



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

Evaluación de un tratamiento primario de lixiviados con coagulantes y filtros orgánicos.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

RAFAEL RIVERA GONZALEZ



MEXICO, CIUDAD DE MEXICO.

2016



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 está 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: Profesor: Ma. Guadalupe Lemus Barajas.

VOCAL: Profesor: Alejandra Mendoza Campos.

SECRETARIO: Profesor: Ma. Neftalí Rojas Valencia.

1er. SUPLENTE: Profesor: Alexis González Dulzaides.

2° SUPLENTE: Profesor: Tomás Guerrero Briseño.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE.

ASESOR DEL TEMA: DRA. MA. NEFTALÍ ROJAS VALENCIA.

(nombre y firma)

SUPERVISOR TÉCNICO:

(nombre y firma)

SUSTENTANTE: RAFAEL RIVERA GONZÁLEZ.

(nombre (s) y firma (s))

“Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental que cuenta con certificación de la calidad ISO 9001:2008 otorgada por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C. (IMNC) con registro RSGC 960 de fecha 11 de enero de 2016, vigente al 11 de enero de 2019”

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	10
2	JUSTIFICACIÓN.....	12
2.1	Hipótesis.....	12
2.2	Objetivos.....	12
2.2.1	Objetivo General.....	12
2.2.2	Objetivos Particulares.....	12
3	MARCO TEÓRICO.....	14
3.1	Fitogeografía del nopal.....	14
3.2	Fitogeografía de la sábila.....	15
3.3	Ecología del nopal.....	17
3.4	Ecología de la sábila.....	18
3.5	Componentes químicos de las plantas suculentas.....	19
3.5.1	Agua.....	19
3.5.2	Sales minerales.....	20
3.5.3	Celulosa.....	20
3.5.4	Mucílagos.....	20
3.6	Cascarón de huevo como filtro orgánico.....	20
3.6.1	Principal componente del cascarón de huevo.....	22
3.7	Sitios de disposición final.....	23
3.7.1	Rellenos sanitarios.....	23
3.7.2	Tiraderos a cielo abierto.....	23
3.8	Lixiviados.....	24
3.8.1	Caracterización de lixiviados.....	24
3.8.2	Determinación de lixiviados.....	26
3.9	Precipitación química.....	28
3.10	Floculación, coagulación y sedimentación.....	29
3.11	Dureza del agua.....	31
3.12	Filtración.....	31
3.13	Adsorción.....	31
3.14	Normatividad relativa al tratamiento de lixiviados.....	33
3.14.1	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	33
3.14.2	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.....	34
3.14.3	Normas Oficiales Mexicanas.....	38
4	METODOLOGÍA.....	41
4.1	Fase 1. Estudio de gabinete.....	41
4.1.1	Ubicación Relleno sanitario.....	42
4.1.2	Delimitación del área de estudio.....	43
4.1.3	Estudio de caracterización de lixiviado en el RSBP.....	44
4.2	Fase 2. Muestreos en campo.....	44

4.2.1	Método de muestreo.....	44
4.2.2	RSBP.....	44
4.3	Fase 3. Análisis en el laboratorio.....	47
4.3.1	Etapa a)Caracterización de los lixiviados a tratar.....	47
4.3.2	Etapa b) Obtención de los floculantes para el tratamiento del lixiviado.....	50
4.3.3	Etapa c) Tratamiento de lixiviados.....	54
5	RESULTADOS.....	67
5.1	Resultados del estudio de gabinete.....	67
5.2	Resultados del muestreo en campo.....	67
5.2.1	Caracterización de los lixiviados.....	67
5.3	Resultados de los análisis de laboratorio.....	69
6	CONCLUSIONES.....	89
7	REFERENCIAS.....	90

Glosario

RSBP: Relleno Sanitario Bordo Poniente.

LIA: Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno 5 días.

RSU: Residuos sólidos urbanos.

DQO: Demanda química de oxígeno.

UFC: Unidades formadores de colonias.

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplares de nopales <i>Opuntia ficus</i>	
Figura 2. Zonas áridas en la República Mexicana	18
Figura 3. Aguas contaminadas con metales pesados	22
Figura 4. Ubicación del RSBP	42
Figura 5. Condiciones del cárcamo en la etapa III del RSBP	44
Figura 6. Panorámica RSBP etapa III.	44
Figura 7. Muestreo de lixiviados en RSBP	47
Figura 9. Deshidratador solar en el Instituto de Ingeniería, UNAM	50
Figura 10. Corte de los cladodios del nopal y sábila para maximizar el proceso de secado	51
Figura 11. Materia prima lista para comenzar proceso de secado	52
Figura 12. Proceso de secado para la obtención de polvo seco de nopal utilizando un desecador solar	53
Figura 13. Proceso de secado terminado	53
Figura 14. Muestra de lixiviados recién extraídos del cárcamo en RSBP	54
Figura 15. Prueba de jarras en el LIA	56
Figura 16. Prueba de jarras utilizando sábila <i>Aloe vera</i> en base húmeda y seca	58
Figura 17. Prueba de jarras utilizando sábila <i>Aloe vera</i> en base húmeda y seca	60
Figura 18. Filtro de huevo en funcionamiento	62
Figura 19. Pruebas de sólidos sedimentables Imhoff	63
Figura 20. Diluciones para pruebas microbiológicas	64

Figura 21. Baño caliente con agitación, en la imagen con muestras de coliformes fecales en incubación	66
Figura 22. Incubadora, a 35°C que se utilizaba para incubar coliformes totales y bacterias heterotróficas	66
Figura 23. Polvo de nopal <i>Opuntia ficus</i> utilizado como floculante	69
Figura 24. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración del floculante del 1er. Muestreo	70
Figura 25. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración del nopal del 1er. Muestreo	71
Figura 26. Gráfica de la variación de conductividad con respecto a la concentración de la sábila del 1er. Muestreo	72
Figura 27. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración de la sábila del 1er. Muestreo	73
Figura 28. Gráfica pruebas Imhoff para sólidos sedimentables 1er. Muestreo	74
Figura 29. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración del nopal del 2do. Muestreo	75
Figura 30. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración del nopal del 2do. Muestreo	76
Figura 31. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración de la sábila del 2do. Muestreo	77
Figura 32. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración de la sábila del 2do. Muestreo	77
Figura 33. Gráfica pruebas Imhoff para sólidos sedimentables 1er. Muestreo	78

Figura 34. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración del nopal del 3er. Muestreo	79
Figura 35. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración del nopal del 3er. Muestreo	80
Figura 36. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración de la sábila del 3er. Muestreo	81
Figura 37. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración de la sábila del 1er. Muestreo	81
Figura 38. Gráfica pruebas Imhoff para sólidos sedimentables 1er. Muestreo	82
Figura 39. Comparación de los tratamientos en base húmeda para coliformes fecales	84
Figura 40. Comparación de los tratamientos en base seca para coliformes fecales	84
Figura 41. Comparación de los tratamientos en base húmeda para coliformes totales	85
Figura 42. Comparación de los tratamientos en base seca para coliformes totales	85
Figura 43. Comparación de los tratamientos en base húmeda para bacterias heterotróficas	86
Figura 44. Comparación de los tratamientos en base seca para bacterias heterotróficas	86

Índice de tablas

Tabla 1. Hectáreas cultivadas por estado de la República Mexicana	16
Tabla 2. Clasificación taxonómica del nopal <i>Opuntia ficus</i>	17
Tabla 3. Clasificación taxonómica de la sábila <i>Aloe vera</i>	19
Tabla 4. Composición química de los huevos	21
Tabla 5. Transformación de los residuos sólidos en biogás y el aporte al lixiviado dentro de un relleno sanitario	26
Tabla 6. Caracterización de lixiviados por índice de biodegradabilidad	27
Tabla 7. Límites máximos permisibles de contaminantes en agua	39
Tabla 8. Límites máximos permisibles de contaminantes en agua tratada según la NOM-001-SEMARNAT-1996	40
Tabla 9. Resultados promedios de propiedades de los lixiviados en el RSBP	45
Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas analizadas	48
Tabla 11. División de las muestras para pruebas microbiológicas	56
Tabla 12. Concentraciones utilizadas en el ensayo de jarras para cada tipo de tratamiento con el floculante de nopal <i>Opuntia ficus</i>	59
Tabla 13. Concentraciones utilizadas en el ensayo de jarras para cada tipo de tratamiento con el floculante de sábila <i>Aloe vera</i>	61
Tabla 14. Desglose de los tipos de tratamiento analizados en las pruebas microbiológicas	65
Tabla 15. Resultados pruebas fisicoquímicas para caracterizar lixiviado	68
Tabla 16. Resultados pruebas microbiológicas para caracterizar lixiviado	68
Tabla 17. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con <i>Opuntia ficus</i>	71
Tabla 18. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con <i>Aloe vera</i>	72
Tabla 19. Resultados de las pruebas de sólidos sedimentables con <i>Aloe vera</i> base húmeda	73

Tabla 20. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con <i>Opuntia ficus</i> . 2do. Muestreo	75
Tabla 21. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con <i>Aloe vera</i> . 2do. Muestreo	76
Tabla 22. Resultados de las pruebas Imhoff con <i>Aloe vera</i> base húmeda	78
Tabla 23. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con <i>Opuntia ficus</i> . 3er. Muestreo	79
Tabla 24. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con <i>Aloe vera</i> . 3er. Muestreo	80
Tabla 25. Resultados de las pruebas Imhoff con <i>Aloe vera</i> base húmeda	82
Tabla 26. Tratamientos más eficientes en pruebas fisicoquímicas	87
Tabla 27. Tratamientos más eficientes en pruebas microbiológicas	87
Tabla 28. Comparativa de resultados y límites permisibles en lixiviados	88

Resumen

La generación desmedida de residuos sólidos urbanos en México es preocupante debido al impacto ambiental que provoca. En México se generan cerca de 100 millones de toneladas de residuos sólidos al día, que terminan en rellenos sanitarios, muchos de estos no están acondicionados y generando contaminación, esta gran cantidad de residuos ocasiona la formación de grandes efluentes de lixiviados, potenciales contaminantes del agua que se encuentra en el subsuelo (erenovable, 2015).

El objetivo del proyecto es desarrollar una metodología para el tratamiento de lixiviados con floculantes vegetales y filtros orgánicos, para la remoción de partículas suspendidas, materia orgánica y agentes patógenos presentes en los lixiviados obtenidos en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, además de cumplir con ser un proceso que requiere materia prima fácil de conseguir, es eficiente y económico.

El proyecto se realizó con dos distintos tratamientos a partir de las plantas: el nopal *Opuntia ficus* y la sábila *Aloe vera*, estas se sometieron a un proceso de secado en un deshidratador solar y se comparó la eficiencia del coagulante en base seca y en base húmeda. Después se escogió un grupo de propiedades fisicoquímicas y microbiológicas a través de una investigación bibliográfica en proyectos similares anteriores. Estas propiedades fueron medidas y comparadas con los límites máximos permisibles de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

La república mexicana sufre en gran parte de su territorio problemas con las sequías y el desabasto de agua, recuperar los recursos hídricos disponibles se vuelve una opción viable si son de bajo costo. Algunos usos alternativos de los lixiviados tratados son agua de riego en cultivos y áreas verdes urbanas.

Los resultados más favorables se generaron con una concentración de sábila *Aloe vera* 55/45 volumen/volumen de lixiviado, obteniéndose valores de los parámetros de pH, DBO₅ y coliformes fecales con valores incluso por debajo en los establecidos en las normas oficiales NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-002-SEMARNAT-1996 para uso de riego agrícola y de áreas verdes urbanas. Se considera por lo tanto viable este proceso para el tratamiento a los lixiviados.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la sociedad se enfrenta a un gran y preocupante problema: la generación desmedida de RSU; situación que se agrava día a día por la falta de atención de las autoridades. Diariamente, en México, se generan aproximadamente 100 millones de toneladas de RSU, que genera gases tóxicos compuestos por CO₂ (29%), CH₄ (60%) y de otros compuestos en menores proporciones, mezcla conocida como biogás (erenovable, 2015). Además, se generan líquidos contaminantes provenientes de la materia orgánica denominados lixiviados; sujetos a estudio en el presente trabajo.

Los RSU son aquellos restos generados por actividades humanas considerados como inútiles, indeseables o desechables por los usuarios, los cuales se pueden dividir por sus componentes en:

Residuos orgánicos: Son sustancias que pueden descomponerse en un tiempo relativamente corto, como lo son: restos vegetales, madera, etc.

Residuos inorgánicos: Aquellos objetos y materiales que no se descomponen.

Los RSU son depositados, en la mayoría de los casos, en tiraderos a cielo abierto improvisados, los cuales no están adaptados para contenerlos. La materia orgánica presente en los RSU se degrada formando biogás y un líquido contaminante, de color oscuro y de olor muy penetrante, denominado lixiviado. Además, este líquido arrastra todo tipo de sustancias nocivas. Se han encontrado hasta 200 compuestos diferentes presentes en los lixiviados, algunos de ellos tóxicos y hasta cancerígenos. La humedad de los residuos y la lluvia son los dos factores principales que aceleran la generación de lixiviados, (Fernández, 2006), esto ocasiona que se filtren al subsuelo y generen la contaminación en mantos acuíferos circunvecinos a los tiraderos.

2. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento primario en lixiviados utilizando flocculantes vegetales es una solución viable para su reutilización.

La reutilización de lixiviados en zonas áridas es potencialmente útil. En México aproximadamente un 50% del territorio tiene características de clima árido o semiárido, lugares donde la reutilización de estos líquidos podría ser una realidad. Este trabajo propone la utilización y comparación de dos distintos tipos de plantas, ambas endémicas de zonas áridas o semiáridas: el nopal *Opuntia ficus-indica* y la sábila *Aloe vera*, ambas consideradas como plantas suculentas o crasas debido a que en la raíz, el tallo o las hojas se engrosan para permitir el almacenamiento de agua en grandes cantidades, por lo tanto, este tipo de plantas producen una sustancia vegetal líquida y viscosa conocida como mucílago, la composición de este líquido puede variar dependiendo de la especie de la que se extrae; por sus propiedades aglutinantes el mucílago puede ser utilizado como un buen flocculante primario.

Los filtros ecológicos son aquellos sistemas naturales donde se puede separar mediante un proceso físico las sustancias indeseables o contaminantes. Existen varios tipos de sistemas cuyo fin es el de disminuir la concentración de contaminantes en aguas residuales o lixiviados, desde humedales que limpian aguas residuales hasta plantas que extraen metales pesados del suelo. En este proyecto se utilizó la cáscara de huevo como filtro para retener al contaminante en su superficie. La cáscara de huevo ha demostrado ser un adsorbente efectivo para metales pesados que contaminan aguas como el cadmio, zinc y mercurio por decir algunos, esto se debe a que el cascarón de huevo está compuesto por carbonato de calcio y posee una superficie muy porosa.

En este trabajo se expone el tratamiento de lixiviados a través de los vegetales que pasarán por un proceso de secado y molienda para formar un polvo fino que funcionó como flocculante de los contaminantes en los lixiviados; y a través del filtro ecológico, a base de cascarón de huevo, donde se detendrán los sólidos suspendidos restantes, obteniendo al final un producto con una menor concentración de residuos. Los lixiviados tratados serán sometidos a una prueba de jarras donde se medirán las propiedades de

turbiedad, pH, DQO y pruebas microbiológicas, antes y después de ser sometidos al proceso.

Con base en lo ya fundamentado, la intención del proyecto es desarrollar un método sencillo y accesible que brinde la posibilidad de reutilizar los lixiviados a un bajo costo, con el fin de que se pueda hacer uso de este método en todas partes de manera sencilla y rápida.

2.1. Hipótesis

La determinación de los efectos para el tratamiento de lixiviados con floculantes vegetales y filtros orgánicos, son útiles en la disminución de partículas suspendidas, materia orgánica y agentes patógenos presentes en los lixiviados obtenidos en el RSBP.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

El tratamiento de lixiviados con floculantes vegetales y filtros orgánicos, en la remoción de partículas suspendidas, materia orgánica y agentes patógenos presentes en los lixiviados generados en el RSBP.

2.2.2. Objetivos particulares

1.-Determinar el tipo de floculante vegetal (*Aloe vera* u *Opuntia ficus*), el tipo de base (húmeda o seca) y la concentración óptima para tener una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y partículas suspendidas en los lixiviados.

2.-Analizar si el tratamiento de los lixiviados con los floculantes vegetales alcanza los niveles permitidos en relación a la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales.

3.- A través de la metodología de tratamiento de lixiviados con coagulantes vegetales primarios y filtros orgánicos se obtendrán lixiviados con menor grado de partículas contaminantes y agentes patógenos que los encontrados en los cárcamos de filtración del RSBP.

4.-Validar los procesos: *Opuntia ficus*-cascarón de huevo y *Aloe vera*-cascarón de huevo, como unas alternativas viables para el tratamiento de lixiviados.

5.- Analizar la factibilidad técnica, económica y ambiental del proceso propuesto.

3. MARCO TEÓRICO.

A continuación se presentan las características más relevantes de los materiales utilizados en la realización del proyecto: se destaca la fitogeografía y ecología de los activos vegetales implementados. Por otra parte se examinan las principales características del filtro orgánico propuesto, el cascarón de huevo, el cual se plantea como segundo paso después de la coagulación en el método de tratamiento de lixiviados, al igual que con los activos vegetales se habla de la disponibilidad existente en el país de cascarón de huevo.

3.1. Fitogeografía del nopal

La cactácea *Opuntia ficus* según Vázquez (1994) es el nombre científico del nopal, este género se encuentra desde Alberta en Canadá, hasta la Patagonia en Argentina; principalmente en las zonas desérticas del sur de Estados Unidos, México y América del Sur. En el territorio mexicano crece en suelos pedregosos sujetos a temperaturas extremas y sequías prolongadas, en la figura 1 se pueden observar algunos ejemplares del nopal *Opuntia ficus* presentes en el RSBP.



Figura 1. Ejemplares de nopales *Opuntia ficus* (MNN, 2015)

En México las zonas áridas y semiáridas abarcan del 50% al 70% de su territorio. Las plantas ubicadas en estas zonas son sometidas a mucho estrés, ya que el medio donde viven es bastante extremo, esto ha generado distintas especies de *Opuntia*, de las cuales, las siguientes se encuentran en nuestro país: *O. strepacantha*, *O. leucotricha*, *O. cantabrigiensis*, *O. lindheimeri* y *O. imbricata*. La especie *O. lindheimeri* llega a tener densidades hasta de 1000 individuos por hectárea, como en Nuevo Laredo, y en los Municipios de General Terán, de Salinas y otros, en Tamaulipas y en los estados de Guerrero e Hidalgo (Bravo-Hollis, 1978).

3.2. Fitogeografía de la sábila

La sábila *Aloe vera* llegó a América por primera vez con la llegada de la expedición de Cristóbal Colón al continente, tiempo después los conquistadores españoles introdujeron la planta en el territorio mexicano, esta logra adaptarse muy bien a las condiciones climatológicas y al hábitat mexicano con lo cual se fue expandiendo hasta alcanzar todo el territorio mexicano. Además, la sociedad aceptó de buena manera la nueva planta debido a las propiedades medicinales que se le atribuyen, como la capacidad de desinflamar heridas.

En México la sábila recibe diversos usos y aplicaciones, a lo largo del territorio nacional se puede encontrar como planta de ornato, en jardines domésticos o simplemente como plantas silvestres. El *Aloe vera* ha proliferado de manera natural por las regiones sur, sureste y centro del país. Se tienen registros de ejemplares de *Aloe vera* desde las selvas de Yucatán hasta el istmo de Tehuantepec y de ahí hasta el Valle de Tehuacán en el estado de Hidalgo.

La sábila es fácilmente localizable en su estado silvestre en todo el país pero es más común en los estados de San Luis Potosí, Guanajuato, Hidalgo y Tamaulipas. Sin embargo en nuestro país no se han cuantificado ni delimitado las zonas donde se desarrolla la sábila.

En el país se siembran alrededor de 1,752 hectáreas de sábila de las cuales 780 son de temporal y 972 son cultivos de riego, la sábila suele utilizarse y comercializarse con fines medicinales (CONAZA, 1991). La distribución de la sábila en cultivo se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Hectáreas cultivadas por estado de la República Mexicana. (Kiesling, 1999)

Superficie cultivada de sábila por estados (ha)						
	Riego	%	Temporal	%	Total	%
San Luis Potosí	0	0.0	362	46.4	362	20.7
Tamaulipas	946	97.3	418	53.6	1364	77.9
Nuevo León	13	1.3	0	0.0	13	0.7
Zacatecas	3	0.3	0	0.0	3	0.2
Guanajuato	5	0.5	0	0.0	5	0.3
Chiapas	5	0.5	0	0.0	5	0.3
Total	972	100	780	100	1752	100

3.3. Ecología del nopal *Opuntia ficus* en México

La ecología del nopal es definida como el estudio de las interrelaciones del nopal con otros seres vivos y el desarrollo de este en su hábitat. Los nopales *Opuntia ficus* son plantas que soportan condiciones con muy poca humedad, están tan bien adaptadas a climas áridos y semiáridos que pueden habitar ecosistemas con temperaturas que pueden variar desde los 11°C hasta los 28°C desarrollándose en condiciones óptimas. En la tabla 2 se muestra la clasificación taxonómica del nopal:

Tabla 2. Clasificación taxonómica del nopal *Opuntia ficus*, (Kiesling, 1999).

Clasificación taxonómica nopal	
Reino	<i>Vegetal</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Subdivisión	<i>Magnoliopsida</i>
Clase	<i>Caryophyllidae</i>
Orden	<i>Caryophyllales</i>
Familia	<i>Cactaceae</i>
Subfamilia	<i>Opuntioideae</i>
Tribu	<i>Opuntieae</i>
Género	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>ficus</i>

Los nopales tienen un mejor desarrollo en zonas donde los suelos son alcalinos, de textura arenosa y arena arcillosa, con altos contenidos de sales, por el contrario su desarrollo es pobre en suelos compactos y húmedos.

En la figura 2 se muestran las zonas áridas y semiáridas en el país, son las zonas donde el nopal tiene su mayor capacidad para desarrollarse (SIAP, 2013):



Figura 2. Zonas áridas en la República Mexicana. (SIAP, 2013)

3.4. Ecología de la sábila *Aloe vera* en México

La sábila *Aloe vera* es una planta crasa, de hasta 50 cm de altura, erecto, sin rebrotes, perenne, de hojas arrosetadas y densamente agrupadas, sin manchas y espinosas en sus bordes. Tiene un tallo donde dispone sus flores (inflorescencia), donde presenta muchas flores en racimo. Su ambiente natural son las zonas áridas, sus hábitats predilectos son los arenosos y rocosos costeros, prefiere climas calurosos y secos con temperaturas que estén por encima de los 10 °C, no es una planta tolerante al frío. (Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2012)

Se le considera como una planta suculenta ya que las hojas, el tallo o la raíz se han engrosado para almacenar agua en cantidades mucho mayores que en el resto de las plantas.

El *Aloe vera* tienen un mejor desarrollo en zonas donde los suelos son alcalinos, de textura arenosa y arena arcillosa, con altos contenidos de sales, por el contrario, su desarrollo es pobre en suelos compactos y húmedos. En la tabla 3 se muestra la clasificación taxonómica de la sábila:

Tabla 3. Clasificación taxonómica de la sábila *Aloe vera*.

Clasificación taxonómica sábila	
Reino	<i>Vegetal</i>
División	<i>Embriophyta-siphonogama</i>
Subdivisión	<i>Angiosperma</i>
Clase	<i>Monocotiledoneae</i>
Orden	<i>Liliales</i>
Familia	<i>Liliaceae</i>
Subfamilia	<i>Asfodeloideae</i>
Tribu	<i>Aloinaeae</i>
Género	<i>Aloe</i>
Especie	<i>vera</i>

Con información de *ABMP, 1993*

3.5. Componentes Químicos de las plantas suculentas

3.5.1. Agua

El agua es el principal componente de los géneros *Opuntia* y *Aloe*, aunque la concentración de este depende de la especie, de la humedad del suelo y de la disponibilidad de agua, los reportes de Elizondo, (1979) indican un contenido de agua que va de 79% hasta el 92%.

3.5.2. Sales minerales

Las principales sales que componen a las cactáceas son las sales de calcio y potasio en mayor proporción, aunque también se pueden encontrar, en cantidades más pequeñas, sales de magnesio, sílice, sodio, hierro, aluminio y manganeso, predominan en forma de carbonatos, aunque también se encuentran como cloruros, sulfatos y fosfatos, (Vázquez, 1994).

3.5.3. Celulosa

Este componente se encuentra en su mayor parte en las paredes externas del vegetal, la concentración de celulosa en el género varía dependiendo la especie. Los análisis que se han realizado demuestran que el contenido de fibra cruda (mezcla de celulosa y lignina) en las especies en las que se centra este estudio oscilan entre 11.75% a 37.34% en masa, (Vázquez, 1994).

3.5.4. Mucílagos

Los mucílagos son sustancias similares a las gomas, que en contacto con el agua forman una dispersión viscosa. Estos poseen una propiedad de retención de agua muy importante en las cactáceas. La bibliografía muestra que la concentración másica del mucílago en plantas del tipo suculentas, va desde 1.1% a 4.5%. Los componentes principales del mucílago son: Agua, glucosa y arabinosa en mayor medida y en concentraciones menores, azúcares como galactosa.

3.6. Cascarón de huevo como filtro orgánico

En este proyecto se busca reciclar un deshecho cuantioso que por lo general se desperdicia en todo sentido, el cascarón de huevo. Según datos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos la cáscara del huevo representa en promedio un 11% del peso total del huevo, un huevo pesa en promedio entre 55 y 65 g, en la tabla 4 se indica la composición del huevo y del cascaron.

Tabla 4. Composición química de los huevos. (DAEU, 2004)

Composición química de los huevos					
	%	Agua %	Proteína %	Grasa %	Ceniza %
Huevo entero	100	65.5	11.8	11	11.7
Clara	58	88	11	0.2	0.8
Yema	31	48	17.5	32.5	2
	%	Carbonato de calcio %	Carbonato magenésico %	Fosfato cálcico %	Materia Orgánica %
Cáscara	11	94	1	1	4

El cascarón constituye entre el 9% y el 12% del peso total del huevo, compuesto por carbonato de calcio en un 94% como elemento estructural, con pequeñas cantidades de carbonato de magnesio, fosfato de calcio y otros compuestos.

El cascarón de huevo, constituido en su mayor parte por carbonato de calcio, es un material poroso el cual cuenta en promedio con cerca de 7,000 a 17,000 poros por cascarón. El consumo en México de huevo, según la Unión Nacional de Avicultores, alcanzó 22.5 kg por persona en el año 2012, lo cual quiere decir que por persona, en México se genera una cantidad de 2.4 kg de cascarón de huevo al año y aproximadamente 277 toneladas de cascarón de huevo anual en todo el país. Es una gran cantidad que no tiene un segundo uso y por lo general se desperdicia.

Al cascarón de huevo se le considera un material de desecho, los usos que se le dan después de obtener su contenido (yema y clara) son pocos, algunos ejemplos son: composta, mejorador de suelos, remedios caseros y contener plagas de jardín. El objetivo de este proyecto fue buscar dar un segundo uso a este producto de deshecho.

El carbonato de calcio proveniente del cascarón de huevo se ha comenzado a utilizar como agente adsorbente recientemente, algunos ejemplos de los que se tiene registro es de grupo de científicos antioqueños que utiliza la cáscara del huevo para adsorber metales pesados que contaminan ríos y quebradas, como el cadmio, zinc, mercurio y plomo. Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad superior a la del agua y son altamente tóxicos para el ser humano, son peligrosos debido a su baja degradabilidad química y biológica, pueden permanecer en el ambiente durante un largo periodo de tiempo.

Los estudios ya realizados hablan sobre el mejoramiento de la calidad del agua utilizando aproximadamente 100 g de cáscara de huevo con un litro de agua contaminada teniendo excelente resultados, (Avañé, 2013). En la figura 3 se observa el río Niche de la ciudad de Antioquía, Colombia, que sufre los estragos de la contaminación de la actividad minera en la zona.

Un agente adsorbente es un sólido que tiene la capacidad de retener sobre su superficie agentes contaminantes que se encuentran disueltos en una solución, se caracterizan por una alta área superficial, es decir, son materiales porosos cuya superficie real es mucho mayor a lo que aparenta ser.



Figura 3. Aguas contaminadas con metales pesados, (El mundo, 2013)

3.6.1. Principal componente del cascarón de huevo.

El carbonato de calcio es una materia muy utilizada en la industria con una gran cantidad de usos debido a su bajo costo y a las propiedades de esta materia prima, las mineras lo obtienen proveniente de la pulverización de rocas calizas puras.

El carbonato de calcio tiene varios usos, en términos generales se utiliza como carga para papel (en sustitución del caolín) y plásticos (mejora las propiedades del plástico), en la industria química básica, en la de pinturas y adhesivos, en la del vidrio,

cerámica, para cosmética y en la industria farmacéutica. En las industrias agropecuarias se utiliza para alimentación animal y para el refinado de azúcar, (Anava, 2012)

El nopal *Opuntia ficus*, la sábila *Aloe vera* y el cascarón de huevo son las tres materias primas necesarias en el tratamiento propuesto, en seguida una breve descripción de los rellenos sanitarios y de la producción de los lixiviados:

3.7. Sitios de disposición final

3.7.1. Rellenos Sanitarios

La norma NOM-083-SEMARNAT-2003, en el apartado 4.36 define al Relleno sanitario como: Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales.

3.7.2. Tiraderos a cielo abierto

A todo lo que se conoce como residuo sólido y ya no tiene un segundo uso tiene como fin un sitio de disposición final, estos sitios se han ubicado históricamente en terrenos baldíos, en áreas aledañas a las ciudades o en los océanos, por desgracia aún se continúan practicando este tipo de acciones, los residuos sólidos se suelen depositar a cielo abierto en terrenos donde las condiciones no son adecuadas y la contaminación de agua, tierra y aire se acentúa en esas zonas. En México el 40% de la basura producida en el país se deposita en estas zonas, (SEMARNAT, 2015).

Los terrenos donde se depositan los residuos sólidos sin el acondicionamiento adecuado son denominados “Sitios no controlados”; Un lugar que no cumple con las especificaciones de un relleno sanitario, por lo general suelen ser tiraderos clandestinos y es en estos sitios donde los lixiviados contaminan grandes cantidades de agua subterránea, prolifera la fauna nociva y las enfermedades entre las poblaciones aledañas.

De 37.5 millones de toneladas de basura que se generan al año en el país, 60 por ciento llega a rellenos sanitarios, mientras el resto se va a tiraderos a cielo abierto y hay

alrededor de 7.5 millones de toneladas de desechos cuyo destino se desconoce. Los estados con mayor rezago son Oaxaca, Michoacán y Tabasco, estos estados solo reportan el tratamiento de alrededor del 40% de sus residuos sólidos. Así lo señala el Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (Vanguardia, 2015)

3.8. Lixiviados

La definición que brinda la NOM-083-SEMARNAT-2003, es la siguiente: el Lixiviado es el líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos sólidos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan y dan lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro presenta un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos.

3.8.1. Caracterización de lixiviados

La descomposición y degradación de la materia que compone a los residuos sólidos dentro de un relleno sanitario da origen a materiales, que manejados de manera inadecuada pueden contaminar y ser un riesgo al ambiente y en consecuencia a la salud. La degradación de los residuos sólidos genera desechos en distintas fases, estos se pueden clasificar en dos fases: líquida y gaseosa, en las que se concentran los productos de la descomposición, siendo el lixiviado la mezcla líquida y el biogás la fase volátil; aunque también existen materiales sólidos que se llegan a formar, pero estos siguen permaneciendo en el interior del relleno, por lo tanto no serían fuente de contaminación externa.

La formación del lixiviado se inicia desde que los residuos sólidos urbanos son depositados en el sitio de disposición final y se descomponen debido a la humedad contenida en estos y a los microorganismos presentes. Los componentes orgánicos suelen ser los desechos de alimentos, poda y papel, entre otros, de acuerdo a datos de la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU, 2012) el porcentaje de material orgánico es de aproximadamente del 55%.

La generación de lixiviado en un relleno sanitario es un problema muy complejo, como ya se citó anteriormente, es el resultado de la colación del agua de lluvia a través de las capas que conforman los rellenos, esta se mezcla en su camino con el líquido que se produce por la descomposición de la materia orgánica. Este líquido es contaminado con compuestos orgánicos e inorgánicos debido a sus diferentes propiedades físicas y químicas, estos materiales pueden ser degradados por procesos fisicoquímicos o bioquímicos, además es muy difícil establecer características generales debido a lo heterogéneo que puede resultar la mezcla de los residuos sólidos.

En el lixiviado se pueden tener iones amonio, compuestos orgánicos e inorgánicos, dependiendo del nivel de degradación de los desechos, que pueden estar contenidos en forma disuelta o en suspensión, por su heterogeneidad y complicada composición, la materia suspendida y disuelta puede formar un líquido de composición muy variada y difícil tratamiento, debido a que no existen dosificaciones determinadas de reactivos o la combinación exacta de ellos. Para encontrar una dosis adecuada de reactivos y tiempo se realizan pruebas en el laboratorio.

La degradación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante dos procesos biológicos, que son el aerobio y anaerobio. El proceso aerobio se lleva a cabo desde que son depositados y tapados con el material de cubierta, que básicamente es una arcilla, comúnmente denominado tepetate. La reacción anaerobia inicia cuando la presencia de oxígeno es casi nula y comienza el proceso de generación de metano.

La materia orgánica depositada en un relleno sanitario se puede clasificar en: Materia que se descompone rápidamente, de 3 a 5 años y materia que se descompone lentamente, 50 años o más años. En la tabla 5 se desglosa el proceso químico que sigue la materia orgánica e inorgánica para llegar a formar los lixiviados y el biogás.

Tabla 5. Transformación de los residuos sólidos en biogas y el aporte al lixiviado dentro de un relleno sanitario, (adaptado de Kiss et al., 2000).

Residuos sólidos + H ₂ O		
Compuestos inorgánicos	Compuestos orgánicos.	
	Descomposición y biodegradación.	
	Con oxígeno (fase aerobia).	Sin oxígeno (fase anaerobia).
Reacciones de disolución, hidrólisis.	Reacciones de oxidación, nitrificación.	Reacciones reducción, desnitrificación.
Fe, Cu, Ni, Ca, Cr, etc + NH ₃ OH (iones, cationes y materiales disueltos).	CO ₂ + NO ₂ + H ₂ O + calor (50 a 70°C) + compuestos orgánicos volátiles y solubles.	CH ₄ + CO ₂ + NH ₃ + H ₂ S + compuestos orgánicos volátiles y solubles.
Se produce:		
Fase líquida (Sales disueltas + Compuestos orgánicos solubles).	Fase gaseosa (gases + compuesto evaporados).	Fase líquida (Compuestos orgánicos solubles).
LIXIVIADO	BIOGÁS	LIXIVIADO

3.8.2. Determinación de lixiviados

Los lixiviados pueden ser considerados como un sistema coloidal, ya que las partículas de diversas sustancias y contaminantes se dispersan, en una fase acuosa proveniente de agua de lluvias o del material orgánico presente en los tiraderos a cielo abierto. Las partículas de la fase dispersa son lo suficientemente grandes como para presentar un efecto óptico conocido como efecto Tyndall, pero aun así, las partículas de los contaminantes son demasiado pequeñas como para precipitar.

El cuidado de éstos líquidos es de suma importancia en los tiraderos pues de no llevarse a cabo pueden llegar al agua subterránea permeando el suelo que los contiene y provocando contaminación. Una de las partes fundamentales en el cuidado y seguimiento de estos líquidos es su caracterización, para lo cual se utilizan una serie de

parámetros definidos por su composición compleja y heterogénea que permiten identificar sus propiedades.

La carga orgánica medida como DBO₅ y DQO son dos de ellos, y básicamente la relación que existe entre ambos define en gran medida la biodegradabilidad del lixiviado, esta hace referencia a la capacidad que tiene la sustancia de descomponerse en los elementos químicos que la conforman a través de la acción de elementos biológicos. Según la tabla 6 de índice de biodegradabilidad un lixiviado puede clasificarse como viejo, intermedio o joven según sus características, (Nájera, Castañón, Figueroa y Rojas, 2009).

Tabla 6. Caracterización de lixiviados por índice de biodegradabilidad.

Parámetro	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5-10	>10
Ph	6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg O ₂ /L)	>10,000	4,000-10,000	<4,000
DBO/DQO	>0.3	0.1-0.3	<0.1
Compuestos orgánicos	80% ácidos grasos volátiles (AGV)	5-30% AGV + ácidos húmicos y fúlvicos	Ácidos húmicos y fúlvicos
Metales pesados	Bajo-medio	Bajo	Bajo
Biodegradabilidad	Importante	Media	Baja
Adaptado de Fernández, 2006.			

Para un lixiviado joven se recomienda aplicar tratamientos biológicos, mientras que para un lixiviado viejo se recomiendan tratamientos fisicoquímicos (coagulación, oxidación química), en el tratamiento de lixiviados, la coagulación-floculación se ha empleado como pre tratamiento de los procesos biológicos.

Ahora se describen los principios físicos y químicos más importantes que intervienen en el método implementado para el tratamiento de lixiviados.

3.9. Precipitación Química

La precipitación es un proceso de obtención de un sólido a partir de una disolución. La precipitación puede obtenerse a través de diversos medios químicos y físicos como lo son: una reacción química, con la evaporación de un disolvente volátil, con enfriamiento repentino o con el cambio de la polaridad de una disolución. El proceso fisicoquímico de la precipitación es utilizado para purificar soluciones o para separar el precipitado de la solución, en ocasiones es necesario cristalizar o recristalizar el precipitado para librarlo de impurezas, (Angurell et al, 2014)

La precipitación tiene muy diversos usos en el área industrial y de investigación, se utiliza por lo general en la separación de uno o varios componentes de una mezcla de compuestos, se hace por medio de la diferencia de solubilidad en un disolvente. La precipitación genera floculos que se sedimentan, estos son fácilmente separables a través de procesos físicos como la decantación o la filtración, incluso se utilizan técnicas de purificación más especializadas como lo son: la cristalización o cromatografía en columna para obtener un compuesto puro. La decantación se suele utilizar en el tratamiento de aguas y lixiviados ya que su simplicidad y alto rendimiento lo hacen el sistema de separación físico con un mayor beneficio con respecto al bajo costo de este proceso físico. La decantación puede utilizarse para separar mezclas simples de sólidos y líquidos, cuando no se utilice la filtración, consiste en dejar reposar los sólidos precipitados hasta que descendan y se depositen en el fondo del recipiente.

La precipitación química se define como la formación, por la acción de reactivos apropiados, de compuestos insolubles en una solución con el fin de separar los distintos componentes, por medio de asentamiento gravitacional. Los reactivos apropiados para alterar la solubilidad de los componentes de la solución se conocen como precipitantes, floculantes o coagulantes, el fin de estos agentes es el mismo, (Orellana, 2013)

La precipitación química fue uno de los primeros tratamientos fisicoquímicos utilizados en el proceso de aguas residuales, (Schulz, 1991).

Existen ciertos procesos que se han establecido como los de mayor eficiencia en el tratamiento de aguas y lixiviados, que por su eficacia y bajo costo son los de más utilizados actualmente, dos ejemplos: en el primer caso, el de la precipitación cristalina de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} y, en el segundo caso, la precipitación con hidróxidos metálicos.

Actualmente existe una gran cantidad de agentes de precipitación que son de origen químico y por lo general forman grandes volúmenes de lodos contaminados y de difícil disposición. La eficiencia que se obtiene en el tratamiento de precipitación química depende de la concentración de los agentes floculantes en la solución contaminada y del cuidado con que se controle el proceso. Por medio de la precipitación química se puede tener como resultado un efluente limpio, sin material en suspensión en el agua o estado coloidal. La precipitación química en tratamiento de aguas se utiliza para:

- Eliminación de iones calcio y magnesio (dureza)
- Eliminación del silicio

3.10. Floculación, coagulación y sedimentación

La floculación-coagulación funciona como tratamiento de aguas y lixiviados de manera que las partículas suspendidas en la solución también conocidas como material coloidal, que se encuentran finamente divididas y dispersas en el seno de la solución, se aglomeren, provocando que las partículas se unan y formen una de mayor masa. Los coloides se mantienen en suspensión o estabilizados debido a la hidratación de los compuestos.

Se le llama hidratación al fenómeno físico donde las superficies de las partículas están rodeadas de moléculas de agua, lo que genera que la gravedad específica de las partículas sea muy parecida a la del agua. Con una densidad tan similar y teniendo un equilibrio por repulsión electrostática las partículas se mantienen en suspensión.

La densidad específica de un material es la relación de la densidad del material entre la del agua.

A menudo las sustancias que son removidas mediante la floculación-coagulación son aquellas que causan las propiedades de turbidez en las soluciones, en el caso de los lixiviados estas sustancias son las causantes de las propiedades, como lo son: mal olor, turbidez, pH ácido, etc.

La precipitación química es un proceso de tres pasos y consiste de coagulación, floculación y sedimentación. Con información de Petroleum and Petrochemical Services, 2014, se obtuvieron las siguientes definiciones:

Coagulación

Primera etapa del proceso de sedimentación, las fuerzas que existen entre las partículas son disminuidas o anuladas, es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales debido a la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de energía de mezclado. La mezcla rápida permite la dispersión del agente coagulante y el choque de las partículas suspendidas que irán formando grupos más grandes y de mayor peso.

Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los floculos recién formados para aumentar el tamaño y peso de las partículas a sedimentar. Estos floculos inicialmente pequeños al juntarse forman aglomerados mayores que son capaces de sedimentar.

Sedimentación

El último paso en el proceso es la sedimentación. Durante la sedimentación los sólidos caen libremente por gravedad al fondo del recipiente y pueden ser separados de la solución fácilmente por decantación.

El tratamiento en aguas y lixiviados se suele realizar utilizando hidróxido de sodio, compuestos de sulfato o sulfuros, cuando se agregan este tipo de compuestos en aguas residuales o contaminadas, las sales forman hidróxidos de metal o sulfuros de metal con los metales que se encuentran en el agua.

3.11. Dureza del agua

Se le conoce como aguas duras a las aguas con alto contenido de sales de Ca^+ y Mg^+ , la concentración de estas aguas duras se suele dar en equivalentes de carbonato de calcio, la concentración a la cual se considera un agua como “dura” es de 120 mg de CaCO_3/L .

En el tratamiento de aguas y lixiviados se pueden utilizar sales de Calcio o Magnesio que pueden causar endurecimiento del agua. Algunos de los métodos más comunes para tratamiento de agua son a base de cal. Se le denomina cal a todos los materiales que tengan como base de su composición al óxido de Calcio (CaO) y óxido de calcio y magnesio (CaMgO_2), la solubilidad de estos compuestos suele ser muy limitada, (Alvarado, 2009).

3.12. Filtros Orgánicos

3.12.1. Filtración

La filtración es uno de los diversos procesos físicos para la separación de mezclas de dos fases, líquida y sólida, esta se realiza con la ayuda de un material poroso llamado filtro. Esta técnica consiste en verter la mezcla sólido-líquido en el filtro, este material poroso permitirá solamente el paso del líquido y no del sólido, reteniendo las partículas suspendidas en la mezcla. El filtro suele ser un material poroso que permita el paso de líquidos, siempre es necesario seleccionar la porosidad del filtro de acuerdo al diámetro de partícula que se quiere separar.

3.13. Adsorción

La adsorción es un fenómeno físico superficial, las sustancias que se adsorben no son introducidas dentro de un cuerpo sino que quedan concentradas en la superficie de un cuerpo poroso, depositándose en las irregularidades. Por lo general se considera la adsorción como un proceso físico donde se busca separar un componente en solución a través de un sólido poroso. Los agentes que se utilizan para realizar este proceso suelen tener un área superficial muy grande, el mejor ejemplo de la adsorción es el carbón activado. En tratamiento de aguas y lixiviados las moléculas suspendidas más pequeñas quedaran unidas físicamente a la superficie del agente sólido poroso que adsorba, para

el caso de nuestro proyecto fue el cascarón de huevo acomodado en un cartucho en un embudo de porcelana. El proceso de la adsorción se llevó a cabo en tres distintos pasos:

- 1) Macro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de macro poros del cascaron de huevo.
- 2) Micro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de micro-poros del cascaron de huevo.
- 3) Absorción: Adhesión física del material orgánico a la superficie del cascaron de huevo en los meso poros y micro poros del cascaron de huevo, (Lenntech, 2012)

La eficiencia del proceso dependió en gran medida de las condiciones a las cuales se lleve el proceso: temperatura, solubilidad del soluto en el solvente, polaridad del soluto, concentración del soluto, etc.

3.14. Normatividad relativa al tratamiento de lixiviados.

La normatividad acerca de lixiviados entra en la protección al medio ambiente en las diversas normas. El tratamiento legal tiene una jerarquía, primero se hace referencia a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la cual tiene como fin el salvaguardar nuestros derechos constitucionales, continuamos con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente la cual aterriza las ideas plasmadas en la Constitución, reglamentándolas con todo lo referente a las disposiciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, por último nos encontramos a las Normas Oficiales Mexicanas que marcan los protocolos y lineamientos dispuestos por la ley.

Sobre el tratamiento de lixiviados concretamente tenemos a la NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual se apoya en la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, para cumplir con los lineamientos de manera que el lixiviado sea descargado y tratado a un bien nacional o para su reúso, de acuerdo a los parámetros que estas exigen (Alcántar, 2015).

A continuación se muestra un recuento de la normativa mexicana referente a la protección del medio ambiente, al tratamiento de residuos sólidos urbanos y al tratamiento de lixiviados:

3.14.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Artículo 27: “La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales... cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana... mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico...”;

Artículo 4º: “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley”.

Párrafo adicionado DOF 28-06-1999. Reformado DOF 08-02-2012

“Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines”.

Párrafo adicionado DOF 08-02-2012

Artículo 115. “Los estados adoptarán, para su régimen interior, la forma de gobierno republicano, representativo, democrático, laico y popular, teniendo como base de su división territorial y de su organización política y administrativa, el municipio libre, conforme a las bases siguientes:”

III. Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:

Párrafo reformado DOF 23-12-1999

a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales;

Inciso reformado DOF 23-12-1999

c) Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos;

Inciso reformado DOF 23-12-1999

3.14.2. Ley General del Equilibrio ecológico y la Protección Ambiental.

Artículo 1º.- La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

I.- *Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar;*

III.- *La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;*

Artículo 3º.- *Para los efectos de esta Ley se entiende por:*

III.- *Aprovechamiento sustentable: La utilización de los recursos naturales en forma que se respete la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas de los que forman*

XXXII.- *Residuo: Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó;*

Artículo 7º.- *Corresponden a los Estados, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:*

VI.- *La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley;*

Artículo 120.- *Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local:*

VI. *Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos; y*

VII.- *El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua.*

Fracción reformada DOF 13-12-1996

Artículo 121.- *No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.*

Artículo 134.- *Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:*

- I. *Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;*
- II. *Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;*
- III.- *Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;*

Fracción reformada DOF 13-12-1996

Artículo 135.- *Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:*

- I. *La ordenación y regulación del desarrollo urbano;*
- II. *La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;*
- III.- *La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen.*

Fracción reformada DOF 13-12-1996

IV. *El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.*

Artículo 136.- *Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:*

- I. *La contaminación del suelo;*
- II. *Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;*

Artículo 137.- *Queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que*

resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales. La Secretaría expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales.

Artículo reformado DOF 13-12-1996

Artículo 138.- La Secretaría promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para:

I. La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales; y

II. La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras.

Artículo 139.- Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

Artículo reformado DOF 13-12-1996

Artículo 140. La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Economía.

Artículo reformado DOF 13-12-1996, 09-04-2012

3.14.3. Normas Oficiales Mexicanas.

NOM-001-SEMARNAT-1996 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, incluyendo a los lixiviados. Estableciendo el conjunto de parámetros físicos, químicos, biológicos y los niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, con el fin de preservar y controlar la calidad de las aguas conforme a la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno₅, nitrógeno total, fósforo total, temperatura y pH, entre otras consideraciones.

NOM-002-ECOL-1996 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado. La tabla 6 presenta los parámetros permisibles para la NOM-002-ECOL-1996, está y otras normas oficiales ayudaron a definir los límites que el lixiviado superó con el tratamiento propuesto.

Tabla 7. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas (fragmento NOM-002-SEMARNAT-1996)

Límites máximos permisibles			
Parámetros	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites (mg/L)	50	75	100
Sólidos sedimentables (mg/L)	5	0.75	10

El intervalo permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 a 5.5, determinado para cada una de las muestras simples. Las unidades de pH no deben de estar fuera del intervalo permisible en ninguna de las muestras simples.

Los límites máximos permisibles para los parámetros demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, que debe cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

NOM-003-SEMARNAT-1997, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, es de carácter obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.

Ya que no existe ninguna norma específica para lixiviados se tomarán estas normas como referencia.

La tabla 8 muestra los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas.

Tabla 8. Límites máximos permisibles de contaminantes en agua tratada según la NOM-001-SEMARNAT-1996

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales. (UFC/100 mL)	Huevos de helminto. (h/L)	Grasas y aceites. (mg/L)	DBO. (mg/L)	SST. (mg/L)
Servicios al público con contacto directo	240	<1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	<5	15	30	30

El agua residual tratada reusada en servicios al público no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

NOM-083-SEMARNAT-2003, Esta norma establece las especificaciones de selección del sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, se establece que se debe elaborar un programa de monitoreo del lixiviado, que tenga como objetivo conocer sus características de Potencial de Hidrógeno (pH), DBO₅, DQO y metales pesados; elaborar un programa de monitoreo por un periodo de al menos 20 años, este periodo puede ser reducido si se demuestra que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente.

4. METODOLOGÍA.

La metodología del proyecto se dividió en tres fases, las cuales fueron: I) Estudio de gabinete, sobre tratamientos alternativos a lixiviados realizados con anterioridad, tratamientos a lixiviados aplicados en la actualidad y estudios realizados en el sitio de muestreo, II) Muestreo en campo, se describe la zona donde se realizaron los muestreos y el procedimiento para obtener las muestras, III) Análisis en laboratorio, donde se describe el trabajo realizado para la obtención de las muestras y su posterior análisis, esta fase se divide en tres etapas: a) Caracterización de los lixiviados a tratar provenientes del RSBP, b) Obtención de los floculantes para el tratamiento del lixiviado, el cual se obtuvo de las plantas *Aloe vera* y *Opuntia ficus*, para obtenerse en base seca serán sometidos a un proceso de deshidratación, con la ayuda de un deshidratador solar seguido de un proceso de molienda para ambos tipos de floculantes, base seca y base húmeda, c) Aplicación de la metodología propuesta, se dio el tratamiento con sábila *Aloe vera* y nopal *Opuntia ficus* a los lixiviados caracterizados, en sus dos versiones: base seca y base húmeda del floculante a utilizar, como primer paso, enseguida se utiliza el filtro con cáscara de huevo como segundo paso, midiendo al final del tratamiento las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del fluido resultante ya antes expuestas además de un ensayo de jarras para conocer la eficiencia de los floculantes.

4.1. Fase 1. Estudio de gabinete.

Como principio del proyecto se buscó recopilar toda la información referente a estudios realizados para el tratamiento de lixiviados o aguas residuales en general y después más específicamente en el tratamiento de lixiviados a través de las plantas *Aloe vera* y *Opuntia ficus*, con respecto a la segunda ya se tiene antecedentes en el tratamiento de aguas residuales, con *Aloe vera* no se encontraron reportes de haber sido utilizada con este fin anteriormente, y ninguna de las dos plantas se han utilizado con la ayuda de un filtro para separar los lodos sedimentados y pequeñas partículas suspendidas, como se planeó hacer en este proyecto.

La finalidad del proyecto es tener un proceso eficiente y económico que cubra totalmente el tratamiento de lixiviados, un proceso completo.

4.1.1. Ubicación del relleno sanitario

El RSBP se localiza en los límites del Estado de México con el Distrito Federal en la zona federal del lago de Texcoco, por lo tanto los residuos depositados en este relleno provienen de todas partes de la Ciudad de México y el 25% de municipios del Estado de México colindantes a la zona. Al encontrarse a las afueras de la ciudad se encuentra relativamente cerca al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, del Periférico Oriente Río de los Remedios y de la colonia Impulsora Avícola, además se encuentra peligrosamente cerca al sur, al brazo derecho del Río Churubusco.

El RSBP se divide en cuatro etapas las cuales forman cuatro terrenos distintos en el mismo predio, estos fueron condicionados por separado en distintos tiempos y se les dio un tratamiento similar, cada etapa cuenta con una base de material llamado tepetate y una geomembrana para evitar el paso de lixiviados al subsuelo. En la figura 4 se ilustra el terreno que conforma al RSBP.



Figura 4. Ubicación del RSBP.

4.1.2. Delimitación del área de estudio.

Los resultados obtenidos en la etapa de estudio de gabinete se muestran en el marco teórico, además de datos e información que se utilizó para realizar la experimentación.

Para obtener una referencia sobre concentraciones de nopal *Opuntia ficus* y sábila *Aloe vera* se buscaron trabajos similares hechos con anterioridad y se obtuvieron del trabajo “Evaluación de la tuna (*Opuntia cochinellifera*) para la remoción de color en agua potable”, las concentraciones de 40% y 70% de floculante con respecto a la muestra de agua potable con relación volumen/volumen, para el presente trabajo se utilizaron las concentraciones intermedias de 35%, 45% y 55% de floculante base húmeda con respecto al lixiviado, relación volumen/volumen y de 35%, 45% y 55% de floculante base seca con respecto al lixiviado, relación masa/masa.

Fueron importantes los datos sobre la caracterización de lixiviados en RSBP y como han cambiado sus propiedades fisicoquímicas a través del tiempo, esto es un antecedente de relevancia en el proyecto que indica que esperar de la composición y características del lixiviado a tratar con los floculantes, el nombre del estudio referenciado es “Estudio de la evolución del lixiviado generado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente” (Alcantar, 2015).

En el RSBP, una fracción del lixiviado que se forma por la reacción (descomposición), arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos sólidos urbanos es transportado por camiones cisterna para ser evaporados en una laguna, también es recirculado en los alrededores del propio relleno a través de un canal, para reincorporar la humedad requerida por los residuos orgánicos, humedad necesaria para que comience la descomposición de los residuos orgánicos.

4.1.3. Estudios de caracterización de lixiviado en relleno sanitario Bordo Poniente

Para este proyecto se decidió utilizar un lixiviado de la tercer etapa del relleno sanitario, con características de un DQO (mgO_2/L) $>10,000$ para obtener los resultados más favorables en nuestro estudio, según los resultados consultados, los lixiviados jóvenes se encuentran en la etapa IV del RSBP.

4.2. Fase 2. Muestreo en campo.

4.2.1. Método de muestreo



Figura 5. Condiciones del cárcamo en la etapa III del relleno sanitario Bordo Poniente. Fotografía por Rafael Rivera, 2015.

La norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 para límites máximos permisibles en aguas, indica buenas prácticas y requisitos esenciales que un método aceptado debe de seguir, cualquiera que sea el método de muestreo específico que se aplique a cada caso. La NOM mencionada hace recomendaciones de acuerdo al lugar

de donde se obtengan las muestras, las de este trabajo fueron obtenidas en un cárcamo o colector del RSBP.

El RSBP, aunque ya no funciona más como tal, se encuentra clausurado y empresas privadas tratan el material ahí depositado. El RSBP se extiende sobre tierras del lago de Texcoco, en la tabla 9 se muestran las dimensiones de las etapas del Bordo Poniente. En la temporada de lluvias se puede encontrar agua a escasos centímetros de la tierra superficial, este relleno cuenta con su propio invernadero con el que se reforesta el área.

Tabla 9. Superficie que ocupa el RSBP en cada una de sus cuatro etapas y el periodo en el que estuvo en operación.

Etapas	Superficie total	Superficie efectiva de operación, área de disposición	Cantidad de residuos recibidos en toda su vida útil	Periodo de operación
	(Ha)	(Ha)	(toneladas X 10 ⁶)	
1 ^a	75	63.58	3.8	Feb. 1985 – jul. 1988
				Feb. 1991 – jun. 1992
2 ^a	80	64.1	3.4	Jul. 1988 – jul. 1991
				Feb. 1993 – jun. 1994
3 ^a	104	102.66	6.9	Ago. 1991 – nov. 1994
4 ^a	412	351.33	68.78	Nov. 1994 – dic. 2011

Tabla con información de DGSU/DTDF/SODF/JUDSDF, 2014.

4.2.2. RSBP

En 1992 el Gobierno del distrito Federal pactó con la Secretaría de agricultura y recursos Hidráulicos un convenio para la construcción en terrenos federales del Lago de Texcoco para el aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos. El Gobierno del Distrito Federal pactó además que la construcción del Relleno Sanitario se haría en términos del numeral 4 de las “Reglas Técnicas y de Operación” donde se refiere que el relleno sanitario requiere de un diseño básico para su correcta operación, considerando los procesos de: construcción, operación, clausura y saneamiento. En la figura 6 se muestra el estado actual del relleno sanitario y los cárcamos para la recolección de lixiviados.



Figura 6. Panorámica relleno sanitario Bordo Poniente etapa III.

En Septiembre del 2004 la SEMARNAT resolvió el cierre de la IV Etapa del RSBP, en un plazo de 3.85 años, mismo que se cumplió el 31 de Julio de 2008 (Firma del convenio de coordinación para el cierre y clausura definitiva, 2013).

El relleno sanitario Bordo Poniente es el de mayor tamaño en América Latina y es por mucho el mayor pasivo ambiental de México con 70 millones de toneladas de basura enterradas, 1.5 millones de toneladas de gas metano que buscan salir a la superficie y lagunas de lixiviados estancados sobre el acuífero profundo del lago de Texcoco, como se observa en las imágenes de la figura 7.



Figura 7. Muestreo de lixiviados en relleno sanitario Bordo Poniente.

4.3. Fase 3. Análisis en el laboratorio

4.3.1. Etapa a) Caracterización de los lixiviados a tratar provenientes del relleno sanitario Bordo Poniente.

Los lixiviados obtenidos en el Relleno Sanitario Bordo Poniente fueron sometidos a la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas para su debida caracterización:

- **Pruebas Fisicoquímicas**

Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas analizadas y las normas oficiales de referencia.

Propiedad	Método empleado
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011
Conductividad	NMX-AA-093-1984
DQO	NMX-AA-030/1-SCFI-2012
DBO5	NMX-AA-028-SCFI-2001

- **Pruebas microbiológicas**

La detección y cuantificación de todos los microorganismos patogénicos potencialmente presentes en el agua demanda tiempo, los costos son elevados y no siempre se obtienen resultados positivos o que confirmen la presencia de los microorganismos. El objetivo de la prueba microbiológica del agua es proveer información sobre la ausencia de riesgo de ingestión de microorganismos causantes de enfermedades, mayormente provenientes de la contaminación por excrementos humanos y de otros animales de sangre caliente. Vale resaltar que los microorganismos presentes en aguas naturales son, en su mayoría, inofensivos a la salud humana. Pero en la contaminación por desecho sanitario están presentes microorganismos que podrán perjudicar la salud humana. Los microorganismos patogénicos incluyen virus, bacterias, protozoarios y helmintos.

El agua potable no debe contener microorganismos patogénicos y debe estar libre de bacterias indicadoras de contaminación fecal. Las aguas residuales y lixiviados tratados pueden ser utilizados como aguas de riego si contienen cantidades pequeñas de microorganismos según la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúnen en servicios al público. Para evaluar el desempeño de los floculantes nopal *Opuntia phicus* y *Aloe vera* se tomarán las bacterias de referencia.

Ese grupo de bacterias ha sido elegido como indicador de contaminación del agua debido a los siguientes factores:

* Están presentes en el excremento de animales de sangre caliente, incluso de los seres humanos.

- * Son de fácil detección y cuantificación por medio de técnicas sencillas y económicamente viables, en cualquier tipo de agua.
- * Su concentración en el agua contaminada está directamente relacionada al gradiente de contaminación fecal.
- * El tiempo de sobrevivencia en el agua es mayor que las bacterias patogénicas intestinales, por ser menos exigentes en términos nutricionales, además de ser incapaces de multiplicarse en ambiente acuático o multiplicarse menos que las bacterias entéricas.
- * Son más resistentes a los agentes tensoactivos y agentes desinfectantes que a las bacterias patogénicas.

Mediante aplicación de pruebas microbiológicas y fisicoquímicas a los lixiviados, se buscó comprobar que la aplicación del nopal *Opuntia ficus* y la sábila *Aloe Vera*, como coagulantes alternativos pueden ofrecer un enfoque adecuado para el tratamiento de aguas a un nivel doméstico rural, ya que esta tecnología se ayuda de mano de obra y materiales locales, sin ningún grado de industrialización y a un bajo costo, lo que podría contribuir a afianzar las tecnologías sustentables de tratamiento de aguas.

Determinación Coliformes Totales. A través de la norma NOM-113-SSA1-1994 para el conteo de microorganismos coliformes totales en placa.

Determinación Coliformes Fecales. A través de la norma NOM-113-SSA1-1994 para el conteo de microorganismos coliformes totales en placa.

Determinación Bacterias Heterotróficas. Recuento heterotrófico en placas (Reasoner, 2014)

4.3.2. Etapa b) Obtención de los floculantes para el tratamiento del lixiviado

La etapa b) corresponde a la obtención de los floculantes, estos se utilizó en dos pruebas generales: los floculantes que se obtuvieron en base húmeda y los que se obtuvieron en base seca, a su vez estas dos pruebas se harán para los dos tipos de vegetales: nopal *Opuntia ficus* y sábila *Aloe vera* esto con el fin de encontrar cual de cada uno de estos cuatro floculantes tendrá una mayor eficiencia en la eliminación de material suspendido y microorganismos en los lixiviados.

- **Deshidratador solar**



Figura 9. Deshidratador solar en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

Para la obtención de los floculantes en base seca se pasó a las plantas por un proceso de deshidratación, el objetivo de este proyecto es tener un proceso ecológico que no produzca emisiones de CO₂ o en su defecto que las minimice, para alcanzar ese objetivo se trabajó con la ayuda de un secador solar el cual consiste de una caja de madera, de dimensiones 116 cm x 74 cm cerrado con caras laterales de sección trapezoidal de 34 cm a 30 cm respectivamente, un aislante en las paredes de la caja el cual es poli estireno expandido. El secador cuenta con láminas reflectantes colocadas en las paredes internas de la caja de madera, la tapa superior de la caja también está forrada con lámina delgada de aluminio calibre 16, en la figura 9 se muestra el deshidratador como estuvo en funcionamiento en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

- Metodología para la obtención del polvo seco de nopal *Opuntia ficus* y sábila *Aloe Vera* (Base seca)



Figura 10. Corte de los cladodios del nopal y sábila para maximizar el proceso de secado.

La penca del nopal *Opuntia ficus* y la de la sábila *Aloe vera* se someten a una operación de lavado, utilizando solamente agua con el fin de retirar impurezas.

Una vez lavado se procedió al corte de la penca en forma cuadrangular-rectangular, aproximadamente de 3 centímetros por lado, con la intención de generar una mayor superficie de secado como se observa en el figura 10.

Al tener el nopal *Opuntia ficus* y la sábila *Aloe vera* cortados en trozos pequeños, se pusieron en charolas de aluminio con motivo de generar una mayor reflexión de los rayos solares como se muestra en la figura 11 y de esta forma aprovechar al máximo este recurso natural, en las charolas se pusieron 250 gramos de nopal *Opuntia phicus* o sábila *Aloe vera* según sea el caso, cada una, con el fin de ver el rendimiento en el proceso de secado.



Figura 11. Materia prima lista para comenzar proceso de secado.

Ya preparadas las charolas, se procedió a colocarlas en el desecador solar, tecnología desarrollada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM de diseño único, como se observa en la figura 12, el desecador solar se debe exponer directamente a los rayos del sol para obtener maximizar resultados.

Dependerá de la intensidad solar el tiempo que los floculantes vegetales estarán en el desecador, ya que si el clima es nublado o lluvioso, este proceso tardará más tiempo, por lo que el criterio utilizado para saber cuándo los floculantes mencionados están listos para el siguiente proceso será cuando el cambio en peso de las charolas sea muy pequeño, es decir, cuando perdió la mayor cantidad de agua. En la figura 13 se muestra el nopal *Opuntia ficus* y la sábila *Aloe vera* deshidratados, siendo notorio el cambio en el tamaño de los cuadros al inicio y al final del proceso.

Después del secado del nopal *Opuntia ficus* y la sábila *Aloe vera*, se observó una disminución en el tamaño, ya que cada cladodio tiene una humedad de más del 90%, se retiraron del desecador solar las charolas y con la ayuda de un molino se obtuvo el polvo seco de los cladodios del nopal tal como se aprecia en la figura 13.



Figura 12. Proceso de secado para la obtención de polvo seco de nopal utilizando un desecador solar.



Figura 13. Proceso de secado terminado.

4.3.3. Etapa c) Tratamientos de lixiviado.

En esta etapa se planteó llevar a cabo el tratamiento completo de los lixiviados, desde la etapa de obtención de los lixiviados en el relleno sanitario hasta la obtención de resultados de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas, después de haber efectuado el proceso con floculantes y filtro orgánico. En la figura 14 se muestra la forma en que se transportaba el lixiviado del Bordo Poniente al Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



Figura 14. Muestra de lixiviados recién extraídos del cárcamo en relleno sanitario Bordo Poniente.

- **Primer paso. Caracterización de lixiviados:
Parámetros fisicoquímicos**

pH.

Conductividad.

Sólidos sedimentables (Tubos Imhoff).

DBO₅ (Demanda biológica de oxígeno en cinco días).

DQO (Demanda química de oxígeno).

Pruebas microbiológicas

Coliformes fecales.

Coliformes totales.

Bacterias Heterotróficas.

Las pruebas para caracterización de lixiviados se hicieron el mismo día de la recolección de la muestra, a temperatura y presión ambiente, los análisis de DBO₅ y DQO fueron realizados en laboratorios particulares Intertek. Las pruebas de pH y conductividad eléctrica se realizaron a través del medidor de pH, marca *Delta* modelo HD 9212 utilizado en análisis clínicos, en el lixiviado en cuanto arribó al laboratorio al igual que las pruebas para sólidos sedimentables.

En las pruebas microbiológicas se efectuaron cinco diluciones para cada tipo de prueba en medios de cultivo para cada tipo de prueba en particular, en la tabla 12 se especifican las diluciones realizadas por tipo de muestra.

Tabla 11. División de las muestras para pruebas microbiológicas.

Coliformes fecales	Coliformes totales	Bacterias heterotróficas.
Muestreo con cinco diluciones comenzando con un mililitro de lixiviado en solución patrón con nutrientes.	Muestreo con cinco diluciones comenzando con un mililitro de lixiviado en solución patrón con nutrientes.	Muestreo con cinco diluciones comenzando con un mililitro de lixiviado en solución patrón con nutrientes.

Las muestras de coliformes fecales se dejaron en la incubadora durante 24 horas a una temperatura de 45 °C en un baño de agua caliente con agitación y a una temperatura de 35°C para los coliformes totales y bacterias heterotróficas, para posteriormente realizar un conteo en placa de las colonias de bacterias características.

- **Segundo paso. Prueba de jarras.**

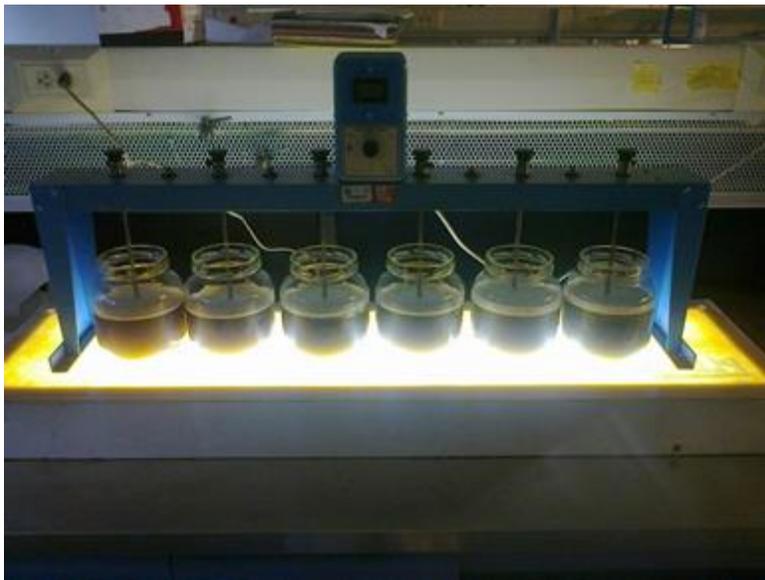


Figura 15. Prueba de jarras en el LIA del Instituto de Ingeniería.

Las pruebas de jarras es un procedimiento común para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento para el tratamiento de aguas residuales. Este método permite realizar ajustes en el pH, las variaciones en las dosis del coagulante, velocidades de mezclado a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala.

Esta prueba es la parte del proceso que consiste en tratar seis muestras de un litro con agitación y agentes floculantes a distintos tiempos. En la figura 15 se muestran las jarras con capacidad de 1 litro y el equipo donde se realizaron las pruebas, este cuenta con una lámpara en la base que permite observar más claramente las partículas suspendidas en el lixiviado, además de agitadores de paleta para cada jarra. El equipo utilizado es para seis jarras marca *Phipps and Bird*, modelo 7790-400.

- **Prueba de jarras con nopal *Opuntia phicus***

*Relación: Porcentaje masa nopal/ masa lixiviado, correspondiente a un porcentaje determinado.

*Nopal *Opuntia ficus* base húmeda se refiere a la solución preparada con nopal en trozos reposando en agua para extraer el mucilago durante dos días en relación 1:1, masa del nopal *Opuntia ficus*:masa agua.

*Nopal base seca se refiere al nopal después del tratamiento de secado en un secador solar fabricado dentro del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el nopal *Opuntia ficus* fue expuesto durante 5 días al sol en el secador y se observó que la masa de los nopales *Opuntia ficus*, dispuestas en charolas de 250 g, cada una disminuyó a 20.166 g en promedio, esto representa una disminución del 91.94% de la masa del nopal, por lo tanto la cantidad de nopal *Opuntia ficus* utilizado en las pruebas de jarras en base seca y base húmeda fue proporcional. Considerando una densidad del mucílago aproximada a 1.2 g/mL, (Aquino, 2015), un litro de mucílago fue equivalente al peso, en base seca de 96.7 g de nopal, el cual fue triturado con la ayuda de un procesador de alimentos y utilizado en la prueba de jarras que se observa en la figura 16.



Figura 16. Prueba de jarras utilizando sábila *Aloe vera* en base húmeda y seca.

En la tabla 12 Se muestran las concentraciones utilizadas en el ensayo de jarras para cada tipo de tratamiento con el floculante de nopal *Opuntia phicus*, además muestra el periodo de agitación por el que debe pasar la muestra, después de la coagulación y floculación las muestras pasan a un periodo de 30 minutos de sedimentación sin agitación.

Tabla 12. Concentraciones utilizadas en el ensayo de jarras para cada tipo de tratamiento con el floculante de nopal *Opuntia ficus*.

	jarra 1	Base húmeda			Base seca		
		jarra 2	jarra 3	jarra 4	jarra 5	jarra 6	jarra 7
Tratamiento	Sin adición de floculantes	Adición de floculante nopal 35/65 volumen	Adición de floculante nopal 45/55 volumen	Adición de floculante nopal 55/45 volumen	Adición de floculante nopal 35/65 masa	Adición de floculante nopal 45/55 masa	Adición de floculante nopal 55/45 masa
Masa floculante (g)	0	—	—	—	33.9	43.5	60.81
Volúmen floculante (ml)	0	350	450	550	—	—	—
Coagulación, Agitación 300 rpm (min)	1	1	1	1	1	1	1
Floculación, Agitación 40 rpm (min)	15	15	15	15	15	15	15

En la coagulación se desestabilizan las partículas coloidales a partir de la adición del floculante.

La floculación es el segundo paso y genera la aglomeración de las partículas desestabilizadas.

- **Prueba de jarras con sábila *Aloe vera***



Figura 17. Prueba de jarras utilizando sábila *Aloe vera* en base húmeda y seca.

*Relación: Porcentaje volumen sábila *Aloe vera* /porcentaje volumen lixiviado.

*Sábila base húmeda: se refiere al mucílago extraído directamente de las pencas. De acuerdo a las mediciones que se realizaron el mucílago de la sábila tiene una densidad de aproximadamente de 1.1 g/mL.

*Sábila base seca: se refiere a la sábila después del tratamiento de secado en un secador solar fabricado dentro del Instituto de Ingeniería de la UNAM, la sábila fue expuesta durante 5 días al sol en el secador y se observó que la masa, dispuestas en charolas de 250 g, cada una disminuyó a 69.83 g en promedio, esto representa una disminución del 72% de la masa de la sábila, por lo tanto la cantidad de sábila en base seca y base húmeda utilizado en el ensayo de jarras será proporcional. Es importante aclarar que la sábila se sometió a un proceso de deshidratación sin extraer la cutícula y de esta manera fue triturada en un procesador de alimentos, por lo tanto añadirá color a la muestra de lixiviados por la clorofila existente en la cutícula ya mencionada, un efecto no deseado

en el proceso. Estos floculantes fueron utilizados en la prueba de jarras que se observa en el figura 17.

En la tabla 13. Se muestran las concentraciones utilizadas en el ensayo de jarras para cada tipo de tratamiento con el floculante de sábila *Aloe vera*, además muestra el periodo de agitación por el que debe pasar la muestra, después de la coagulación y floculación las muestras pasan a un periodo de 30 minutos de sedimentación sin agitación.

Tabla 13. Concentraciones utilizadas en el ensayo de jarras para cada tipo de tratamiento con el floculante de sábila *Aloe vera*.

	Base húmeda				Base seca		
	jarra 1	jarra 2	jarra 3	jarra 4	jarra 5	jarra 6	jarra 7
Tratamiento	Sin adición de floculantes	Adición de floculante sábila 35/65 volumen	Adición de floculante sábila 45/55 volumen	Adición de floculante sábila 55/45 volumen	Adición de floculante sábila 35/65 masa	Adición de floculante sábila 45/55 masa	Adición de floculante sábila 55/45 masa
Masa floculante (g)	0	—	—	—	107.8	138.6	193.6
Volúmen floculante (ml)	0	350	450	550	—	—	—
Coagulación, Agitación 300 rpm (min)	1	1	1	1	1	1	1
Floculación, Agitación 40 rpm (min)	15	15	15	15	15	15	15

En la coagulación se desestabilizan las partículas coloidales a partir de la adición del floculante.

La floculación es el segundo paso y genera la aglomeración de las partículas desestabilizadas.

- **Tercer paso. Filtro con cáscara de huevo.**

Una vez realizadas las pruebas de jarras el siguiente paso es utilizar el sobrenadante que se obtenga después de la sedimentación de cada una de las jarras tratadas y hacerlo pasar por un filtro, que consta de un matraz (recipiente) y un embudo de porcelana relleno de cáscara de huevos como se puede observar en la figura 18, cuya composición es rica en carbonato de calcio, útil para retener partículas suspendidas . Una cantidad de 500 mL, de sobrenadante se pasó a través de las cáscaras de huevo, que fueron trituradas hasta llegar a tener un tamaño de partícula de 0.5 cm, y filtradas a su paso. La cáscara de huevo tuvo este tamaño de partícula para evitar la formación de espacios vacíos entre ellas. Todas las muestras presentes en las jarras fueron sometidas a este proceso.



Figura 18. Filtro de huevo en funcionamiento.

- **Cuarto paso. Caracterización de lixiviados post tratamiento.**

Aplica para los lixiviados que recibieron un tratamiento con los flocculantes vegetales

Pruebas fisicoquímicas

pH.

Conductividad.

Sólidos sedimentables (Tubos Imhoff).

DBO₅ (Demanda biológica de oxígeno en cinco días).

DQO (Demanda química de oxígeno).



Figura 19. Pruebas de sólidos sedimentables de Imhoff.

Las pruebas fisicoquímicas mantendrán los mismos parámetros utilizados anteriormente cuando se caracterizó el lixiviado crudo para cada uno de los tratamientos dados a los lixiviados con los flocculantes y el filtro orgánico, incluso las muestras testigo. En la figura 19 se observa la prueba de sólidos sedimentables con tubos Imhoff graduados, ya montada y como los lixiviados.

Pruebas microbiológicas

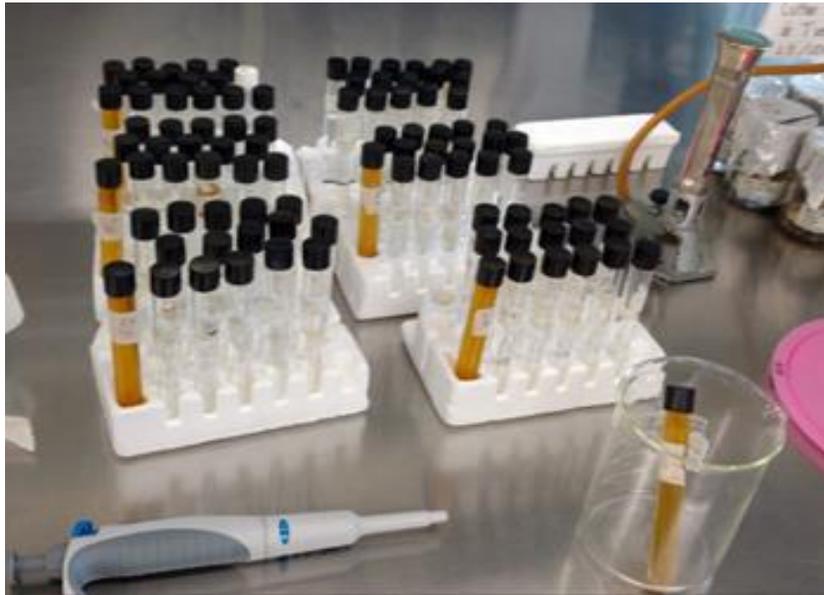


Figura 20. Diluciones para pruebas microbiológicas.

Coliformes fecales.

Coliformes totales.

Bacterias Heterotróficas.

Las pruebas microbiológicas se dividieron como se muestra en la tabla 14. En la figura 20 se observa los tubos de ensaye con las diluciones en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

Tabla 14. Desglose de los tipos de tratamiento analizados en las pruebas microbiológicas.

Coliformes fecales	Coliformes totales	Heterotroficas (RHP)
Muestreo con cinco diluciones comenzando con un mililitro de lixiviado tratado en solución patrón con nutrientes para las pruebas:	Muestreo con cinco diluciones comenzando con un mililitro de lixiviado tratado en solución patrón con nutrientes para las pruebas:	Muestreo con cinco diluciones comenzando con un mililitro de lixiviado tratado en solución patrón con nutrientes para las pruebas:
Adición de floculante sábila 35/65 volumen en base húmeda.	Adición de floculante sábila 35/65 volumen en base húmeda.	Adición de floculante sábila 35/65 volumen en base húmeda.
Adición de floculante sábila 45/55 volumen en base húmeda.	Adición de floculante sábila 45/55 volumen en base húmeda.	Adición de floculante sábila 45/55 volumen en base húmeda.
Adición de floculante sábila 55/45 volumen en base húmeda.	Adición de floculante sábila 55/45 volumen en base húmeda.	Adición de floculante sábila 55/45 volumen en base húmeda.
Adición de floculante nopal 35/65 volumen en base húmeda.	Adición de floculante nopal 35/65 volumen en base húmeda.	Adición de floculante nopal 35/65 volumen en base húmeda.
Adición de floculante nopal 45/55 volumen en base húmeda.	Adición de floculante nopal 45/55 volumen en base húmeda.	Adición de floculante nopal 45/55 volumen en base húmeda.
Adición de floculante nopal 55/45 volumen en base húmeda.	Adición de floculante nopal 55/45 volumen en base húmeda.	Adición de floculante nopal 55/45 volumen en base húmeda.
Adición de floculante sábila 35/65 masa en base seca.	Adición de floculante sábila 35/65 masa en base seca.	Adición de floculante sábila 35/65 masa en base seca.
Adición de floculante sábila 45/55 masa en base seca.	Adición de floculante sábila 45/55 masa en base seca.	Adición de floculante sábila 45/55 masa en base seca.
Adición de floculante sábila 55/45 masa en base seca.	Adición de floculante sábila 55/45 masa en base seca.	Adición de floculante sábila 55/45 masa en base seca.
Adición de floculante nopal 35/65 masa en base seca.	Adición de floculante nopal 35/65 volumen en base seca.	Adición de floculante nopal 35/65 masa en base seca.
Adición de floculante nopal 45/55 masa en base seca.	Adición de floculante nopal 45/55 volumen en base seca.	Adición de floculante nopal 45/55 masa en base seca.
Adición de floculante nopal 55/45 masa en base seca.	Adición de floculante nopal 55/45 masa en base seca.	Adición de floculante nopal 55/45 masa en base seca.
Lixiviado testigo	Lixiviado testigo	Lixiviado testigo

Para cada una de las 13 pruebas mencionadas anteriormente se realizarán cinco diluciones lo cual arroja un total de 65 muestras a distintas concentraciones por cada tipo de prueba microbiológica.

Las muestras se dejarán en la incubadora durante 24 horas a una temperatura de 45 °C en un baño de agua caliente con agitación en el caso de coliformes fecales como se puede ver en la figura 21 y a una temperatura de 35°C para en una incubadora para los coliformes totales y bacterias heterotróficas como se observa en la figura 22, para posteriormente realizar un conteo en placa de las colonias de bacterias características.



Figura 21. Baño María a 45°C con agitación, en la imagen con muestras de coliformes fecales en incubación.



Figura 22. Incubadora, a 35°C se utilizaba para incubar coliformes totales y bacterias heterotróficas.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados del estudio de gabinete.

Los resultados de la investigación que se hizo sobre este proyecto son parte del marco teórico donde se contextualiza la situación del nopal *Opuntia ficus* y la sábila *Aloe vera*, las propiedades de estas, el hábitat del que son endémicas, como se lleva a cabo el proceso y cuáles son los fenómenos fisicoquímicos que intervienen, son los temas principales.

5.2. Resultados del muestreo en campo.

La toma de muestra se llevó a cabo en un cárcamo de la etapa III del relleno sanitario Bordo Poniente. Se realizaron tres muestreos, transcurrió un mes entre cada uno de ellos, para llevar a cabo esta parte experimental. Las fechas de los muestreos fueron las siguientes: primer muestreo 9 de Septiembre del 2015, segundo muestreo 9 de Octubre del 2015 y por último tercer muestreo 25 de Noviembre del 2015.

5.2.1. Caracterización de los lixiviados a tratar provenientes del relleno sanitario Bordo Poniente

Los resultados obtenidos en los parámetros para la caracterización del lixiviado se dividen en las pruebas fisicoquímicas contenidas en la tabla 15 y los resultados de las pruebas microbiológicas en la tabla 16.

Tabla 15. Resultados pruebas fisicoquímicas para caracterizar lixiviado.

Pruebas fisicoquímicas			
	1er. Muestreo	2do. Muestreo	3er. Muestreo
Determinación del pH	8.08	8.32	8.44
Determinación de Conductividad (mV)	91.3	102.9	106.9
Sólidos sedimentables (mL)	-----	-----	-----
DBO5 (mg/L)	120	117	127
DQO (mg/L)	2920.6	3002.8	2980.4
Las propiedades del lixiviado cambian según la época del año. Las muestras de lixiviado se analizaron los días de los muestreos una vez llegaban al laboratorio procedentes del RSBP.			

Tabla 16. Resultados pruebas microbiológicas para caracterizar lixiviado.

Pruebas microbiológicas			
Unidades en (UFC/100 mL)	1er. Muestreo	2do. Muestreo	3er. Muestreo
Determinación de Coliformes fecales.	7000	40000	21000
Determinación de Coliformes totales.	----	26000	7000
Determinación Bacterias Heterotróficas.	8000	50000	14000
Las propiedades del lixiviado cambian según la época del año. Las muestras de lixiviado se analizaron los días de los muestreos una vez llegaban al laboratorio procedentes del RSBP.			

5.3. Resultados de los análisis en laboratorio

Obtención de los floculantes para el tratamiento del lixiviado



Figura 23. Polvo de nopal *Opuntia phicus* utilizado como floculante.

En total se obtuvieron 1320 g de polvo seco de sábila *Aloe vera* y 420 gramos de polvo seco de nopal *Opuntia phicus* el cual se puede observar en la figura 23, estas cantidades cubrieron las necesidades de polvos para los experimentos realizados en los tres muestreos con base seca. Para obtener estas cantidades de polvos de floculantes se utilizaron 2270 g de sábila *Aloe vera* fresca y 820 g de nopal *Opuntia phicus*.

Aplicación de la metodología propuesta

Estos resultados se obtuvieron del lixiviado que fue tratado con la metodología propuesta por completo.

- **Pruebas Fisicoquímicas**

Las pruebas fisicoquímicas se dividen en los tres muestreos realizados, para el primer muestreo se obtuvieron los resultados del nopal *Opuntia phicus* en la tabla 17 y para la sábila *Aloe vera* en la tabla 18, además se hizo una comparación, con los resultados del nopal en base seca y en base húmeda, en conductividad contra concentración como se ve en la figura 24 y para pH contra concentración como se muestra en la figura 25, por su parte también se realizó la comparación entre base húmeda y base seca con la sábila midiendo la relación que tuvo el pH contra la concentración como se observa en la figura

26 y con respecto a la conductividad contra la concentración como se ve en la figura 27, por último en la tabla 19 se encuentra los resultados de las pruebas de sólidos sedimentables y en la figura 30 se observa cómo cambia el volumen de los sedimentos cuando cambia la concentración. Las pruebas de sólidos sedimentables sólo se realizaron con el tratamiento de sábila *Aloe vera* en base húmeda debido a la factibilidad técnica de la prueba.

Lo que se buscó en el tratamiento fue obtener la conductividad eléctrica más pequeña lo que representa una menor cantidad de iones disueltos y por su parte acercar el pH a un valor neutro.

- Primer muestreo, 9 de Septiembre del 2015.

Figura 24. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración del nopal del 1er. Muestreo. Con la gráfica vemos como obtuvieron mejores resultados las muestras tratadas con base húmeda.

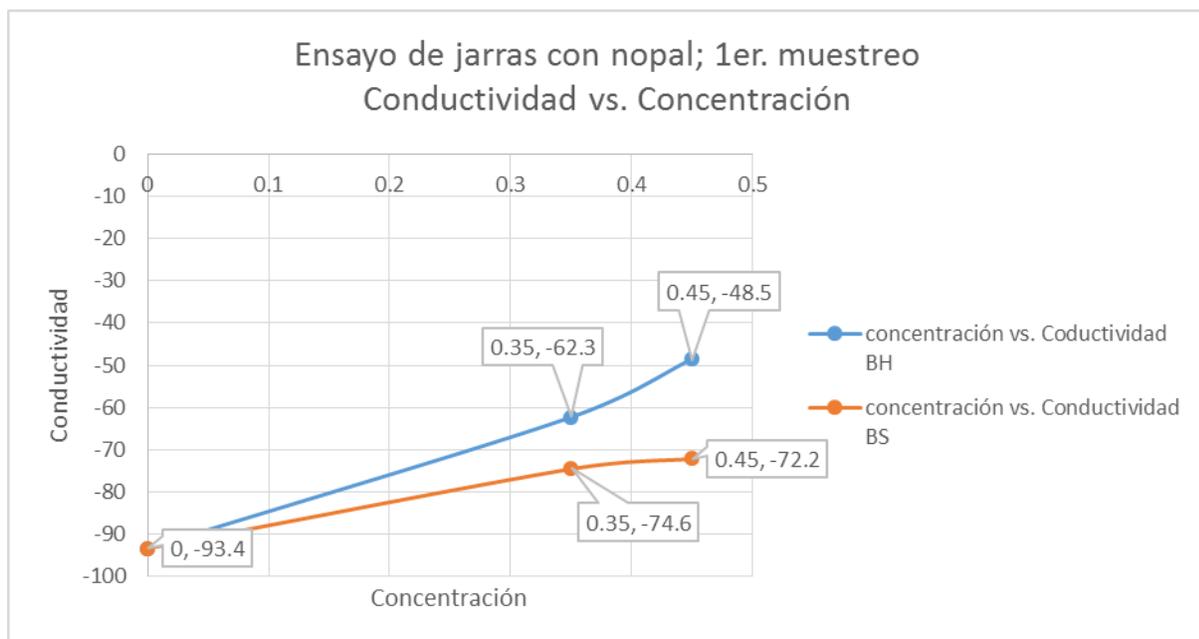


Tabla 17. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con nopal. 1er. muestreo.

1er. Muestreo. Ensayo de Jarras con Nopal					
CONCENTRACIÓN	MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD		TEMPERATURA °C
0	TESTIGO	8.08	93.4	mV	18.7
0.35	BH 35/65	7.58	62.3	mV	17.7
0.45	BH 45/55	7.29	48.5	mV	17
0.35	BS 35/65	7.76	74.6	mV	19.6
0.45	BS 45/55	7.74	72.2	mV	19.4

En el tratamiento se observaron sólidos de color blancuzco y partes oscuras en suspensión en el lixiviado, aunque este mantiene aún su tono oscuro, el tono más claro se obtiene con el tratamiento de BH 55/45 debido a la proporción de lixiviado.

Figura 25. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración del nopal del 1er. Muestreo.

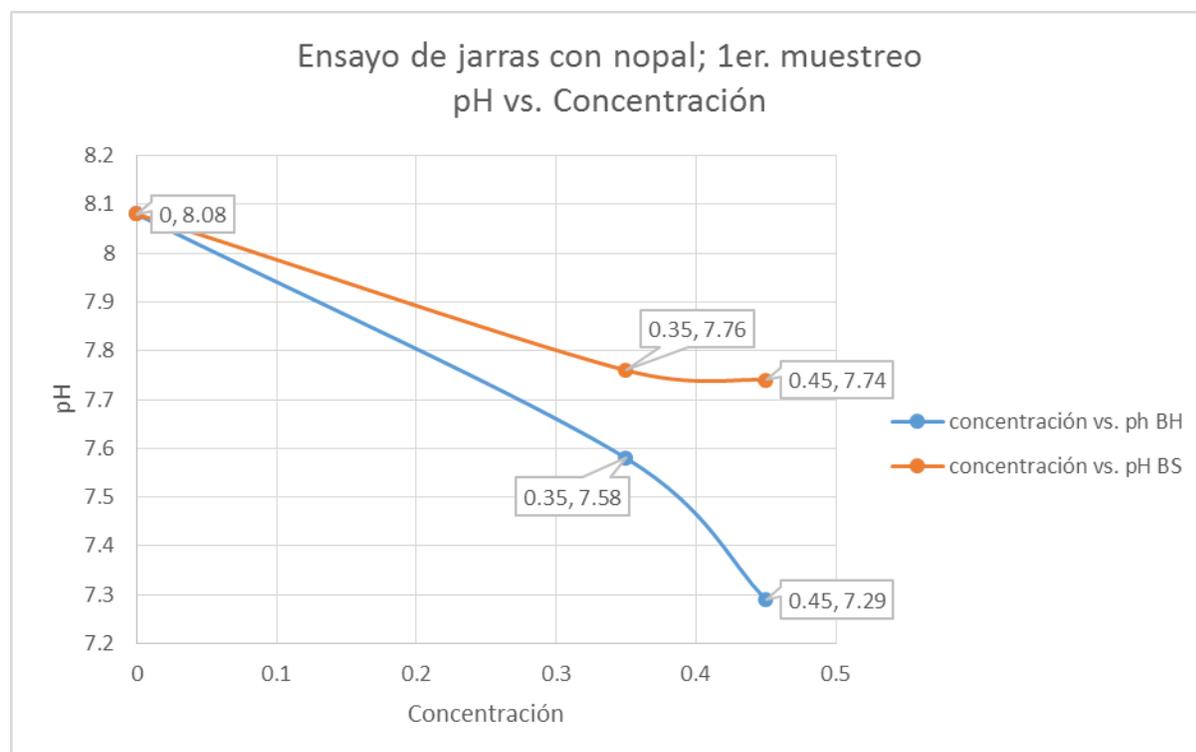


Tabla 18. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con sábila. 1er. muestreo

1er. muestreo. Ensayo de Jarras Sábila					
CONCENTRACION	MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD		TEMPERATURA °C
0.35	BH 35/65	7.89	80	mV	21.5
0.45	BH 45/55	7.82	70	mV	21.4
0.55	BH 55/45	7.38	56.9	mV	21.4
0.35	BS 35/65	8.08	95	mV	21.2
0.45	BS 45/55	8.32	115.5	mV	20.9
0.55	BS 55/45	8.65	117.8	mV	21.1

Figura 26. Gráfica de la variación de conductividad con respecto a la concentración de la sábila del 1er. Muestreo.

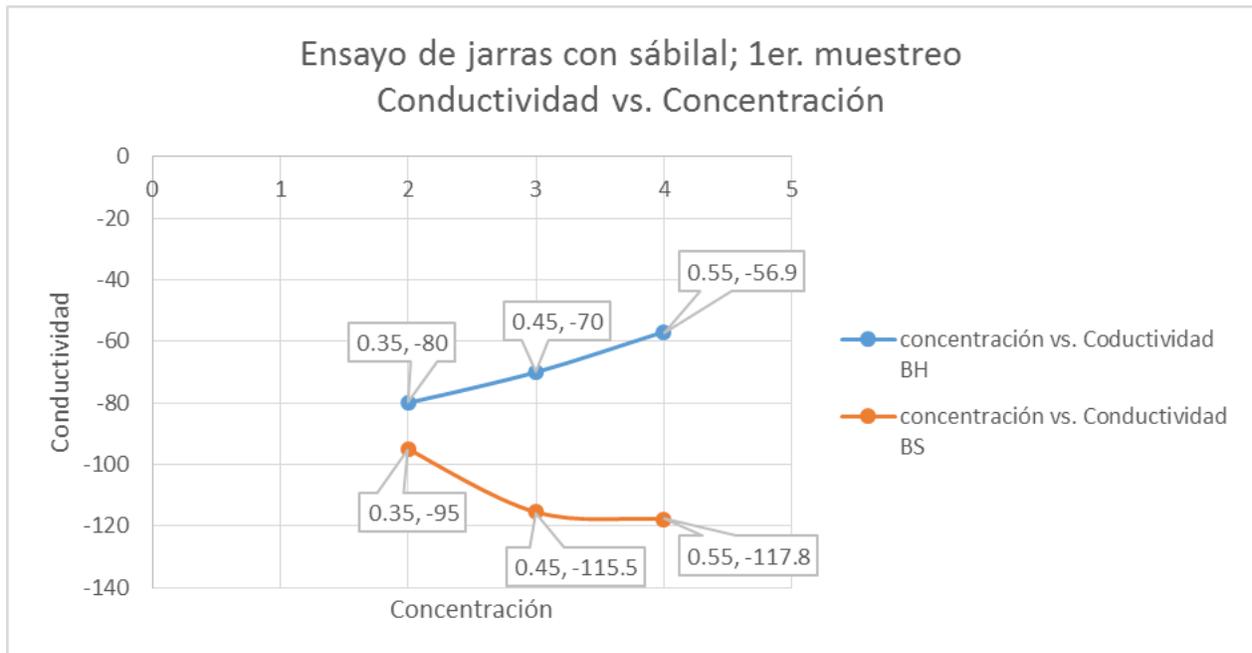
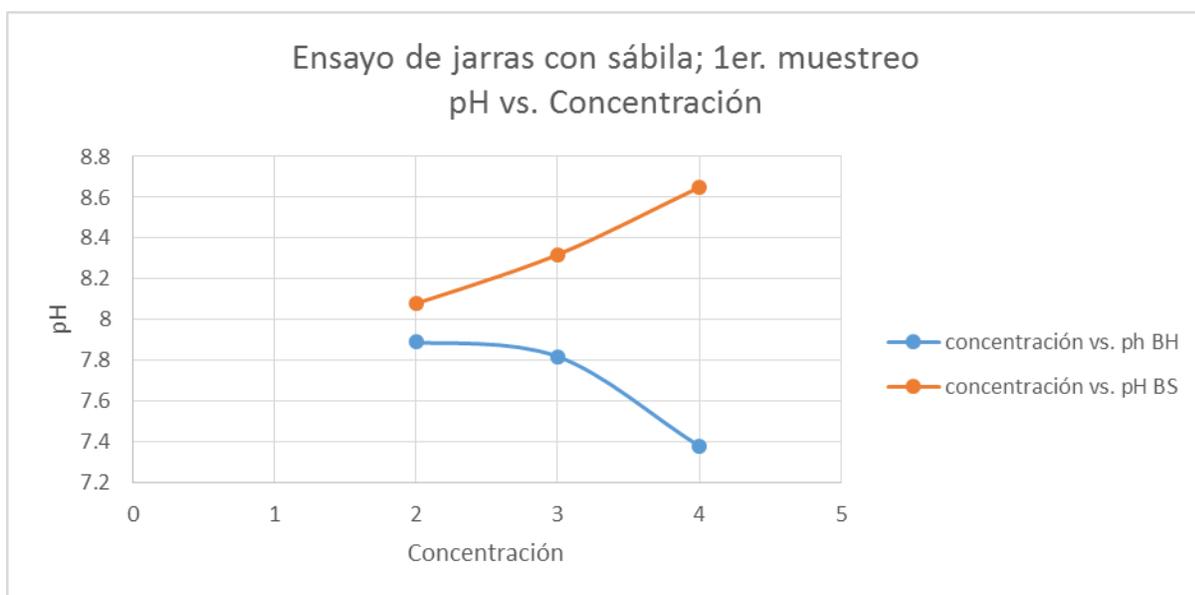


Figura 27. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración de la sábila del 1er. Muestreo.

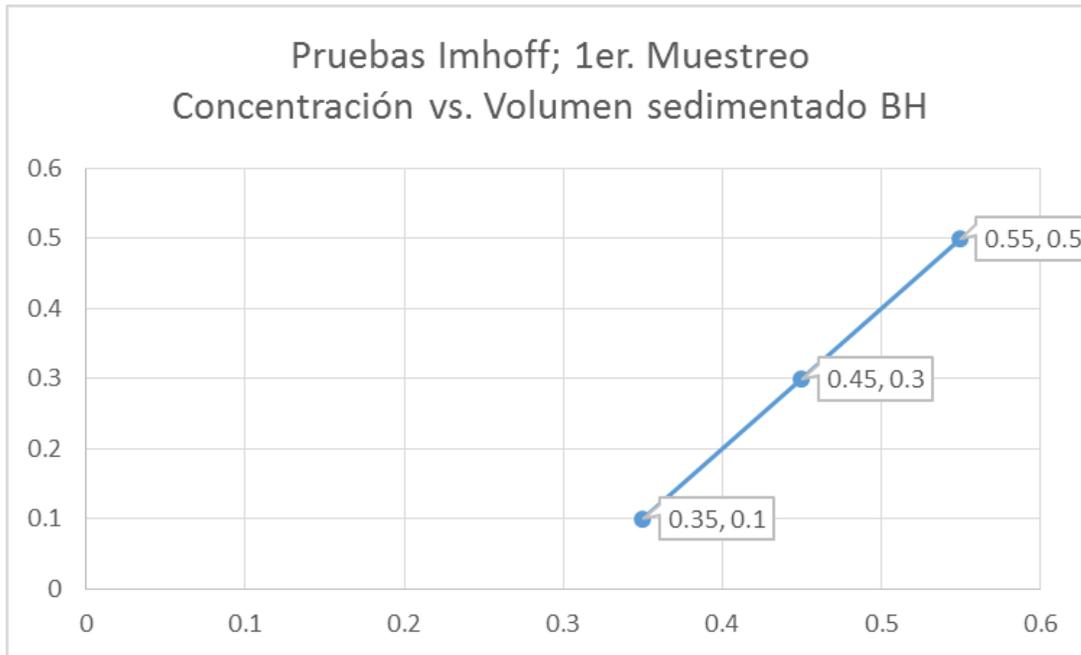


Los tubos para pruebas de sedimentables eran plásticos y estaban graduados para poder conocer el volumen del material, en las pruebas con lixiviados se realizaron únicamente con base húmeda. La base seca producía una mayor cantidad de material sedimentable, y oscurecía un poco el tono del lixiviado.

Tabla 19. Resultados de las pruebas de sólidos sedimentables con sábila base húmeda.

Pruebas Imhoff sólidos sedimentables sábila base húmeda		
BH 55/45	0.5	mL
BH 45/55	0.3	mL
BH 35/65	0.1	mL

Figura 28. Gráfica pruebas Imhoff para sólidos sedimentables 1er. muestreo.



- Segundo muestreo, 9 de Octubre del 2015.

En el segundo muestreo se muestran los resultados del tratamiento fisicoquímico con nopal *Opuntia ficus* en la tabla 20 y para la sábila *Aloe vera* en la tabla 21, además se hizo una comparación, con los resultados del nopal en base seca y en base húmeda, en conductividad contra concentración como se ve en la figura 29 y para pH contra concentración como se muestra en la figura 30, por su parte también se realizó la comparación entre base húmeda y base seca con la sábila midiendo la relación que tuvo el pH contra la concentración como se observa en la figura 31 y con respecto a la conductividad contra la concentración como se ve en la figura 32, por último en la tabla 22 se encuentra los resultados de las pruebas de sólidos sedimentables y en la figura 33 se observa cómo cambia el volumen de los sedimentos cuando cambia la concentración.

Tabla 20. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con nopal. 2do. muestreo.

2do. Muestreo. Ensayo de Jarras Nopal				
MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD		TEMPERATURA °C
BH 35/65	7.86	79.5	mV	15.9
BH 45/55	7.63	57.2	mV	15.9
BH 55/45	7.37	55.1	mV	16.2
BS 35/65	8.49	107.8	mV	15.6
BS 45/55	8.15	94.4	mV	15.7
BS 55/45	7.93	88.6	mV	16

Figura 29. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración del nopal del 2do. muestreo

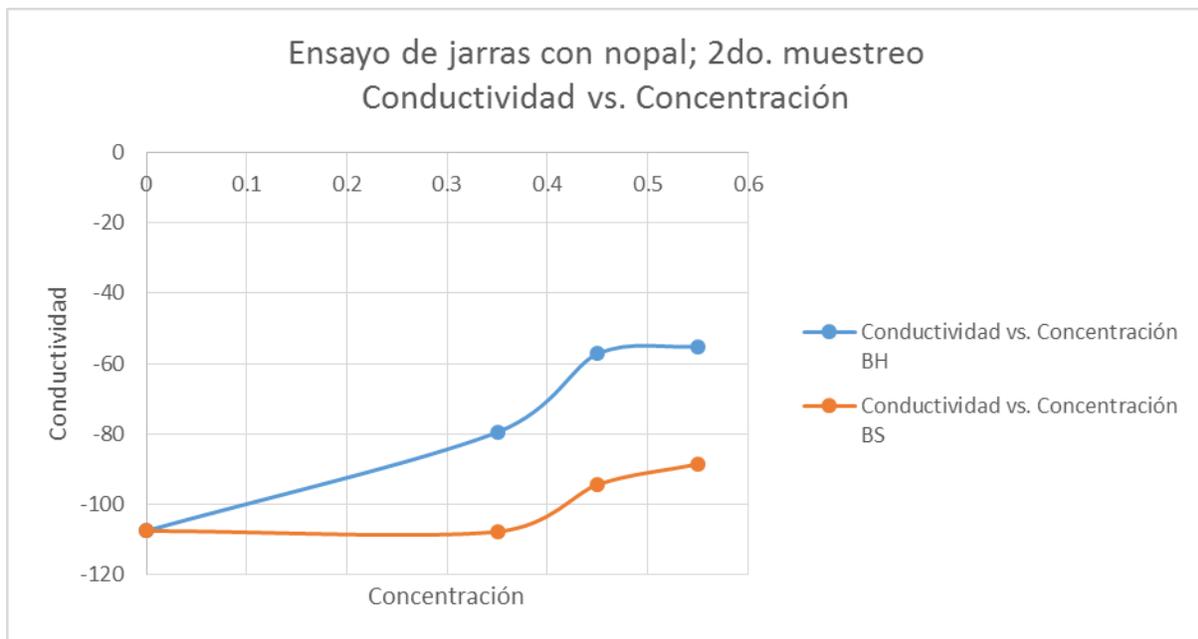


Figura 30. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración del nopal del 2do. muestreo.

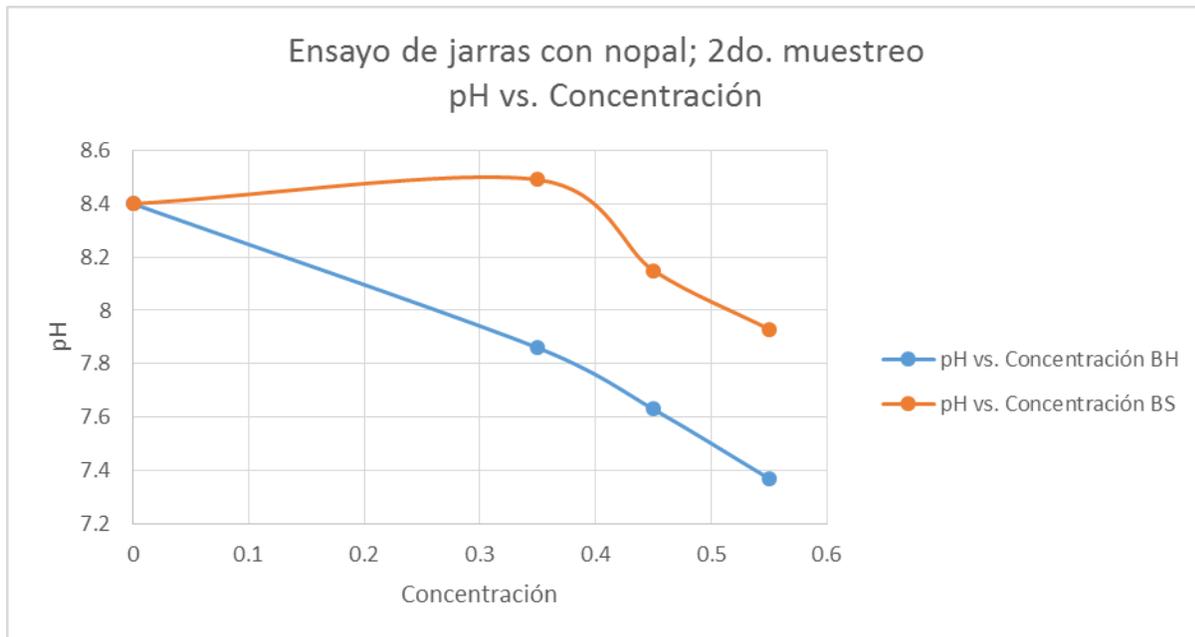


Tabla 21. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con sábila. 2do. muestreo

2do. Muestreo. Ensayo de Jarras Sábila				
MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD		TEMPERATURA °C
BH 35/65	7.79	77.5	mV	16.8
BH 45/55	7.61	65.5	mV	17.7
BH 55/45	7.35	54.8	mV	18
BS 35/65	8.43	109.1	mV	18.2
BS 45/55	8.39	110.2	mV	19
BS 55/45	8.74	126	mV	19.3

Figura 31. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración de la sábila del 2do. muestreo.

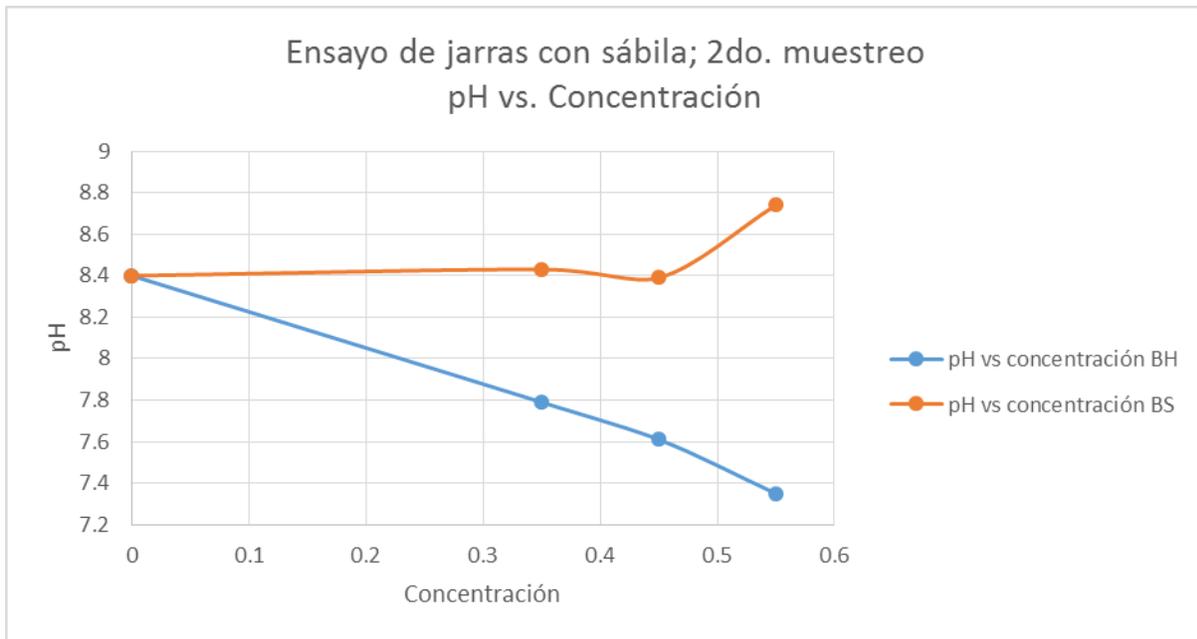


Figura 32. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración de la sábila del 2do. muestreo.

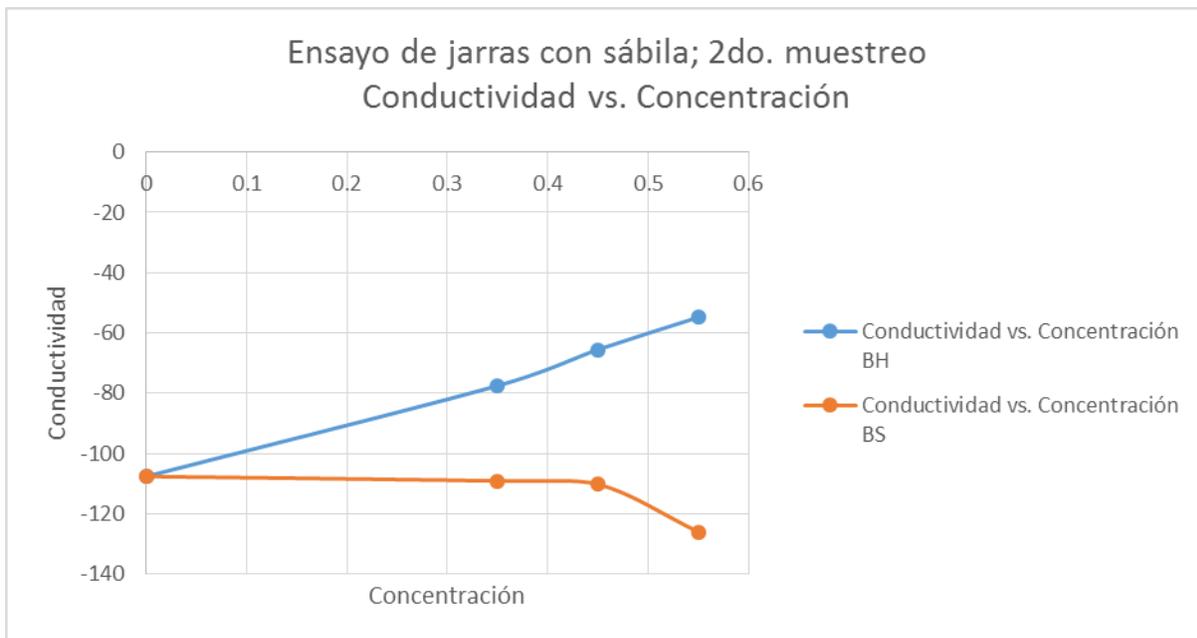
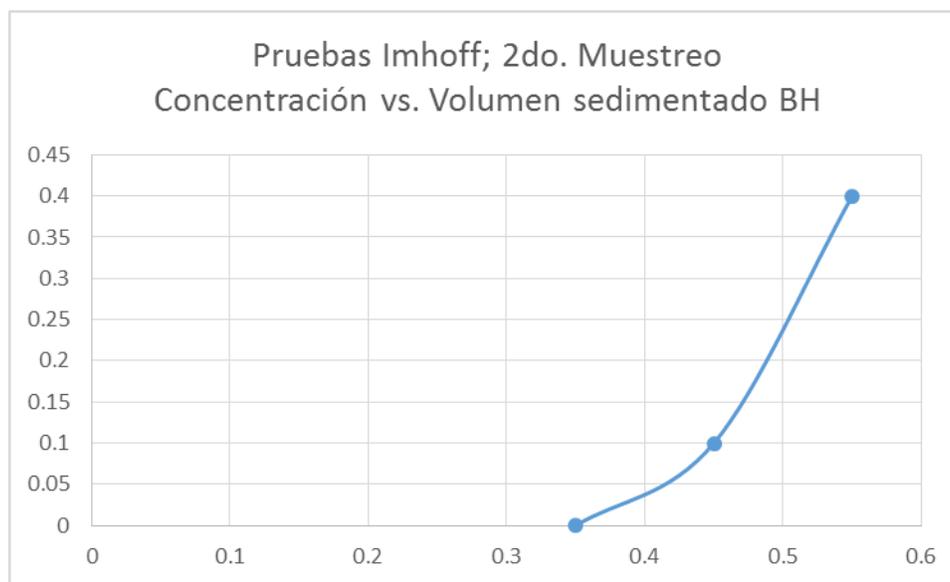


Tabla 22. Resultados de las pruebas de Imhoff con sábila base húmeda.

CONCENTRACIÓN	Pruebas Imhoff sólidos sedimentales.		
0.55	BH 55/45	0.4	mL
0.45	BH 45/55	0.1	mL
0.35	BH 35/65	0	mL

Figura 33. Gráfica pruebas Imhoff para sólidos sedimentables 2do. muestreo.



- Tercer muestreo, 25 de Noviembre del 2015.

En el tercer muestreo tenemos los resultados del tratamiento fisicoquímico con nopal *Opuntia phicus* en la tabla 23 y para la sábila *Aloe vera* en la tabla 24, además se hizo una comparación, con los resultados del nopal en base seca y en base húmeda, en conductividad contra concentración como se ve en la figura 34 y para pH contra concentración como se muestra en la figura 35, por su parte también se realizó la comparación entre base húmeda y base seca con la sábila midiendo la relación que tuvo el pH contra la concentración como se observa en la figura 36 y con respecto a la conductividad contra la concentración como se ve en la figura 37, por último en la tabla 25 se encuentra los resultados de las pruebas de sólidos sedimentables y en la figura 38 se observa cómo cambia el volumen de los sedimentos cuando cambia la concentración.

Tabla 23. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con nopal. 3er. muestreo.

3er. Muestreo. Ensayo de Jarras Nopal				
MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD		TEMPERATURA °C
BH 3/6	7.74	80	mV	17.6
BH 4/5	7.49	55.2	mV	17.3
BH 5/4	7.21	46.7	mV	17.3
BS 3/6	8.3	105.6	mV	18.7
BS 4/5	7.06	35.9	mV	18.4
BS 5/4	6.96	30.9	mV	18.4

Figura 34. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración del nopal del 3er. muestreo.

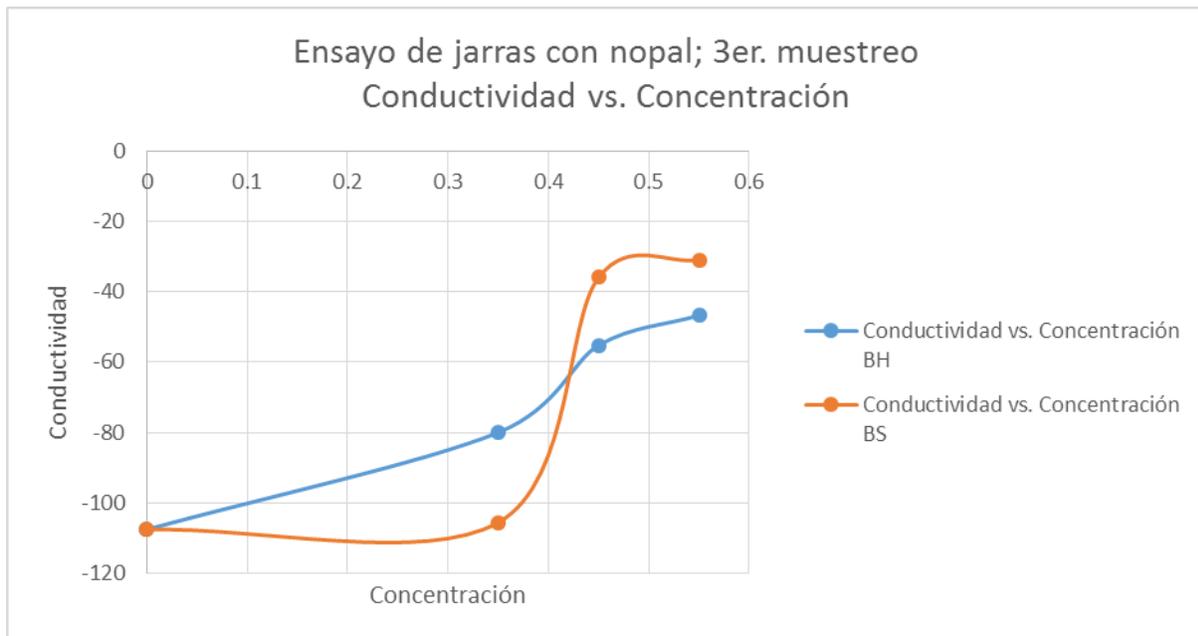


Figura 35. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración del nopal del 3er. muestreo.

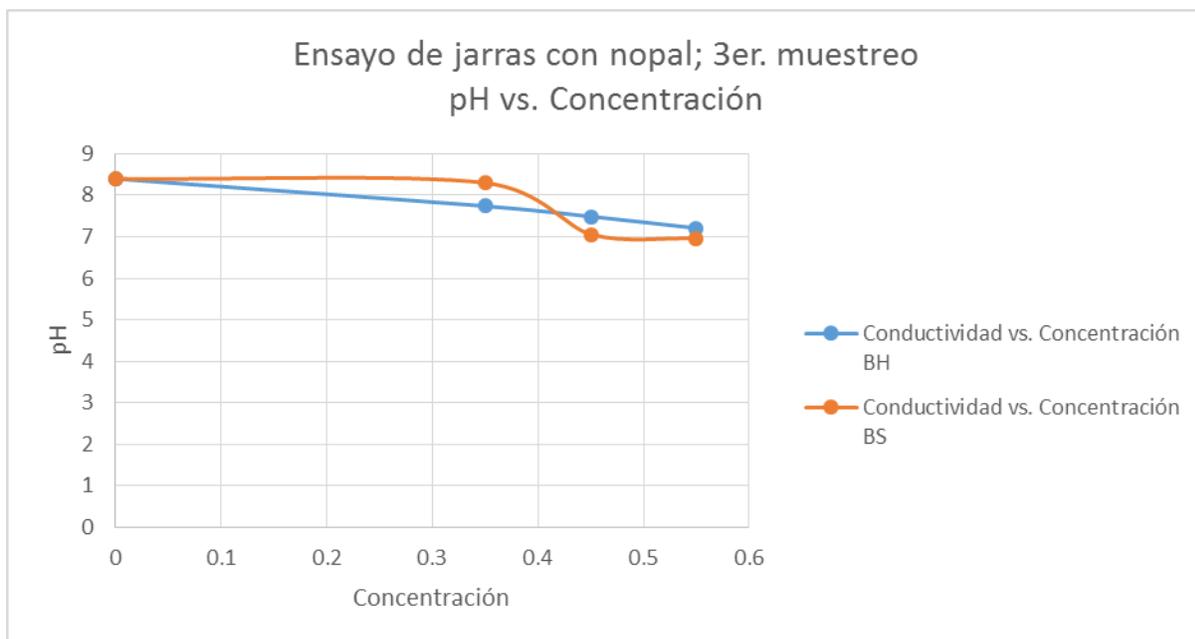


Tabla 24. Tabla de resultados en parámetros fisicoquímicos con sábila. 3er. muestreo

3er. Muestreo. Ensayo de Jarras Sábila				
MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD		TEMPERATURA °C
BH 35/65	7.69	77	mV	19.9
BH 45/55	7.46	53.1	mV	20.5
BH 55/45	7.15	39.7	mV	20.9
BS 35/65	8.26	101.6	mV	19.1
BS 45/55	7.43	49.8	mV	19.9
BS 55/45	7.22	54.2	mV	21

Figura 36. Gráfica de la variación del pH con respecto a la concentración de la sábila del 3er. muestreo.

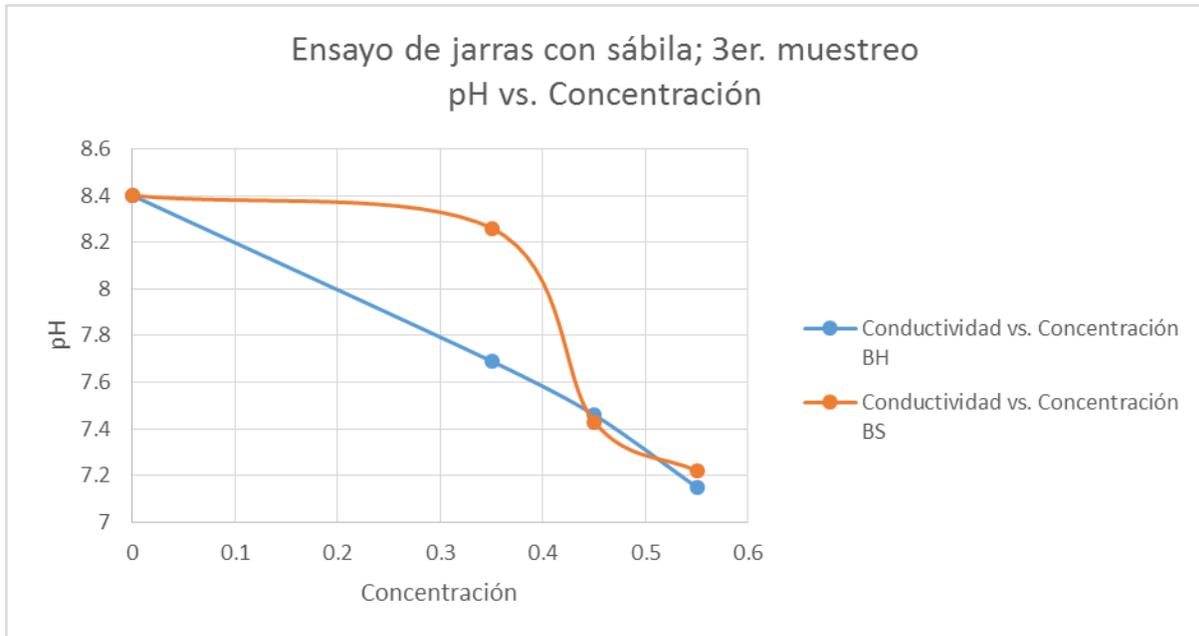


Figura 37. Gráfica de la variación de la conductividad con respecto a la concentración de la sábila del 1er. muestreo.

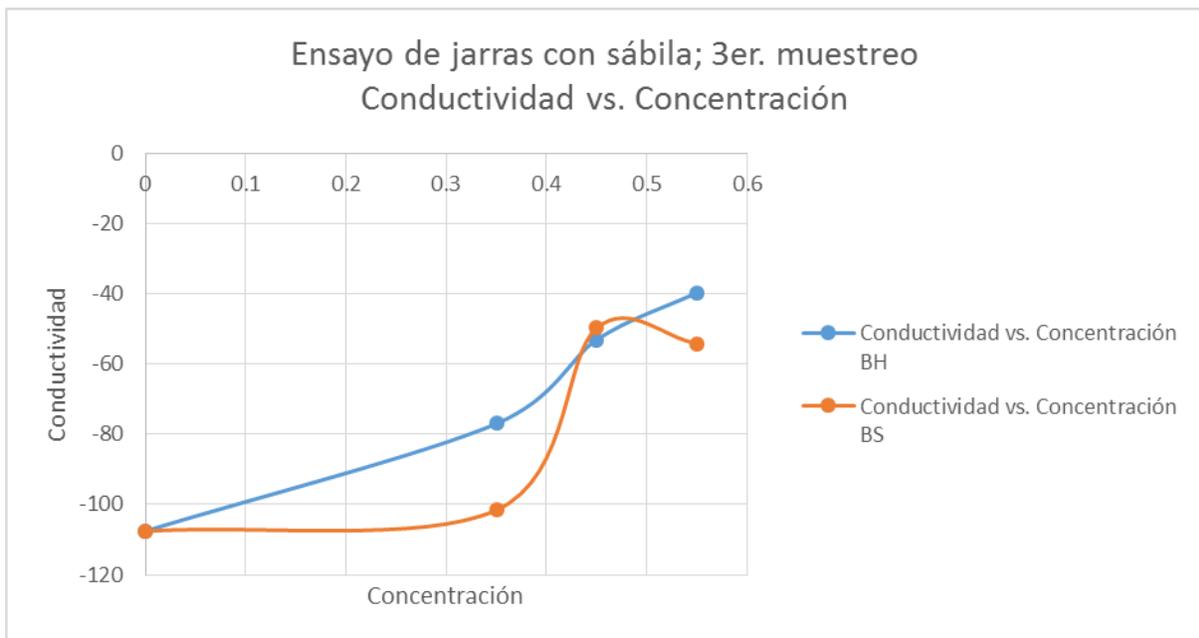
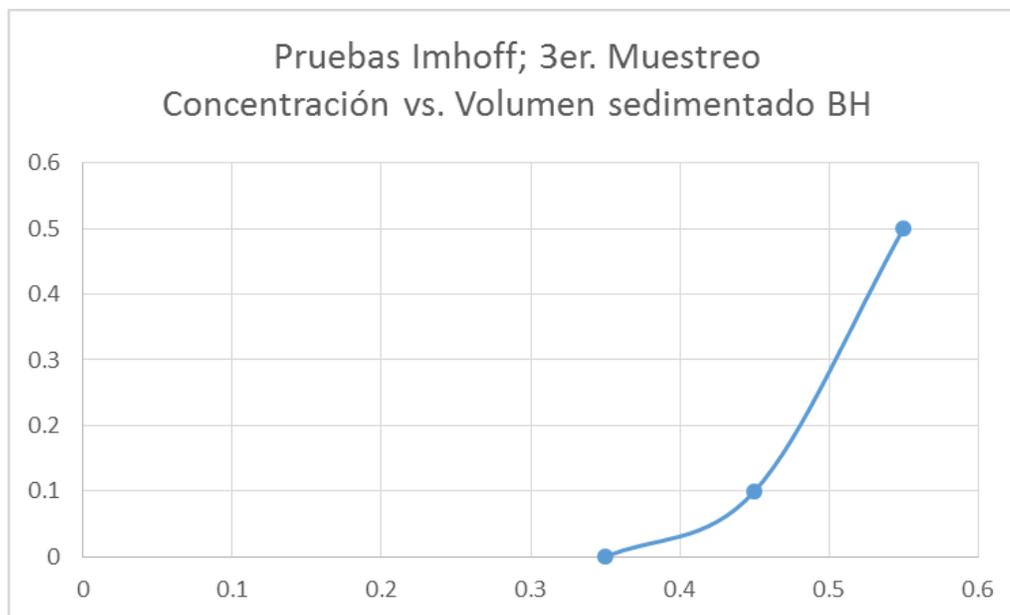


Tabla 25. Resultados de las pruebas Imhoff con sábila base húmeda.

CONCENTRACIÓN	Pruebas Imhoff sólidos sedimentables.		
0.55	BH 55/45	0.5	mL
0.45	BH 45/55	0.1	mL
0.35	BH 35/65	0	mL

Figura 38. Gráfica pruebas Imhoff para sólidos sedimentables 3er. muestreo.



- **Pruebas Microbiológicas**

Las pruebas microbiológicas se llevaron a cabo en el LIA. El análisis de los resultados de las pruebas microbiológicas se llevó a cabo dividiendo los tratamientos en dos: tratamientos con sábila y tratamientos con nopal. Tanto la sábila *Aloe vera* como el nopal *Opuntia ficus* se observa una mayor disminución de UFC en base húmeda. La mezcla base húmeda del floculante con los lixiviados lograba una mejor homogenización por lo tanto alcanzaba a retener mayor cantidad de UFC dispersas en el líquido.

Al igual que con las pruebas fisicoquímicas se realizó una comparación con las dos bases utilizadas en las pruebas microbiológicas las cuales se puede observar en las figuras 39 y 40 para coliformes fecales, 41 y 42 para coliformes totales y 43 y 44 para bacterias heterotróficas. Las observaciones más relevantes fueron: En todos los tratamientos en base húmeda alcanzaron niveles más bajos de UFC/100 mL que los obtenidos con el tratamiento en base seca, es decir que el tratamiento en base húmedo es el más eficiente. Por último se observó una mayor capacidad para remoción de microorganismos patógenos con el tratamiento de sábila en base húmeda en una concentración de 55/45 volumen, los valores mínimos que obtuvo para las pruebas fueron: 900 UFC/ 100 mL para coliformes fecales, 3400 UFC/ 100 mL para coliformes totales y 500 UFC/ 100 mL para bacterias heterotróficas.

En las pruebas microbiológicas sólo se reportó valores para el tratamiento con sábila en el primer muestreo y para nopal únicamente en el segundo muestreo.

Figura 39. Comparación de los tratamientos en base húmeda para coliformes fecales.

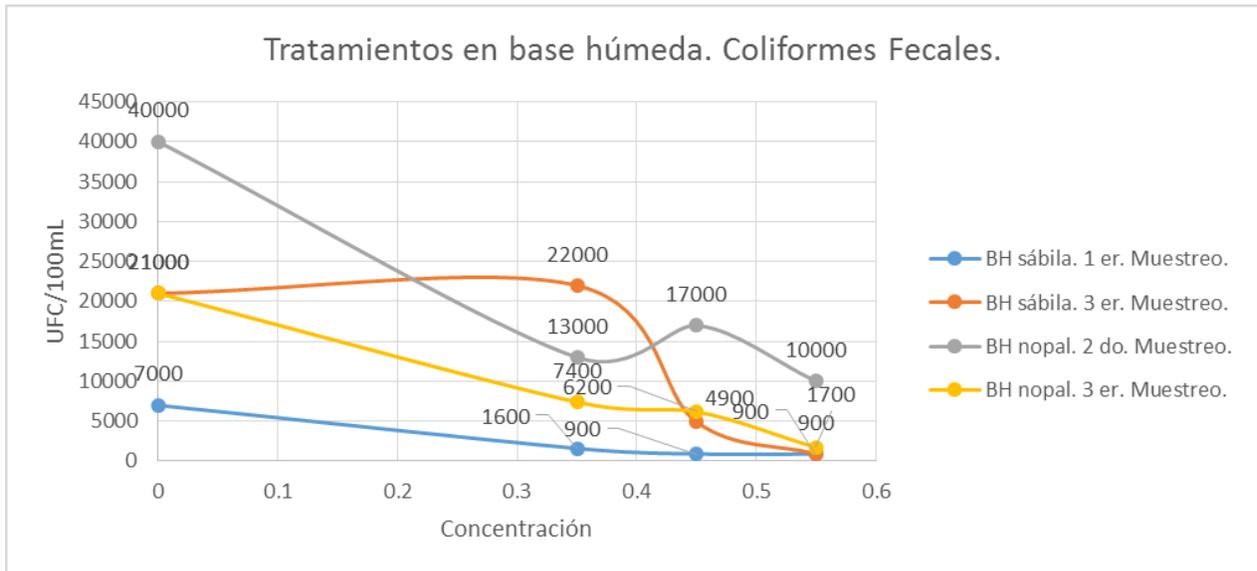


Figura 40. Comparación de los tratamientos en base seca para coliformes fecales.

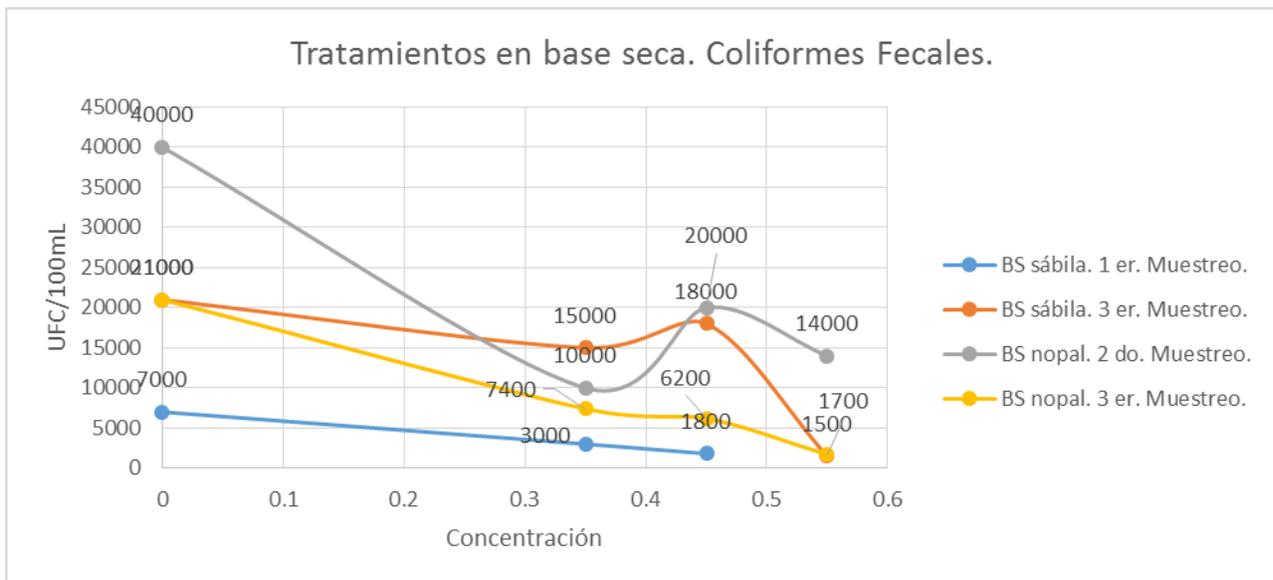


Figura 41. Comparación de los tratamientos en base húmeda para coliformes totales.

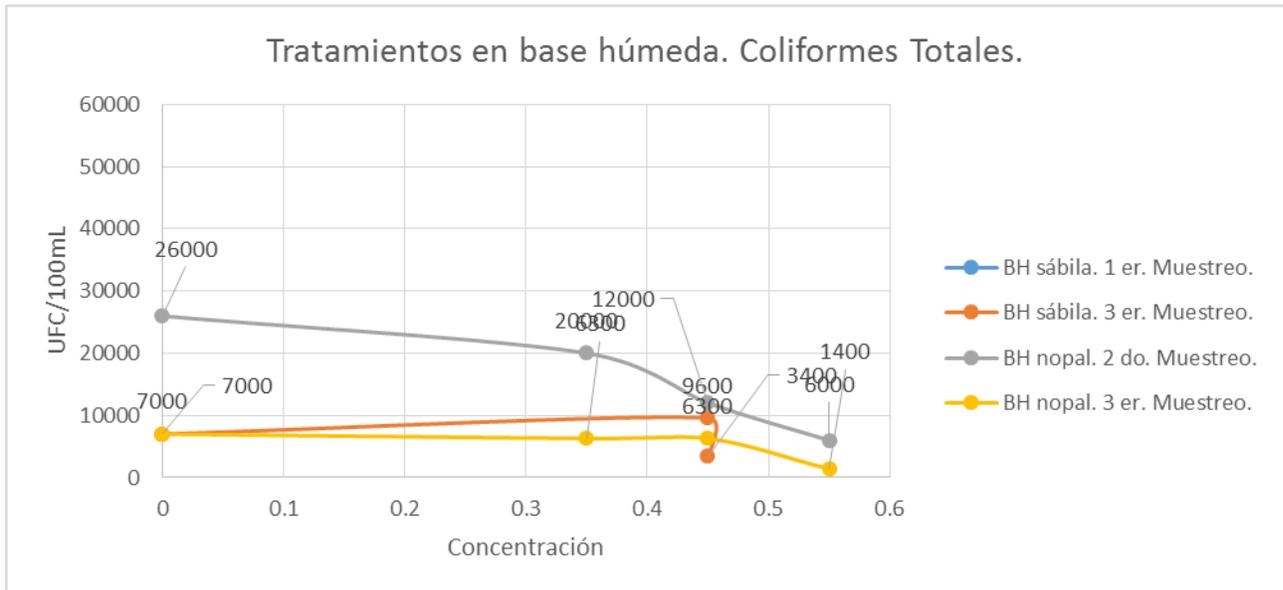


Figura 42. Comparación de los tratamientos en base seca para coliformes totales.

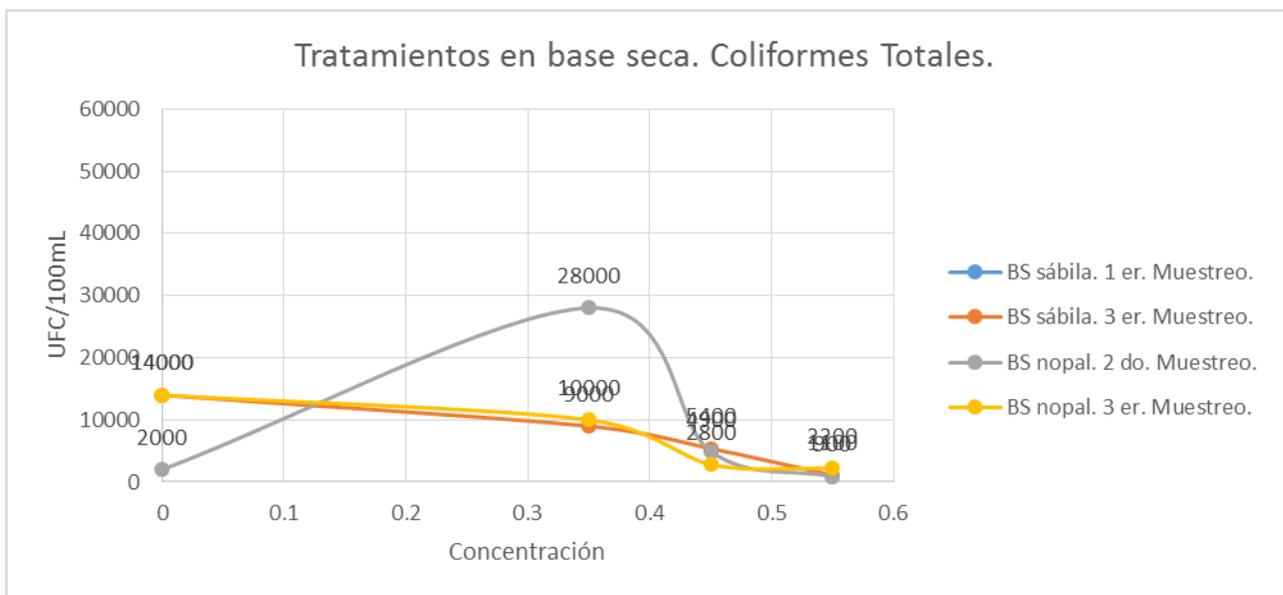


Figura 43. Comparación de los tratamientos en base húmeda para bacterias heterotróficas.

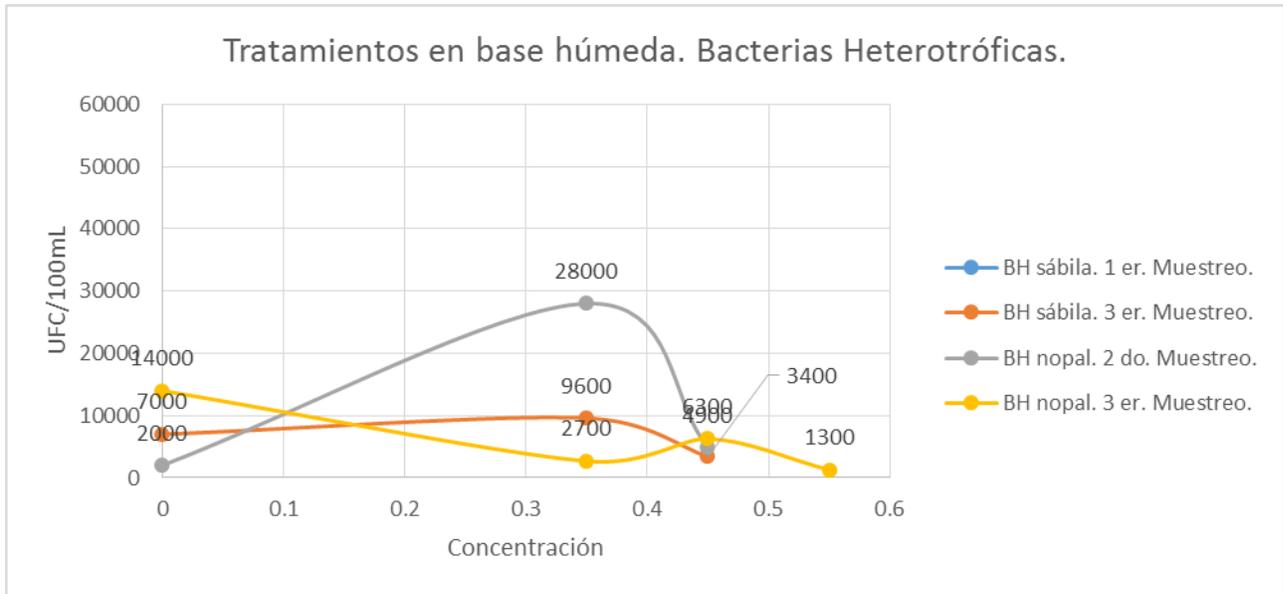
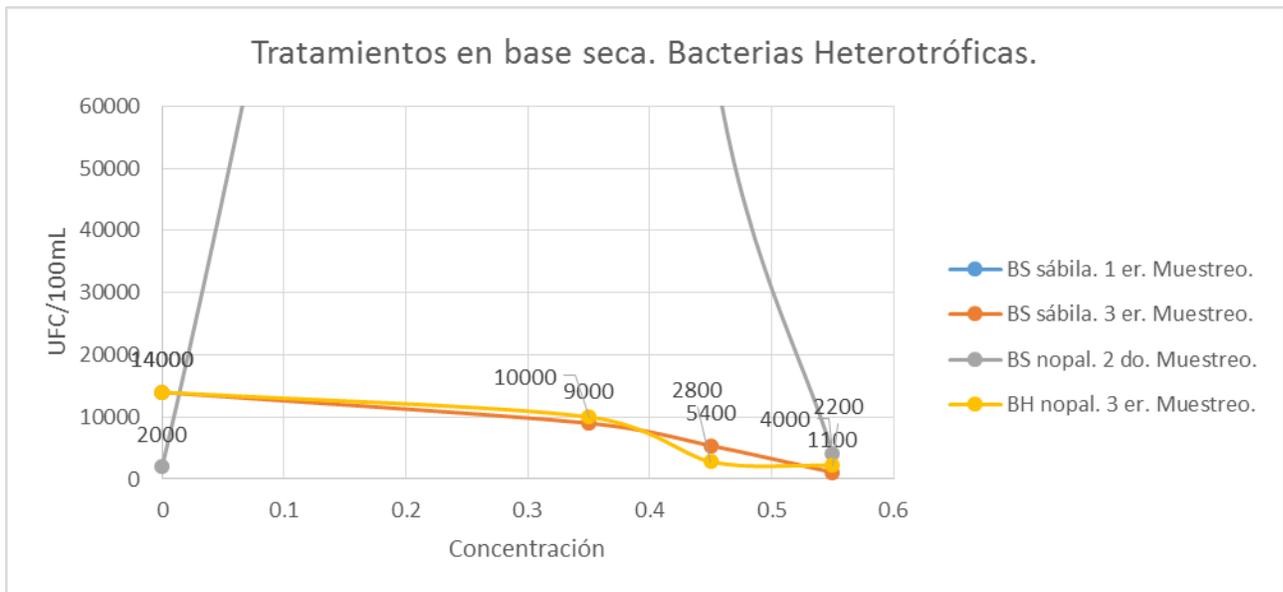


Figura 44. Comparación de los tratamientos en base seca para bacterias heterotróficas.



En todas las gráficas expuestas se puede observar que el tratamiento con el mejor desempeño en cada una de la pruebas es el tratamiento de sábila base húmeda con una concentración de 55/45 volumen de sábila/volumen de lixiviado, en las pruebas fisicoquímicas los resultados obtenidos se muestran en la tabla 26.

Tabla 26. Tratamientos más eficientes en pruebas fisicoquímicas.

Propiedades fisicoquímicas			
Propiedades	1 er. Muestreo	2 do. Muestreo	3er. Muestreo
Ph	Nopal BH 45/55	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45
Conductividad	Nopal BH 45/55	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45
Pruebas Imhoff	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45
DBO	Nopal BH 45/55	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45
DQO	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45	Nopal BH 45/55

En las pruebas microbiológicas al igual que en las pruebas fisicoquímicas, los mejores resultados los obtuvo en su mayoría el tratamiento de sábila base húmeda de 55/45 volumen de sábila/volumen de lixiviado, y en los casos donde el nopal base húmeda de 55/45 volumen de sábila/volumen de lixiviado obtuvo mejores resultados lo hizo por diferencias pequeñas, muy cerca de los resultados de los tratamientos con sábila como se observa en la tabla 27.

Tabla 27. Tratamientos más eficientes en pruebas microbiológicas.

Pruebas microbiológicas			
Pruebas	1 er. Muestreo	2 do. Muestreo	3er. Muestreo
C. Fecales	Nopal BS 45/55	Nopal BH 55/45	Sábila BH 55/45
C. Totales	Sábila BH 55/45	Nopal BH 55/45	Nopal BH 55/45
B. Heterotróficas	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45	Sábila BH 55/45

En cuanto a los niveles establecidos por las normas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1996, se alcanzan niveles incluso por debajo algunos de los establecidos, por ejemplo los mostrados en la tabla 28.

Tabla 28. Comparación de los resultados con los límites máximos permisibles.

Parámetro	Establecido en la NOM	Obtenido con el tratamiento sábila BH concentración 55/45
pH	6 - 8.5	7.15
P. Imhoff (mL/L)	2	0.4
DBO (mg/L)	200	131
C. Fecales	1000	900

6. CONCLUSIONES

La metodología para el tratamiento de lixiviados con floculantes vegetales primarios y filtros orgánicos, resultó ser útil en la disminución de partículas suspendidas, materia orgánica y agentes patógenos presentes en los lixiviados obtenidos en el RSBP.

Se determinó que el floculante sábila *Aloe vera* en base húmeda y concentración de 55/45 volumen de sábila/volumen de lixiviado, con filtro de cáscara de huevo, tuvo la mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y partículas suspendidas en los lixiviados.

En el análisis del tratamiento a los lixiviados con floculantes vegetales primarios y filtros orgánicos se concluyó que se obtuvieron valores más bajos en los parámetros fisicoquímicos que los permitidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales y se tomará como referencia para los lixiviados.

A través de la metodología de tratamiento de lixiviados con coagulantes vegetales primarios y filtros orgánicos se obtuvieron lixiviados con menor grado de partículas contaminantes y agentes patógenos que los encontrados en los cárcamos de filtración del RSBP.

El huevo complementa favorablemente el proceso de disminución de partículas suspendidas en el lixiviado, por lo que queda validado el proceso *Aloe vera*-cascarón de huevo como tratamiento primario para lixiviados..

El tratamiento con base húmeda o base seca es realmente factible, la preparación de los materiales es muy sencilla, además estos son fáciles de conseguir, el *Aloe vera* y el *Opuntia phicus* son plantas endémicas de las regiones áridas en el país y de fácil acceso y se consigue disminuir considerablemente los niveles de contaminación del agua.

7. REFERENCIAS

- 1.-Anava, (2012) Carbonato de calcio [En línea] fecha de consulta 21 enero 2016. De <http://cosblog.com/test/2012/04/09/806/>
- 2.- Alcántar Negrete, Rene Francisco. (2015). Estudio de la evolución del lixiviado en el relleno sanitario Bordo Poniente. Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán.
- 3.- Arboleda V. Vargas Correal. 1999. Manual de tratamiento de aguas potables. Carácas Venezuela.
- 4.- *Atlas de Botánica: el mundo de las plantas.* (2006) Barcelona. Ediciones Aupper.
- 5.- Avañe Cataño Luz. (2013). Cascara de huevo para descontaminar el agua . [En línea]. Fecha de consulta 9 enero 2016. De http://www.elmundo.com/portal/noticias/territorio/cascara_de_huevo_para_descontaminar_el_agua.php#.VsLDSOYm2hU
- 6.- Bravo-Hollis. 1978. Las cactáceas de México, UNAM; Volumen I; México.
- 7.- Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA). (1991). Ubicación de las Delegaciones regionales [En línea] Fecha de consulta: 18 diciembre 2015. De <http://www.conaza.gob.mx/consulta/Paginas/Ubicacion-Delegaciones-Regionales.aspx#>
- 8.- Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Servicios Urbanos, Manual de Operación de la Planta de Lixiviados, Dirección Técnica de Desechos Sólidos, 1997.
- 9.- Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU), 2015. Portal Delegación Benito Juárez [En línea]. Fecha de consulta 26 de diciembre de 2015.
- 10.- Elizondo E. J.(1979). Contribución al conocimiento florístico-ecológico de las cactáceas del municipio de Mina. Tesis de licenciatura Universidad Autónoma de Nuevo León.
- 11.- Erenovable. (2015). Calentamiento global. [En línea] Fecha de consulta: noviembre 12 de 2015, de <http://erenovable.com/calentamiento-global/>.
- 35.- Evaluación de la tuna (*Opuntia cochinellifera*) para la remoción de color en agua potable” artículo científico realizado por Joaquín Jiménez Antillón, Maricruz Vargas Camareno y Noemi Quirós Bustos de la Universidad de Costa Rica.

- 13.- Fernández M. Alex. (2006). Contaminación por lixiviados. [En línea] Fecha de consulta: noviembre 18 de 2016. De http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2006/10/13/156373.php
- 14.- Garza F.y Salgado G. 1992. Compendio de métodos para análisis del agua; FCB-UANL; Publicación Técnica No. 5.
- 15.- Jiménez, Vargas, Quirós. (2012). Evaluación de la tuna (*Opuntia cochinellifera*) para la remoción de color en agua potable. Artículo científico. Universidad de Costa Rica
- 16.- Kiesling, R. (1999). Origen, Domesticación y Distribución de *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae). Journal of the Professional Association for Cactus Development
- 17.- Köfalusi, Gábor Kiss y Aguilar, Guillermo Encarnación, Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final Gaceta ecológica, (2006). Instituto Nacional de Ecología, México.
- 18.- Lenntech BV. (2012) Adsorción con carbón activo [En línea] Fecha de consulta 17 de enero 2016. <http://www.lenntech.es/adsorcion.html>.
- 19.- Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, Última reforma publicada DOF 16-01-2014. pp. 1-66
- 20.- Nájera, H.; Castañón, J.; Figueroa, J.; Rojas-Valencia, M. (2009) Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. II simposio Iberoamericano de Ingeniería de residuos. México.
- 21.- NOM-001-SEMARNAT-1996. [23]. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, DOF, 24 junio 1996.
- 22.- NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado, DOF, 9 enero 1997.

- 23.- NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, DOF, 14 agosto 1998.
- 24.- Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, (2004). 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. México, D.F. Diario Oficial de la Federación.
- 25.-Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal. 13 de Septiembre de 2010, Gaceta Oficial Del Distrito Federal año, pp. 10, 11, 16-18
- 26.- Samia Al Azharia Jahn. 1999. Uso apropiado de coagulantes naturales africanos para el abastecimiento de agua en el medio rural; CEPIS/OPS/OMS, Lima Perú.
- 27.- Servicio de Información agroalimentaria y pesquera (SIAP).(2013) Distribución del clima en México. [En línea] Fecha de consulta: 9 enero 2016.De <http://www.siap.gob.mx/agro-clima-2/> .
- 28.- Sistema de información sobre las plantas de España, (2012) . Conservación de la biodiversidad. [En Línea] Fecha de consulta : 17 diciembre 2015. De <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-la-biodiversidad/default.aspx>
- 29.- Stuart, M E & Klinck, B A, A catalogue of leachate quality for selected landfills from newly industrialized countries, TECHNICAL REPORT WC/98/49, Overseas Geology Series, Nottingham, British Geological Survey, 1999.
- 30.-Union Nacional de Avicultores. (2014). Crecerá 2.5% avícola mexicana en 2015. [En línea]. Fecha de consulta 2 enero 2016. De <http://www.una.org.mx/index.php/panorama/crecera-2-5-la-avicultura-mexicana-en-2015>,
- 31.-USDA. (2004). Los productos de huevo y la inocuidad alimentaria. [En línea] Fecha de Consulta 2 enero 2016. De <http://www.fsis.usda.gov/wps/portal/informational/en-espanol>.
- 32.- Vanguardia. (2013). Solo el 60% de la basura termina en rellenos; el resto, a tiraderos. [En línea] Fecha de consulta 27 de diciembre 2015. De <http://www.vanguardia.com.mx/solo60delabasuraterminarellenoselrestoatiraderos-1734458.html>

33.- Vásquez, O. 1994. Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales .Tesis de licenciatura. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.