3.035
M <sub>2</sub>	0.2522	7.0	1.2255	3.510
				3.273

Ci= Mililitros de solución de permanganato de potasio

f=Factor de normalidad del permanganato de potasio

M.O.=Materia orgánica

Por otro lado, en la Fig.13 se muestra el contenido inicial de humedad de los ME siendo del 24%, ya que estos materiales estuvieron en contacto con agua de lluvia y los lixiviados que fueron recirculados sobre el área clausurada, pasado las 4 semanas de secado a temperatura ambiente este contenido de humedad alcanzó el 12%. La cantidad de sólidos totales que

presentó el ME a lo largo de las 4 semanas fue de 964,000 a 953,000 mg/L, lo que representa un 90% de concentración, manteniéndose durante las cuatro semanas constante, en el caso de los sólidos volátiles totales estos tuvieron una concentración inicial de 169,000 mg/L y con las cuatro semanas de secado su concentración disminuyó a 36,000 mg/L, en términos de porcentaje indica que del 20% disminuyó al 5%.

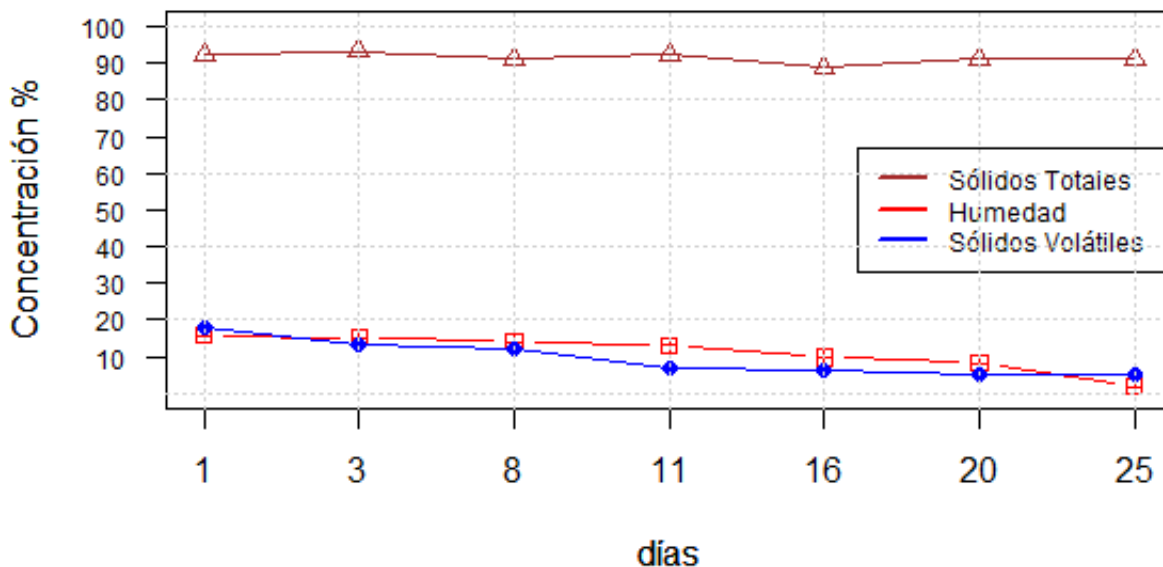


Fig. 13. Caracterización del Material Estabilizado muestreado

## 7.2 Caracterización de los Lixiviados

En la Tabla 10, se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de dos lixiviados que se extrajeron del sitio de disposición final clausurado. Los resultados muestran un pH superior a las 7 unidades y un índice de biodegradabilidad de 0.1, lo que indica que el



lixiviado no es joven, sino de tipo maduro según Foo *et al.*, 2009, además se puede observar presencia importante de sales inorgánicas, y nitrógeno amoniacal.

**Tabla. 10. Caracterización de Lixiviado de Ciudad Jardín Bicentenario**

Parámetro	Unidades	Resultado
pH		9.08 -9.16
Alcalinidad	mg/L	7,490
Color	( U Pt-Co)	3750-4010
DQO	mg/L	1625-2900
DBO <sub>5</sub>	mg/L	291 - 526
IB (DBO <sub>5</sub> /DQO)		0.1
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	206.6 - 429.7
Cl <sup>-</sup>	mg/L	70.85
Na <sup>+</sup>	mg/L	54.96
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	1.07

**IB:** Índice de biodegradabilidad. **UTN:** Unidades nefelométricas de turbidez. **UPt-Co:** Unidades de color platino-Cobalto

### 7.3 Microorganismos en Material Estabilizado y Lixiviados

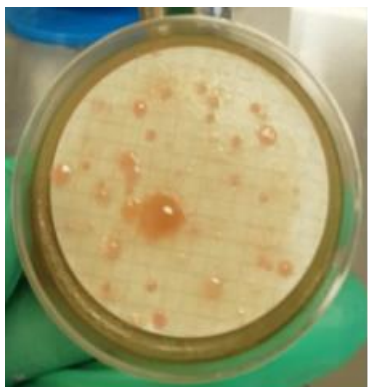
#### 7.3.1 Bacterias en Material Estabilizado y Lixiviados

Se hicieron pruebas de siembra con lixiviado crudo, lixiviado inoculado y lixiviado a la salida de cada biofiltro, como se mencionó anteriormente estos fueron sembrados en medios nutritivos (Agar nutritivo) y posteriormente en medios selectivos (Agar Sangre y Agar Mac Conkey), En la Tabla 11., se muestran resultados morfológicos de las bacterias en el lixiviado. La Fig. 14 se puede observar los resultados que se obtuvieron con los diferentes medios; de acuerdo a la literatura puede haber presencia de los siguientes géneros: *Alcaligenes faecalis*, *Burkholderia cepacia*, *Clostridium perfringens*, *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas aeruginosa*.

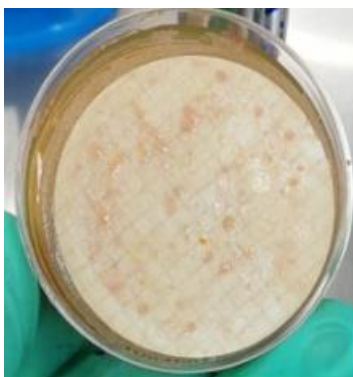
**Tabla. 11. Caracterización de las bacterias aisladas**

Morfología de colonias	<i>Pseudomonas putida</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas stutzeri</i>
Elevación	convexa	convexa	crateriforme

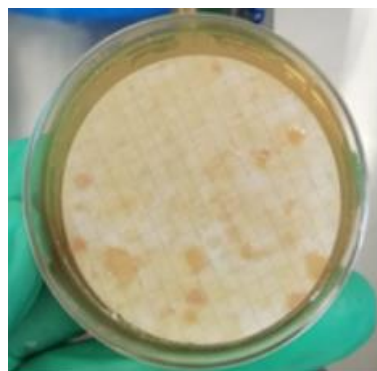
<b>Margen</b>	<b>entero</b>	<b>ondulado</b>	<b>rizado</b>
<b>Forma</b>	<b>circular</b>	<b>circular</b>	<b>rizoide</b>
<b>Temperatura</b>	<b>35 °C</b>	<b>35 °C</b>	<b>35 °C</b>
<b>Gram negativo</b>	<b>Gram negativo</b>	<b>Gram negativo</b>	<b>Gram negativo</b>
<b>Características</b>	<b>Bacilos cortos</b>	<b>Bacilos cortos</b>	<b>Bacilos cortos</b>



Lixiviado-rumen

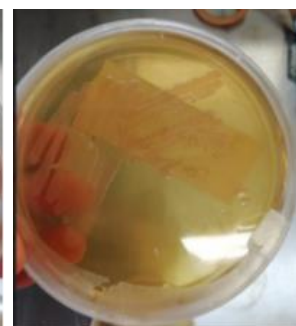


Lixiviado crudo

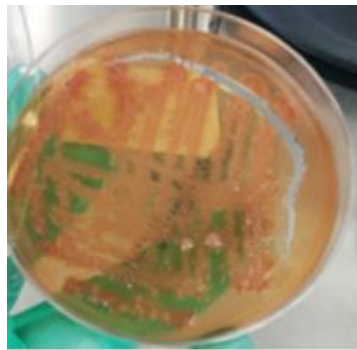


Lixiviado salida Biofiltro

**AGAR NUTRITIVO (TRIPCASÉINA)**



**LIXIVIADO SALIDA DEL BIOFILTRO**



Lixiviado-rumen



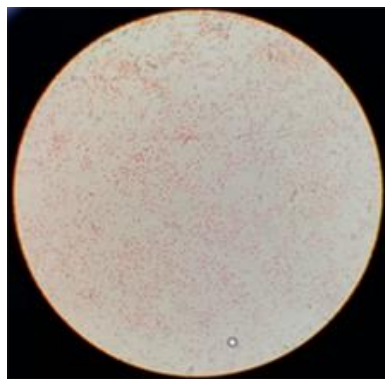
Lixiviado crudo



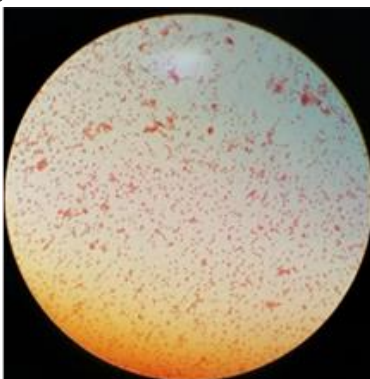
Lixiviado salida biofiltro

### AGAR McCONKEY

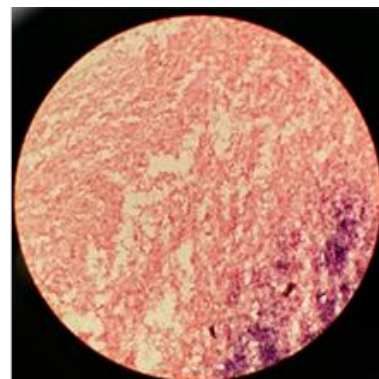
Fig. 14. Presencia de bacterias en medios nutritivos



Lixiviado-rumen

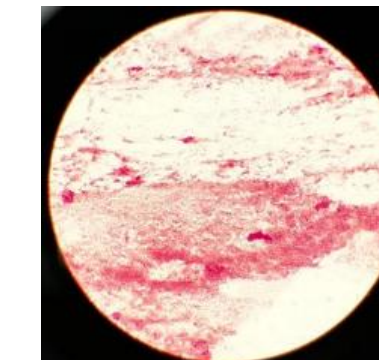
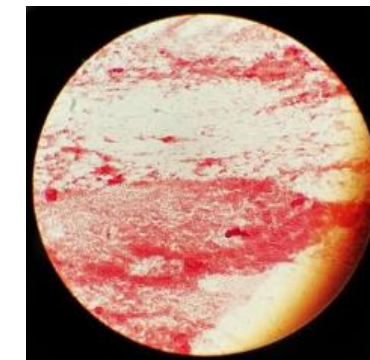
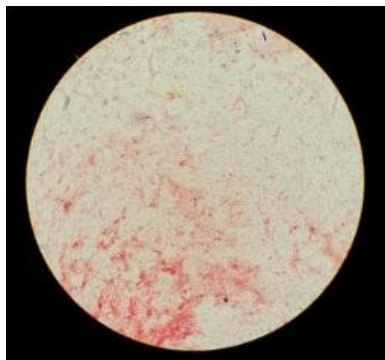


Lixiviado crudo



Lixiviado salida biofiltro

### AGAR MACCONKEY



### SALIDA DEL BIOFILTRO

Fig. 15. Tinción de Gram en Medios Selectivos

Se llevó a cabo un análisis de reacción en cadena de la polimerasa, mejor conocida como PCR en la muestra de uno de los biofiltros de salida, no sin mencionar que para llevar a cabo este análisis, se debe hacer realizar otro llamado electroforesis que nos permitirá ver la integridad y calidad del ADN de la muestra, como se puede apreciar en la figura 17, como se puede

apreciar en la figura 16 nos habla de la concentración que la muestra tiene de un 25.08  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ , lo que indica que se tiene una buena cantidad para poder continuar con el análisis de PCR.

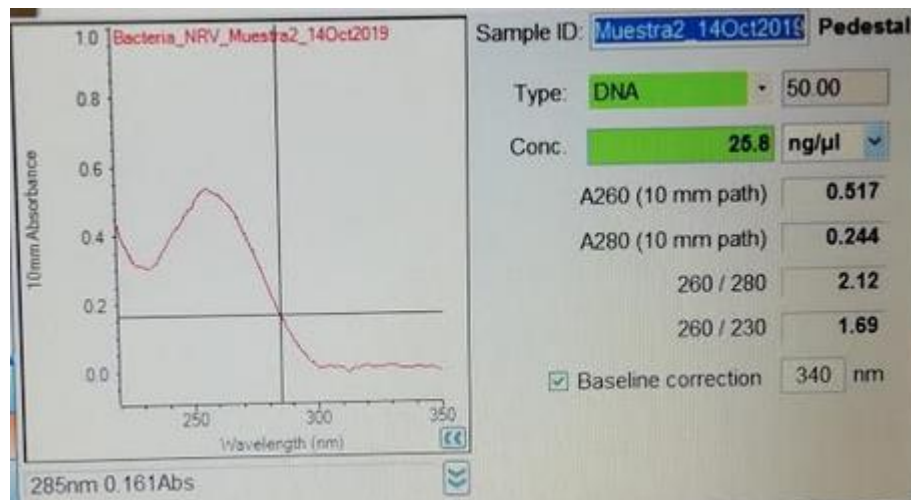


Fig. 16. Absorbancia de muestra de salida de biofiltro 3



Fig. 17. Electroforesis de muestra de salida de biofiltro 3

## 7.4 Biofiltros

Como se puede apreciar en las gráficas de la Figura 18, en la alimentación del BR-3 y BR-4 se encuentran presentando picos inestables debido a la adición de inóculo comercial al lixiviado; en tanto la alimentación de BR-1 y BR-2 no son tan notorios los cambios en la concentración debido a que no hubo adición de inóculo, pero presentando la recirculación del mismo en BR-2. En la Tabla 11, se encuentran las concentraciones de entrada en términos de DQO en los cuatro biofiltros, teniendo las concentraciones más altas en los dos últimos biofiltros.

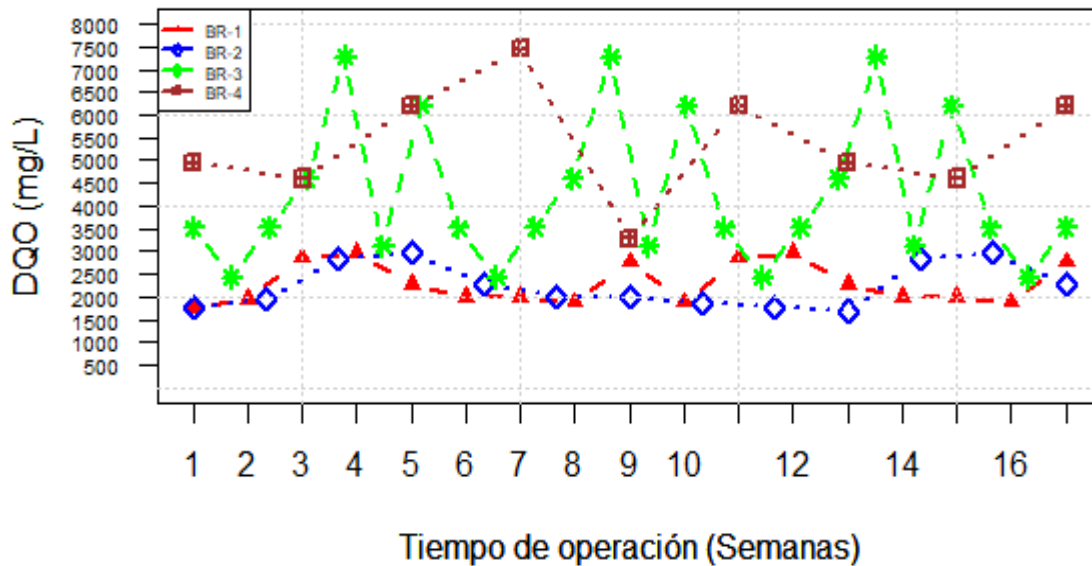


Fig. 18. Comportamiento en la entrada de DQO de los cuatro Biofiltros

A diferencia de los materiales de soporte utilizados en el goteo en filtros, como trozos de rocas trituradas, escoria o rellenos de plástico, estos biofiltros adoptaron residuos viejos, generando una cantidad insignificante de lodo, propiciando que los contaminantes orgánicos que se

encontraban en el lixiviado fueran absorbidos por primera vez por el material estabilizado en el biofiltro, actuando como portador de microorganismos, para conducir a la autodegradación de lodos dentro de la cama (Li Hongjiang *et al.*, 2009)

Tabla. 12. Resultados de la DQO en la entrada de los Biofiltros

Parámetro	Unidades	Rango de Concentración			
		BR1	BR2	BR3	BR4
DQO	mg/L	1760 - 2970	1760 - 2848	2430 - 7280	3280 - 6195
Promedio ± DE	mg/L	2292 ± 452	2244 ± 494	4383 ± 1614	2237 ± 313

DE=Desviación estándar

Al analizar los resultados de la concentración de salida de DQO de la Figura 19, las primeras horas de la distribución de los lixiviados el flujo provocó que estos se descargarán más rápido y que no pudieron ser degradados completamente por los microorganismos, por tanto, la concentración de contaminantes del influente inicial aumentó, pero pasadas 12 horas, la tasa de eliminación se volvió estable y eficiente.

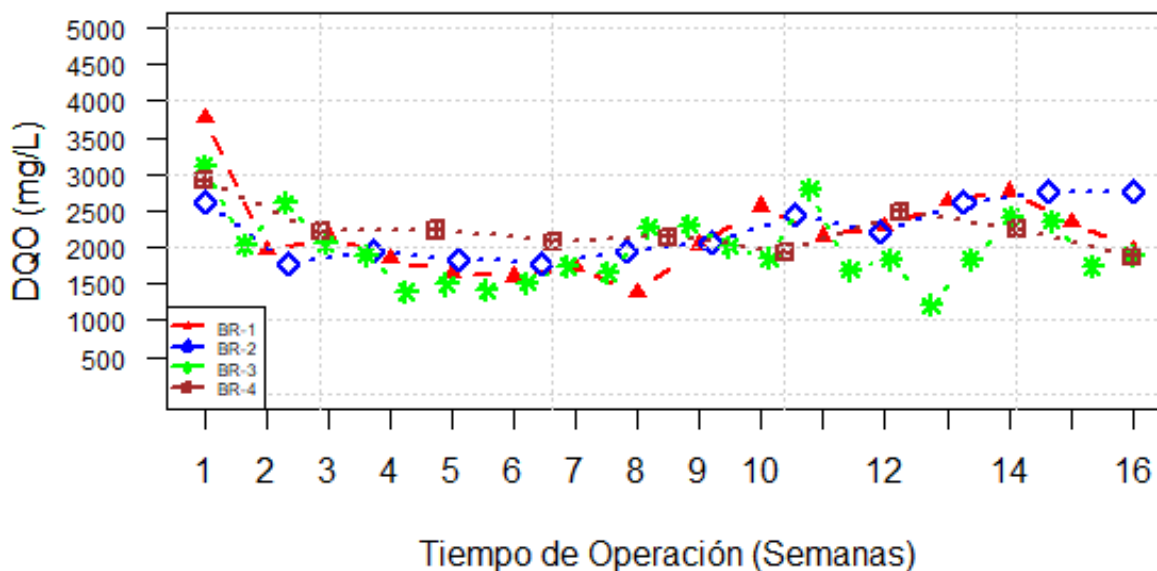


Fig. 19. Comportamiento de DQO, en la salida de los cuatro Biofiltros

De los cuatro biofiltros operados los resultados que aparecen en la Tabla 13, el BR-3 fue el que obtuvo mejores concentraciones en términos de eliminación de DQO con rango entre 1206 a 3120 mg/L, presentando eficiencias de remoción de DQO alrededor de 76% – 83%. Las condiciones bajo las que este biofiltro operó fue con recirculación e introducción de un inóculo comercial, esto es debido a que con la recirculación se está agregando una carga orgánica adicional con respecto a los que no tienen recirculación. El BR-4 presentó concentraciones de eliminación de DQO de 1880 – 2917 mg/L y sus eficiencias alcanzaron el 41% - 72%, sin embargo, presentó concentraciones altas de nitrógeno amoniacal, debido a que en sus condiciones de operación no presenta recirculación, sólo introducción de inóculo comercial. (Ver. Figura. 20, Figura 21.)

**Tabla 13. Resultados de la DQO a la salida de los biofiltros y Porcentaje de remoción**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Rango de Concentración</b>			
		<b>BR1</b>	<b>BR2</b>	<b>BR3</b>	<b>BR4</b>
<b>DQO</b>	mg/L	1380-3765	1780 - 2757	1206 - 3120	1880 - 2917
<b>Promedio ± DE</b>	mg/L	2259 ± 659	2399 ± 721	1958 ± 497	2237 ± 313
<b>Porcentaje</b>	%	24 - 38	22 - 38	76 - 83	41 – 72

DE=Desviación estándar

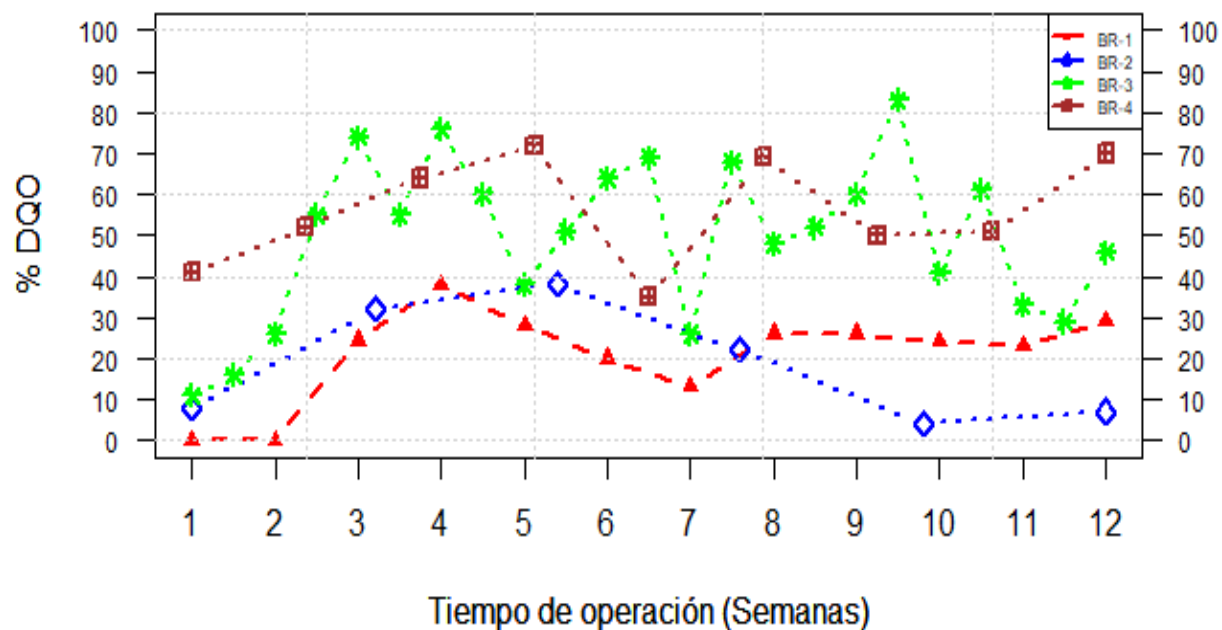


Fig. 20. Porcentaje de Remoción de DQO, de los cuatro biofiltros

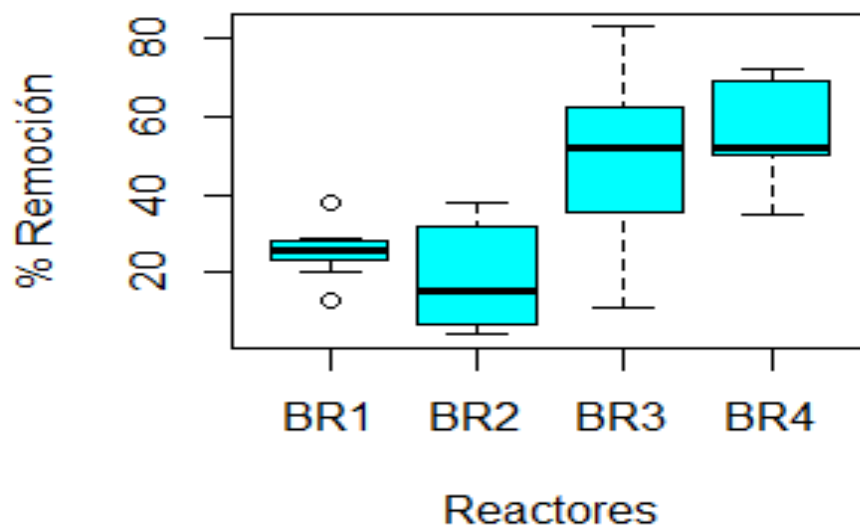


Fig. 21. Comportamiento en la Eliminación de DQO, de los cuatro biofiltros



De acuerdo a la Tabla 14, las concentraciones iniciales de DBO<sub>5</sub> en los biofiltros fluctuaron entre 291 – 526 mg/L, mientras que las concentraciones finales se concentraron en 113 – 255 mg/L, teniendo el BR-3 con la mejor tasa de eliminación entre 57% y 87%, lo que indica que parte de contenido orgánico en el lixiviado fueron removidos (ver Figura 22 y Figura 23).

Tabla 14. Resultados de DBO<sub>5</sub> en entrada y salida de biofiltros

Parámetro	Unidades	BR1	BR2	BR3	BR4
DBO <sub>5</sub> entrada ± DE	mg/L	291 ± 133	291 ± 133	498 ± 151	526 ± 143
DBO <sub>5</sub> salida ± DE	mg/L	113 ± 71	142 ± 66	143 ± 88	255 ± 104
Porcentaje	%	58 - 68	55 - 77	57 - 87	61 - 79

DE=Desviación estándar

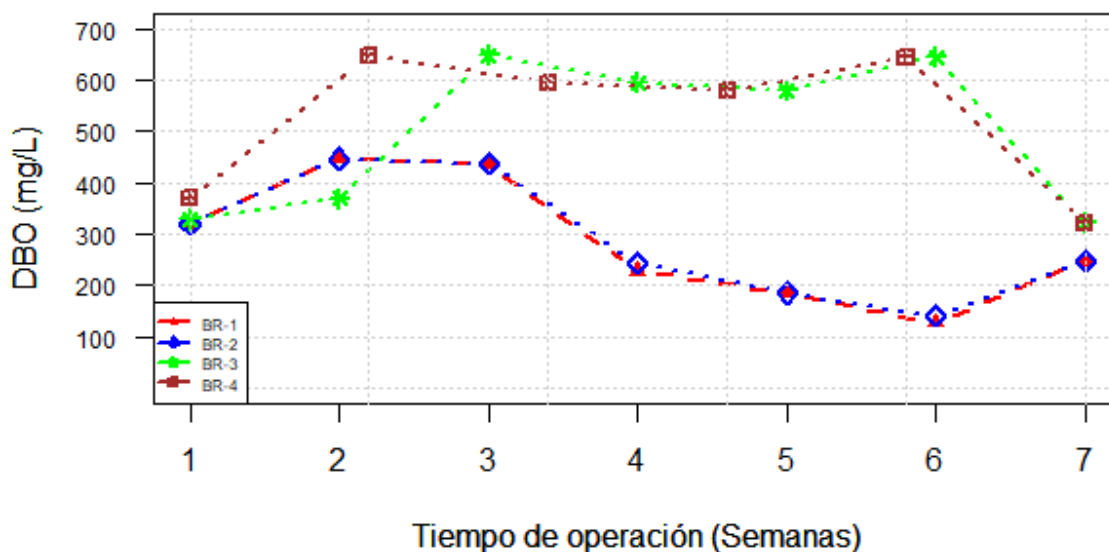


Fig. 22. Comportamiento en la entrada de DBO<sub>5</sub> de los cuatro Biofiltros

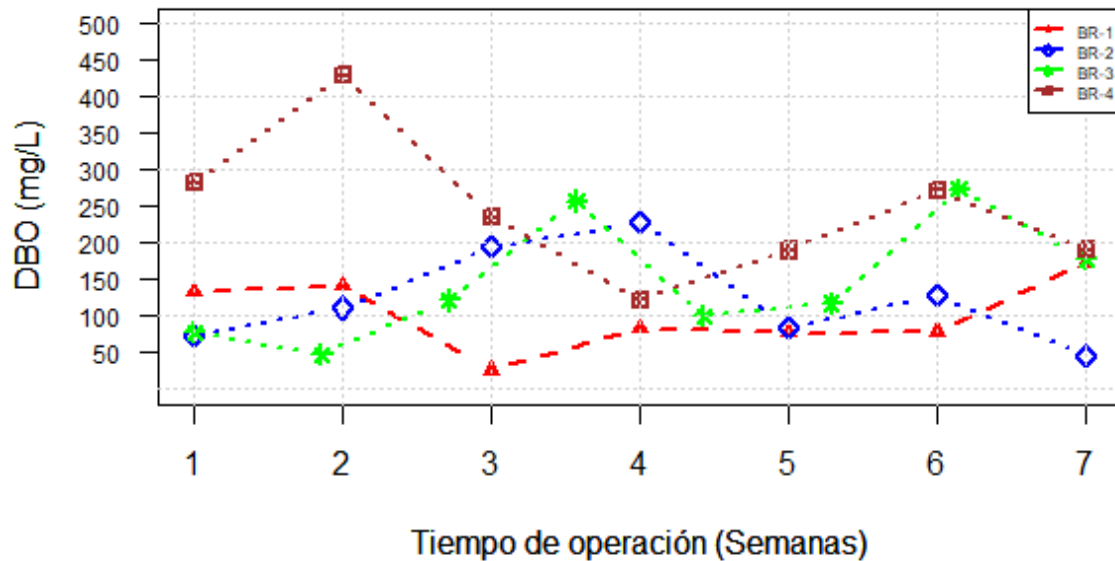


Fig. 23. Comportamiento de DBO<sub>5</sub>, en la salida de los cuatro Biofiltros

Todos los biofiltros se operaron a temperatura constante de 35°C, Berge et al., 2007 declararon que la temperatura es un factor significativo para la eliminación del nitrógeno amoniacal. La concentración inicial de amoniaco en el lixiviado fluctuó entre 206.64 a 429.7 mg/L. La Tabla. 15 y la Figura. 24, muestra que el BR-1 y el BR-2 obtuvieron eficiencias de eliminación de nitrógeno amoniacal entre 95%, mostrando una fuerte capacidad de nitrificación en el biofiltro, ayudada por la temperatura en la que operaron los biofiltros, mientras que el BR-3 y BR-4 las eficiencias de eliminación se presentan entre el 70% y el 88%. La nitrificación implica convertir amonio en nitrato en condiciones aeróbicas, mientras que la desnitrificación implica convertir nitrato en nitrógeno (N<sub>2</sub>) utilizando compuestos orgánicos fácilmente biodegradables como aceptor de electrones en condiciones anóxicas o anaeróbicas (Zi Jun Hong et al., 2017).

Tabla 15. Resultados de N-NH<sub>4</sub> en la salida de los Biofiltros

Parámetro	Unidades	Rango de Concentración			
		BR1	BR2	BR3	BR4
N-NH <sub>4</sub>	mg/L	2.52 - 65.54	2.37 - 57.44	2.37 - 109.75	15 - 206.64
Promedio ± DE	mg/L	22 ± 26	20 ± 23	53.34 ± 34	129.24 ± 121
Porcentaje	%	94	95	88	70

DE=Desviación estándar

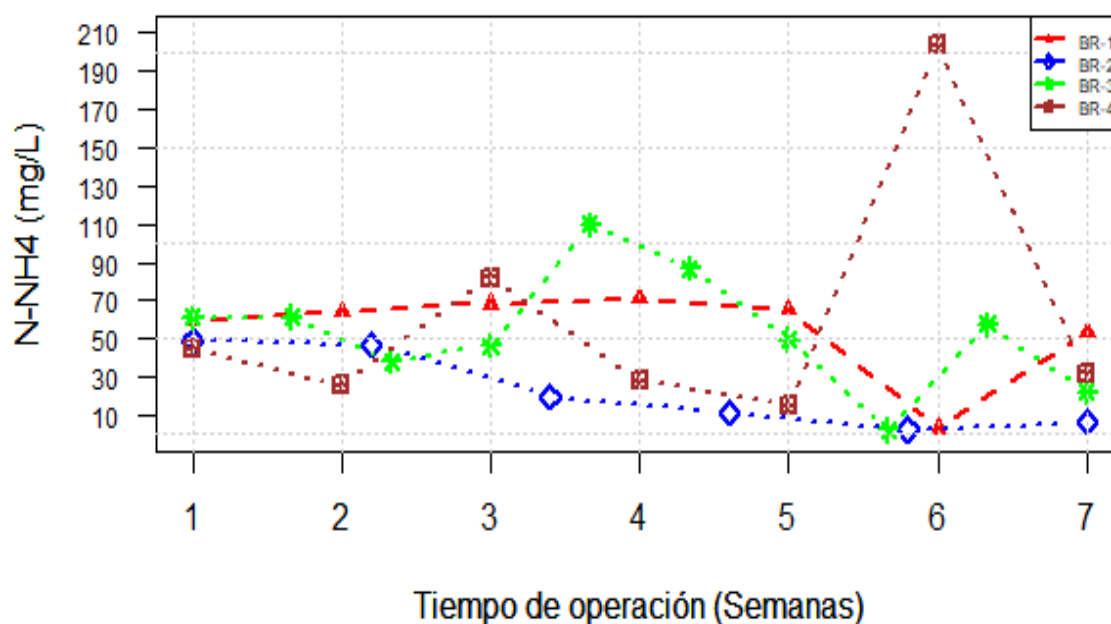


Fig. 24. Comportamiento de N-NH<sub>4</sub>, en la salida de los cuatro biofiltros

Los valores de alcalinidad total se encuentran significativamente altos, debido a la descomposición bioquímica de acuerdo a la Figura 25. La concentración inicial de lixiviado en términos de alcalinidad es de 7490 mg/L; los valores de los de BR1 fue de 6296 mg/L, BR-2 fue de 6300 mg/L, BR-3 fue de 5847 mg/L y para BR-4 correspondió a 6570 mg/L.

Los valores que se obtuvieron de pH fueron superiores al 8.0, donde se atribuyen a la alcalinidad producida por la concentración del nitrógeno amoniacal, lo que le concede una capacidad buffer al lixiviado.

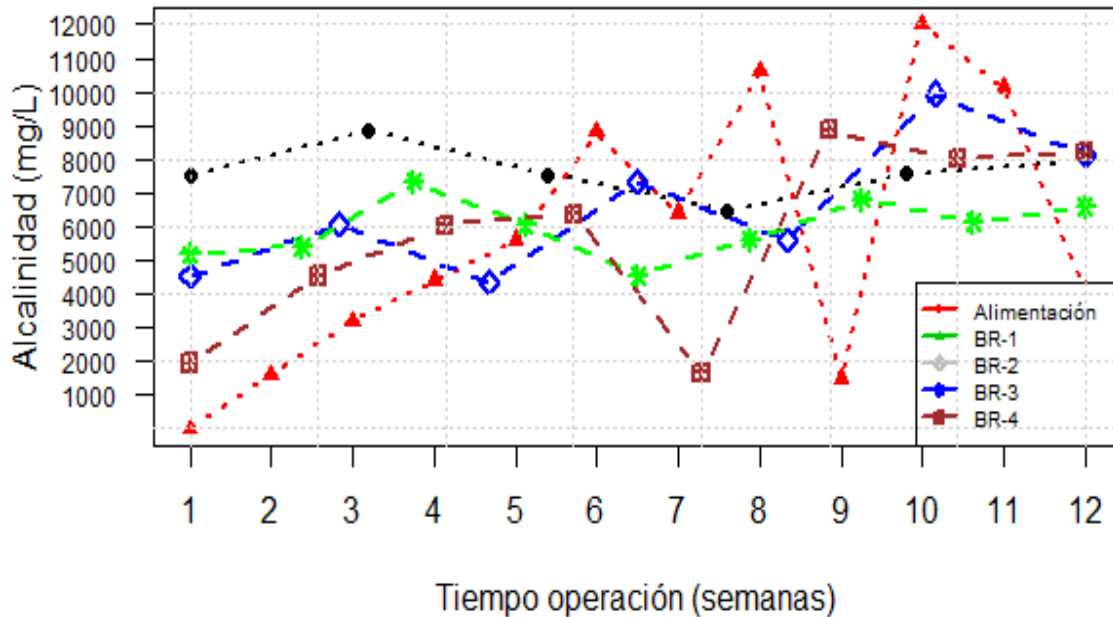


Fig. 25. Comportamiento de Alcalinidad, en la salida de los cuatro biofiltros

Durante la operación, el lixiviado de entrada fue oloroso y negro en color 3750 – 4010 (Pt-Co), después de que el lixiviado pasó por los biofiltros, las primeras cuatro semanas presentó una reducción significativa en el color, para el BR-1 tuvo un valor que osciló 1667 (Pt-Co), para el BR-2 de 900 (Pt-Co), para el BR-3 1425 (Pt-Co), mientras que para el BR- fue de 1285 (Pt-Co); el efluente fue inodoro y amarillo pálido (ver Fig. 26 y Fig. 27).

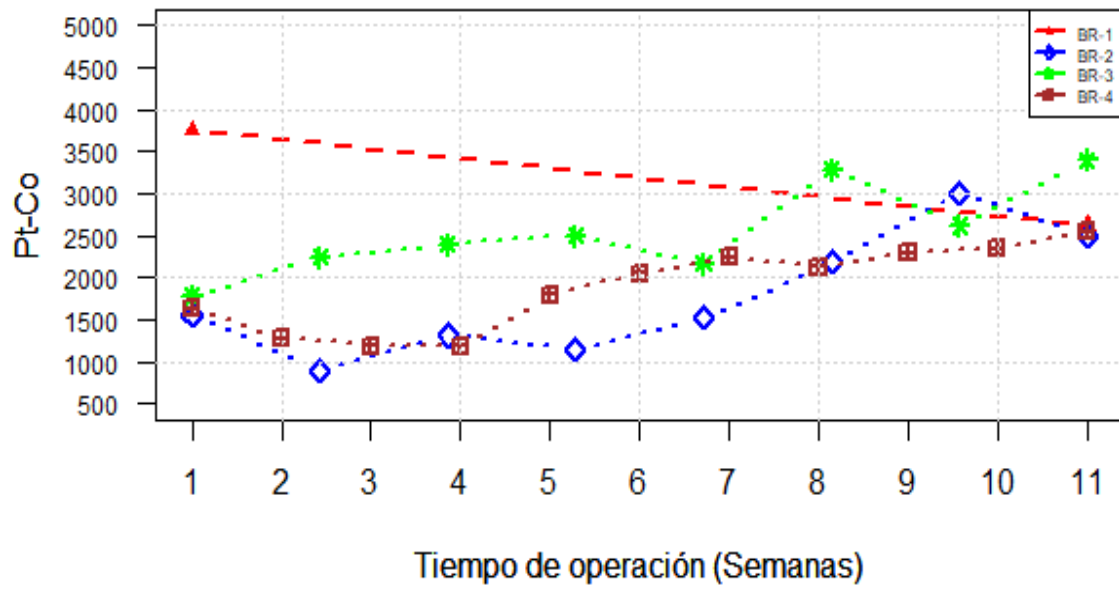


Fig. 26 Comportamiento de Color, en la salida de los cuatro biofiltros



Fig. 27. Tonalidad en la salida de uno de los biofiltros después de dos semanas de operación

## 7.5 Análisis estadístico

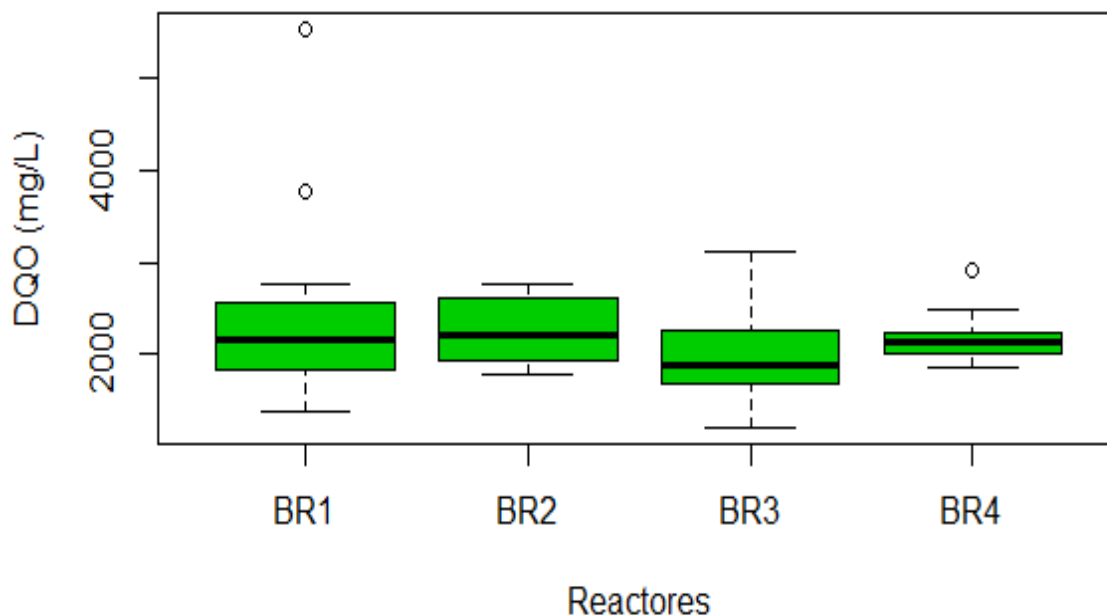


Fig. 28. Comportamiento en la salida de los cuatro biofiltros

Tomando en cuenta el diseño experimental y con los resultados obtenidos de DQO a la salida de cada uno de los biofiltros, aplicando el ANOVA muestra que existe una diferencia significativa entre las medias de los cuatro reactores, es decir que la hipótesis alternativa se acepta, ya que el valor calculado es de 2.211 y el de tabla corresponde a 0.0953, por lo que el primer valor es mayor y por tanto se rechaza la hipótesis nula, realizando el cálculo con un intervalo de confianza del 95%.

La Figura 26, muestra el valor de las medias para los cuatro reactores y se puede corroborar que si existe una diferencia significativa observando que el BR-3, presenta una media menor al de los demás biofiltros, lo que representa que recircular e inocular son favorables para el proceso de la degradación de lixiviados y se pueda disminuir los tiempos de estabilización de los sitios clausurados.

En la sección de anexos, se puede ver el cálculo de ANOVA de a DQO de los cuatro biofiltros.

## 8. CONCLUSIONES

Como conclusión se demostró que la recirculación de lixiviado inoculado con rumen sintético a una temperatura de 35°C, logró disminuir el tiempo de estabilización de los lixiviados como el BR3 que mostró remociones en términos de DQO del 76 a 83%, en comparación al BR1 donde sus remociones estuvieron en el orden del 24 a 38%. También el BR4 mostró mejores remociones de DQO, del 41 al 72% comparado con el BR2 con remociones del 22 al 38%. En lo que respecta en la eliminación del nitrógeno amoniacal, el efecto de la temperatura contribuyó a acelerar su oxidación, en el BR1 y BR2 que no tuvieron ningún inoculo, pero si diferencias de recirculación, presentaron mejores eficiencias de remoción del 94 y 95% respectivamente, en comparación con el BR3 y BR4 con remociones de 88 y 70%.

Llevando a cabo el muestreo de material estabilizado, se pudo cuantificar su contenido de materia orgánica, lo que indica el porcentaje que puede aportar a la degradación y la facilidad para su uso como material de empaque para los biofiltros.

Llevando a cabo el muestreo de lixiviados, en un sitio de disposición final ya clausurado y tomando en cuenta su caracterización se puede concluir que el lixiviado que se manejó está clasificado del tipo de lixiviado maduro de acuerdo a la Tabla 3 de este trabajo, y por tanto con un proceso de degradación más lento, sin embargo estos biofiltros rellenos con material estabilizado y junto con el lixiviado fueron sometidos a una temperatura constante de 35°C, lo que favoreció a incrementar el proceso de degradación.

En cuanto a los microorganismos involucrados en este proceso de degradación y por la caracterización microbiológica hecha, se encuentra el género *pseudomonas sp.*, donde muestran una capacidad para poder eliminar residuos orgánicos en términos de valores de



DQO, DBO<sub>5</sub> hasta un 60%, teniendo un potencial de ser utilizado en proceso de reducción de amoniaco y DQO para tratar lixiviados maduros.

## 9. REFERENCIAS

- Aguilar, H. A. N., Ramírez, J. A. B., Salinas, R. I. M., Toledo, P. V., Hernández, R. F. G., y Castillejos, D. E. (2017). Tratamiento de lixiviados en biorreactores empacados con materiales estabilizados. *Lacandonia*, 11(1), 85-90.
- Aguilar, H. A. N., Ramos, J. M. G., Lara, C. G., Hdez, R. G., y Valencia, M. N. R. (2017). Manejo de biogas y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general. *Lacandonia*, 4(2), 117-130.
- Alía, M., Pastor Piñeiro, J., Urcelay, A., Gil Criado, A., y Bello Pérez, A. (1991). Estudio de la toxicidad de los lixiviados procedentes de un vertedero clausurado en un municipio de la Sierra de Madrid.
- Alvariño, C. R., Navarrete, J. G., Petit, X. R., y Hernández, M. A. (2010). Filtro biológico en el tratamiento de lixiviados. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 41, 1-11.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, and Water Environment Federation. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 2). American Public Health Association.
- Amokrane, A., Comel, C., and Veron, J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water research*, 31(11), 2775-2782.
- Bautista-Ramírez, J. A., Gutiérrez-Hernández, R. F., Nájera-Aguilar, H. A., Martínez-Salinas, R. I., Vera-Toledo, P., Araiza-Aguilar, J. A., y Rojas-Valencia, M. N. (2018). Biorreactor empacado con materiales estabilizados (beme), como pretratamiento para lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(2), 561-571.
- Berge, N. D., Reinhart, D. R., and Batarseh, E. S. (2007). Strategy for complete nitrogen removal in bioreactor landfills. *Journal of Environmental Engineering*, 133(12), 1117-1125.
- Bhalla, B., Saini, M. S., & Jha, M. K. (2012). Characterization of leachate from municipal solid waste (MSW) landfilling sites of Ludhiana, India: a comparative study. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), 732-745.
- Bilgili, M. S., Demir, A., Ince, M., and Özkaya, B. (2007). Metal concentrations of simulated aerobic and anaerobic pilot scale landfill reactors. *Journal of Hazardous Materials*, 145(1-2), 186-194.
- De Cortázar, A. L. G., Narea, M. S., and Llamas, S. (2017). *Cierre, Sellado Y Reinserción De Antiguos Vertederos. Experiencias En Iberoamérica*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 123-139.

- Del Distrito Federal, O. D. G. (2003). Gaceta Oficial del Distrito Federal. *Aviso*, 133.
- Fernandez, A., Pacheco, M. J., Ciríaco, L., and Lopes, A. (2015). Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: present and future. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176, 183-200.
- Foo, K. Y., and Hameed, B. H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 54-60.
- Gray, D., Pollard, S., Spence, L., Smith, y Gronow, J (2005), Spray irrigation of landfill leachate: Estimating potential exposures to workers and bystanders using a modified air box model and generalized source term. *Environmental Pollution*, p 133.
- Hach, C. (2000). Manual de análisis de agua. *Loveland, Colorado, EE. UU.*
- Han, Z. Y., Liu, D., and Li, Q. B. (2013). A removal mechanism for organics and nitrogen in treating leachate using a semi-aerobic aged refuse biofilter. *Journal of environmental management*, 114, 336-342.
- Han, Z. Y., Liu, D., Li, Q. B., Li, G. Z., Yin, Z. Y., Chen, X., and Chen, J. N. (2011). A novel technique of semi-aerobic aged refuse biofilter for leachate treatment. *Waste management*, 31(8), 1827-1832.
- He, R., Wei, X. M., Tian, B. H., Su, Y., and Lu, Y. L. (2015). Characterization of a joint recirculation of concentrated leachate and leachate to landfills with a microaerobic bioreactor for leachate treatment. *Waste management*, 46, 380-388.
- Hongjiang, L. I., Youcai, Z. H. A. O., Lei, S. H. I., and Yingying, G. U. (2009). Three-stage aged refuse biofilter for the treatment of landfill leachate. *Journal of Environmental Sciences*, 21(1), 70-75.
- INEGI, 2016. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Relleno sanitario por entidad federativa. 1 p.
- Jiang, J., Yang, G., Deng, Z., Huang, Y., Huang, Z., Feng, X., and Zhang, C. (2007). Pilot-scale experiment on anaerobic bioreactor landfills in China. *Waste Management*, 27(7), 893-901.
- Johannessen, L. M. (1999). Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills. World Bank, Urban Development Division, Urban Waste Management Thematic Group
- Jojoa, Unigarro German Dimitriv (2016). Tesis de Licenciatura. Tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario, utilizando un filtro biológico aireado (BAF), Instituto de Ingeniería UNAM, 16-25.
- Jokela, J. P. Y., Kettunen, R. H., Sormunen, K. M., & Rintala, J. A. (2002). Biological nitrogen removal from municipal landfill leachate: low-cost nitrification in biofilters and laboratory scale in-situ denitrification. *Water Research*, 36(16), 4079-4087

- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., and Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 32(4), 297-336.
- Li, Z. G., Feng, X., Li, P., Liang, L., Tang, S. L., Wang, S. F., and Shang, L. H. (2010). Emissions of air-borne mercury from five municipal solid waste landfills in Guiyang and Wuhan, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(7), 3353-3364.
- Luna, Y., Otal, E., Vilches, L., Vale, J., Querol, X., y Fernández, C (2007), Use of zeolitised cal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study. *Waste Management*. 27. 1877-1883.
- Marañón, E., Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Fernández-Méndez, A., and Fernández-Sánchez, A. (2008). Coagulation–flocculation as a pretreatment process at a landfill leachate nitrification–denitrification plant. *Journal of hazardous materials*, 156(1-3), 538-544.
- Martínez, S. G., y Soto, C. A. V. (2014). Tratamiento De Los Lixiviados De Prados De La Montaña En Un Sistema De Lodos Activados. Instituto de Ingeniería UNAM, 16-25.
- Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giácoman Vallejos, G., y Jiménez Cisneros, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 133-145.
- Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giácoman Vallejos, G., y Jiménez Cisneros, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 133-145.
- Mendoza Chávez, E. A., Márquez-Benavides, L., Sánchez-Yáñez, J. M., Buenrostro Delgado, O., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2013). Efectos de la Recirculación de Lixiviados Sobre las Propiedades Físicas y Químicas de los RSU Sometidos a Digestión Anaeróbica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3).
- México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. (2005). *Informe de la situación del medio ambiente en México: compendio de estadísticas ambientales*. SEMARNAT, Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales.
- Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., and Rojas-Valencia, M. (2010). Treatment Of Leachates From The Landfill In Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Mexico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol 17. No. 2 (2010) 561-571
- NOM, N. O. M. (2004). 083-SEMARNAT-2003. *Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial*, 20.

- Orta de Velasquez, M. T., y Monje-Ramirez, I. (2006). Combined pre-treatment of coagulation-ozonation for saline-stabilized landfill leachates. *Ozone: Science and Engineering*, 28(5), 309-316.
- Piña, J. P. L., Soto, M. L. Q., Méndez, C. A. T., y Ávalos, C. F. M. (2009). Impulso al sector servicios del municipio de Nezahualcóyotl, Edo. De México: tendencias y desafíos. *Revista Digital Universitaria. DGSCA-UNAM*, Vol., 10, No. 4.
- Prantl, R., Tesar, M., Huber-Humer, M., and Lechner, P. (2006). Changes in carbon and nitrogen pool during in-situ aeration of old landfills under varying conditions. *Waste management*, 26(4), 373-380.
- Quintero, Soto Ma. Luisa, Tello Méndez, Carlos, López Piña, José Próspero y Melgoza Ávalos, Carlos Fernando "*Impulso al sector servicios del municipio de Nezahualcóyotl, Edo. de México: tendencias y desafíos*". *Revista Digital Universitaria*. 10 de abril 2009, Vol. 10, No.4.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ramos Alvariano, C., Gutiérrez Navarrete, J., Rodríguez Petit, X., y Agramonte Hernández, M. (2010). *Filtro biológico en el tratamiento de lixiviados. Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 41.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., and Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 150(3), 468-493.
- Ritzkowski, M., Heyer, K. U., and Stegmann, R. (2006). Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills. *Waste Management*, 26(4), 356-372.
- Rojas-Valencia, M. N., y Aragón, Y. C. S. (2012). Tiraderos a cielo abierto. *Ciencia y Desarrollo*, (mayo-junio 2012). Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/265086599> Tiraderos a cielo abierto
- Rosas, Barrera Salvador (2013). Ciudad Jardín Bicentenario, Bienvenidos a la modernidad. *Debate económico Vol. 2 (1) No. 4*. P.p. 91-121.
- Salem, Z., Hamouri, K., Djemaa, R., and Allia, K. (2008). Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. *Desalination*, 220(1-3), 108-114.
- SEDESOL, S. (2012). CONAPO. (2012). Catálogo Sistema Urbano Nacional 2012.
- Song, L., Shi, L., Zhao, Y., and Li, H. (2011). Novel engineering controls to increase leachate contaminant degradation by refuse: from lab test to in situ engineering application. *Ecological engineering*, 37(11), 1914-1919.

- Whitford, M. F., Forster, R. J., Beard, C. E., Gong, J., and Teather, R. M. (1998). Phylogenetic analysis of rumen bacteria by comparative sequence analysis of cloned 16S rRNA genes  $\beta$ . *Anaerobe*, 4(3), 153-163
- Wiszniewski, J., Robert, D., Surmacz-Gorska, J., Miksch, K., and Weber, J. V. (2006). Landfill leachate treatment methods: A review. *Environmental chemistry letters*, 4(1), 51-61.
- Xie, B., L. B. Y., Hu, C., Liang, S. B., Tang, Y., and Lu, J. (2010). Landfill leachate pollutant removal performance of a novel biofilter packed with mixture medium. *Bioresource technology*, 101(20), 7754-7760.
- Xie, B., Lv, Z., Hu, C., Yang, X., and Li, X. (2013). Nitrogen removal through different pathways in an aged refuse bioreactor treating mature landfill leachate. *Applied microbiology and biotechnology*, 97(20), 9225-9234.
- Xie, B., Xiong, S., Liang, S., Hu, C., Zhang, X., and Lu, J. (2012). Performance and bacterial compositions of aged refuse reactors treating mature landfill leachate. *Bioresource technology*, 103(1), 71-77.
- Yong, Z. J., Bashir, M. J., Ng, C. A., Sethupathi, S., and Lim, J. W. (2018). A sequential treatment of intermediate tropical landfill leachate using a sequencing batch reactor (SBR) and coagulation. *Journal of environmental management*, 205, 244-252.
- Zhao, Y., Song, L., Huang, R., Song, L., and Li, X. (2007). Recycling of aged refuse from a closed landfill. *Waste Management & Research*, 25(2), 130-138.
- Hernández, B., and Wehenpohl, G. (2000). Manual para la rehabilitación, clausura y saneamiento de tiraderos a cielo abierto en el Estado de México. *Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, GTZ*.

## 10. ANEXOS

Actividades complementarias: Cálculo de Análisis de varianza (ANOVA) para la DQO de salida de los cuatro reactores (R-studio).

```
#### ANOVA de DQO salida#####  
> ls()  
[1] "anova"  
> rm(list = ls())  
> ls()  
character(0)  
> file.choose("DQO salida.csv")  
[1] "C:\\Users\\asus\\Documents\\Documentos R\\\\Daya Tesis\\anova.R"  
> anova=read.csv("DQO salida.csv")  
> anova  
  DQO.salida No..Reactor  
1          3765          BR1  
2          1953          BR1  
3          2150          BR1  
4          1840          BR1  
5          1640          BR1  
6          1598          BR1  
7          1730          BR1  
8          1380          BR1  
9          2032          BR1  
10         2553          BR1  
11         2152          BR1  
12         2290          BR1  
13         2633          BR1  
14         2757          BR1  
15         2333          BR1  
16         1963          BR1  
17         5540          BR1  
18         2618          BR2  
19         1780          BR2  
20         1943          BR2  
21         1830          BR2  
22         1780          BR2  
23         1932          BR2  
24         2067          BR2  
25         2445          BR2  
26         2208          BR2  
27         2620          BR2  
28         2753          BR2  
29         2757          BR2  
30         2470          BR2  
31         3120          BR3  
32         2032          BR3  
33         2608          BR3  
34         2057          BR3  
35         1890          BR3  
36         1392          BR3  
37         1494          BR3  
38         1413          BR3  
39         1516          BR3  
40         1737          BR3  
41         1650          BR3
```

```

42      2270      BR3
43      2300      BR3
44      2013      BR3
45      1847      BR3
46      2797      BR3
47      1687      BR3
48      1830      BR3
49      1206      BR3
50      1838      BR3
51      2417      BR3
52      2363      BR3
53      1737      BR3
54      1893      BR3
55      1930      BR3
56      2917      BR4
57      2218      BR4
58      2235      BR4
59      2082      BR4
60      2144      BR4
61      1927      BR4
62      2487      BR4
63      2243      BR4
64      1880      BR4
65      1867      BR4
66      2103      BR4

```

```
> attach(anova)
```

The following objects are masked from anova (pos = 3):

DQO.salida, No..Reactor

```
> names(anova)
```

```
[1] "DQO.salida" "No..Reactor"
```

```
> class(DQO.salida)
```

```
[1] "integer"
```

```
> class(No..Reactor)
```

```
[1] "factor"
```

```
> levels(No..Reactor)
```

```
[1] "BR1" "BR2" "BR3" "BR4"
```

```
> boxplot(DQO.salida~No..Reactor)
```

```
> boxplot(DQO.salida~No..Reactor, ylab="Concentration COD (mg/L)", col=459,
, xlab="Reactores")
```

```
> boxplot(DQO.salida~No..Reactor, ylab="DQO (mg/L)", col=459, xlab="Reactores",
main="Salida DQO, Reactores")
```

```
> aov(DQO.salida~No..Reactor)
```

```
Call:
```

```
aov(formula = DQO.salida ~ No..Reactor)
```

```
###--- TABLA ANOVA
```

```
# H0: las medias son iguales
```

```
# H1: al menos una media es diferente
```

```
Terms:
```

	No..Reactor	Residuals
Sum of Squares	1850533	23230989
Deg. of Freedom	3	62

```
Residual standard error: 612.122
```



Estimated effects may be unbalanced

```
> ANOVA1=aov(DQO.salida~No..Reactor)
```

```
> summary(ANOVA1)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	<u>F value</u>	<u>Pr(&gt;F)</u>
No..Reactor	3	1850533	616844	<u>1.646</u>	<u>0.188</u>
Residuals	62	23230989	374693		

```
> TukeyHSD(ANOVA1)
```

Tukey multiple comparisons of means  
95% family-wise confidence level

```
Fit: aov(formula = DQO.salida ~ No..Reactor)
```

```
$`No..Reactor`
```

	diff	lwr	upr	p adj
BR2-BR1	-124.7330	-720.1529	470.68686	0.9453740
BR3-BR1	-409.6376	-917.6673	98.39197	0.1554049
BR4-BR1	-179.9358	-805.2771	445.40540	0.8721742
BR3-BR2	-284.9046	-837.5022	267.69295	0.5281942
BR4-BR2	-55.2028	-717.2614	606.85584	0.9961954
BR4-BR3	229.7018	-355.0125	814.41617	0.7283992

**conferenceseries.com**

47 Churchfield Road, London, W3 6AY, UK

# Certificate of Recognition

*Conference Series and the Editors of Advances in Recycling & Waste  
Management and Expert Opinion on Environmental Biology wish to thank*

*Prof/Dr/Mr/Ms. Dayanira Jovita Gutierrez Hernandez*  
*UNAM, Mexico*

*for his/her Participation*

*at the "11<sup>th</sup> World Congress and Expo on Recycling"  
held during June 13-14, 2019 in Edinburgh, Scotland*

*B. Mishra*

**Brajendra Mishra**

NSF Center for Resource Recovery & Recycling, USA





# EVALUATION OF THE REDUCTION OF STABILIZATION TIMES OF CLOSED SITES FOR THE FINAL DISPOSAL OF URBAN SOLID WASTE, THROUGH THE RECIRCULATION OF INOCULATED LEACHATES



Dayanra J. Gutiérrez-Hernández, Ma. Neftalí Rojas-Valencia  
Institute of Engineering, National Autonomous University of Mexico, Coyacán México.  
e-mail: [MGutierrez@ingen.unam.mx](mailto:MGutierrez@ingen.unam.mx)

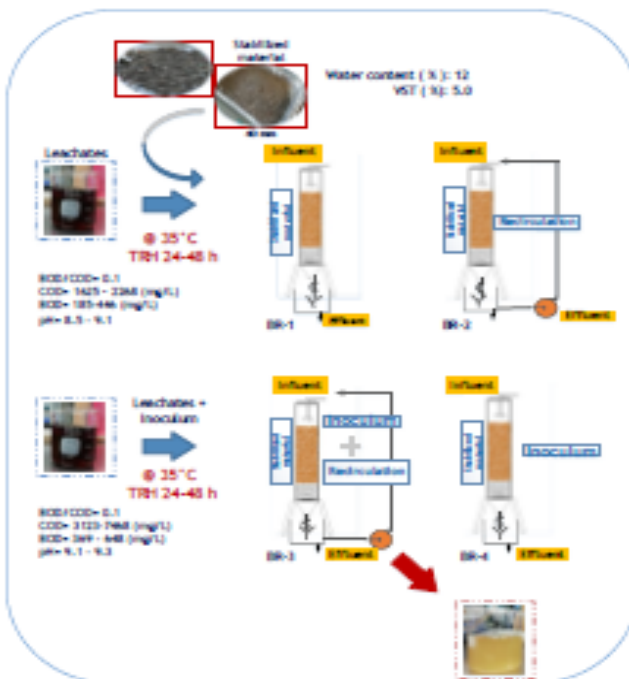
## INTRODUCTION

One approach in the treatment of leachates is to make use of municipal solid waste that with more than 10 years is extracted from the final disposal sites that are already closed. These wastes are called stabilized material and serve as filler material in biofilters and have significant elimination efficiencies in terms of COD.

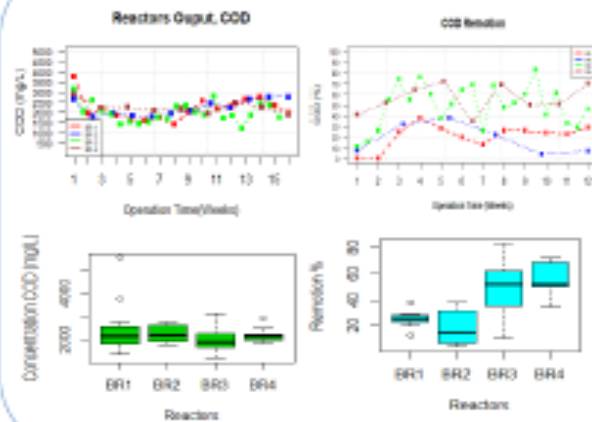
## OBJECTIVE

The aim of this work is to make use of the recirculation of the leached inoculated with rumen in a biofilter / bioreactor filled with stabilized material in anaerobic conditions, in order to decrease the stabilization time in a final disposal site already closed.

## METHODS



## RESULTS



## CONCLUSIONS

The biofilters packed with stabilized residues, have reached removals of organic load in sample of leached with inoculum (rumen) of 80%, as well as the temperature has favored in the reduction of the stabilization time. The materials used in the biofilters, provide an opportunity to revalue urban solid waste in Mexico.

## REFERENCES

1. Escalante-Ramírez, R.F., Gutiérrez-Hernández, R.A., Nájera-Aguilera, R.I., Martínez-Salinas, P., Vázquez-Torales, J.A., Araña-Aguilera, R., Múgica-Novales, M.N., Rojas-Valencia, M. (2018) *Mexican Journal of Chemical Engineering*, Vol. 17, No. 2, 560-571.
2. El-Gohary, F. A., & Kamel, G. (2016). Characterization and biological treatment of pre-treated landfill leachate. *Ecological Engineering*, 94, 268-274.
3. Han, Z. Y., Liu, D., Li, Q. B., Li, G. Z., Yin, Z. Y., Chen, X., & Chen, J. N. (2011). A novel technique of semi-anaerobic equal effluent biofilter for leachate treatment. *Water management*, 11(12), 1827-1832.
4. Ramon, S., González, J., Fandiño, S., Díez-Vicario, F., y Molino, F. (2007). Leachate Treatment: Review and opportunity. *Recursos Acuáticos*, 130, 458-469.
5. Xia, B., Li, R. Y., Hu, C., Liang, S. B., Ding, Y., & Lu, J. (2010). Landfill leachate pollution removal performance of a novel biofilter packed with sulfate-reducing bacteria. *Bioresource technology*, 101(20), 7754-7760.
6. Xia, B., Xiang, S., Liang, S., Hu, C., Zhang, X., & Lu, J. (2012). Performance and bacterial composition of equal effluent reactor treating mature landfill leachate. *Bioresource technology*, 108(1), 71-77.

## ACKNOWLEDGMENTS

Financial support is also kindly acknowledged from line of research: Integral management, treatment, recycling and final disposal of municipal solid waste, and CONACYT.

