



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“RELACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DE
LIXIVIADOS CON EL IMPACTO FITOTÓXICO DE UN
LIXIVIADO”**

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

presenta la

***Ingeniero Químico en Alimentos
Daniela Guerrero Rodríguez***

Director de tesis:
**Doctora en Ciencias PhD.
Liliana Márquez Benavides**

Co-Director de tesis:
**Doctor en Ciencias. Especialidad en Microbiología
Juan Manuel Sánchez Yáñez**

Morelia, Michoacán, México, Enero 2014

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Microbiología Ambiental del Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas y en el Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, dependientes de la UMSNH bajo la supervisión de la Dra. Liliana Márquez-Benavides y el Dr. Juan Manuel Sánchez-Yáñez. Este trabajo es financiado por los proyectos 150001 SENER-CONACyT, así como los proyectos 2.7 y 5.15 (2013) de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH.



Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	MARCO TEÓRICO	2
2.1.	Rellenos Sanitarios	2
2.2.	Degradación de la fracción orgánica de RSU en RESA.....	2
2.3.	Composición química de lixiviados	5
3.	ANTECEDENTES	9
3.1.	Contaminación de aguas por lixiviados	9
3.2.	Contaminación de suelos por lixiviados	9
3.3.	Herramientas para medir el potencial de contaminación de lixiviados	9
3.3.1.	Análisis químicos	10
3.3.2.	Bioensayos.....	11
3.3.3.	Métodos numéricos	12
3.4.	Índice de Contaminación de lixiviados (ICL).....	12
4.	JUSTIFICACION.....	15
5.	HIPÓTESIS	15
6.	OBJETIVO.....	15
7.	METODOLOGÍA.....	16
	Fase I. Obtención del ICL de Guanajuato y Edo. De México.....	16
	FASE II. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol en cajas Petri.....	16
	FASE III. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol con jarras de Leonard.....	16
7.1.	Fase I. Obtención del ICL de Guanajuato y Edo. De México	17
7.1.1.	Actividad 1. Obtención de muestras de lixiviados de RESA de Guanajuato y Edo. De México.....	17
7.1.2.	Actividad 2. Determinación de los parámetros fisicoquímicos correspondientes	18
7.1.3.	Actividad 3. Cálculo del ICL.....	19
7.2.	FASE II. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol en cajas Petri.....	20
7.2.1.	Actividad 1. Formulación del diseño experimental.....	20
7.2.2.	Actividad 2. Montaje y monitoreo de prueba de fitotoxicidad en cajas Petri	21
7.2.3.	Actividad 3. Medición de variables respuesta	22
7.3.	FASE III. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol con jarras de Leonard	24
7.3.1.	Actividad 1. Formulación del segundo diseño experimental	24
7.3.2.	Actividad 2. Montaje del experimento y preparación del material	25

7.3.3.	Actividad 3. Medición de las variables	27
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
8.1.	Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados de Guanajuato y Toluca	28
8.2.	Cálculo del ICL.....	28
8.3.	Bioensayo de fitotoxicidad en semilla de frijol en cajas Petri	32
8.3.1.	Porcentaje de germinación.....	32
8.3.2.	Efecto del lixiviado en la altura del primordio de tallo frijol	33
8.3.3.	Efecto del lixiviado sobre la longitud del primordio de la raíz.	34
8.3.4.	Efecto del lixiviado sobre el peso fresco aéreo del frijol	34
8.3.5.	Efecto del lixiviado sobre el Peso Fresco Radical (PFR) del frijol	36
8.3.6.	Efecto del lixiviado sobre el Peso Seco Aéreo (PSA) y Peso Seco Radical (PSR) del frijol.	36
8.4.	Bioensayo de fitotoxicidad con frijol en jarras de Leonard.....	38
8.4.1.	Altura de la planta.....	38
8.4.2.	Longitud radical.....	41
8.4.3.	Peso Fresco Aéreo y Radical	41
8.4.4.	Peso Seco Aéreo y Radical.....	42
8.4.5.	Efecto del lixiviado sobre el rendimiento de <i>Phaseolus vulgaris, L</i>	43
9.	CONCLUSIONES.....	45
10.	VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS	46
11.	REFERENCIAS	48
	Anexo I.....	53
	Anexo II.....	59
	ANEXO III.....	64
	IMÁGENES DEL BIOENSAYO EN CAJAS PETRI.....	64
	ANEXO IV	67
	IMÁGENES DEL BIOENSAYO EN JARRAS DE LEONARD	67

Índice de Figuras

Figura 1 Formación de gases en un RESA	3
Figura 2. Etapas en la Formación de lixiviados en el RESA	5
Figura 3. Herramientas para medir el grado de contaminación de lixiviados	10
Figura 4. Localización del SDF de San Francisco del Rincón.	17
Figura 5. Localización de Relleno Sanitario de Zinacantepec (A) y laguna de lixiviados del sitio (B).	18
Figura 6. Diluciones del lixiviado de Toluca	22
Figura 7. Diluciones del lixiviado de Guanajuato	23
Figura 8. Diagrama de flujo del bioensayo de fitotoxicidad de frijol en cajas Petri.	24
Figura 9a. Sistema de jarra de Leonard. Figura 9b. Jarra cubierta con plástico.....	25
Figura 10. Semillas desinfectadas de frijol.....	26
Figura 11. Aclareo de plántulas de frijol	26
Figura 12. Diagrama de flujo del segundo experimento de fitotoxicidad de ambos lixiviados en frijol (<i>Phaseolus, Vulgaris</i> , L.)	27
Figura 13. Laguna de lixiviados del sitio de disposición final San Francisco del Rincón, 29	
Figura 14. Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca sobre la altura del primordio de tallo del frijol.	33
Figura 15. Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca sobre la longitud del primordio raíz del frijol.	34
Figura 16. Efecto de ambos lixiviados a diferentes concentraciones sobre el peso fresco aéreo del frijol.....	35
Figura 17. . Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca a diferentes concentraciones sobre el peso fresco radical del frijol.	36
Figura 18. (A) Efecto de ambos lixiviados a diferentes concentraciones sobre el peso aéreo del frijol. (B) Efecto de ambos lixiviados sobre el peso seco radical del frijol.....	37
Figura 19 (a-h). Curvas de los subíndices de los contaminantes de lixiviados	56
Figura 20. Curva de calibración para NH ₃ -N.....	62

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química de lixiviados de rellenos sanitarios (Bagchi 1994)..... 5

Tabla 2. Composición química de lixiviados de diferentes rellenos sanitarios..... 7

Tabla 3. Composición química de lixiviados de RESA de diferentes edades..... 8

Tabla 4. Diseño experimental para el bioensayo de fitotoxicidad de frijol ((*Phaseolus Vulgaris*, L)..... 20

Tabla 5. Caracterización química de los lixiviados de Guanajuato y Toluca..... 28

Tabla 6. Comparación de ICL de diversos sitios de disposición final 30

Tabla 7. Índice de Contaminación de Lixiviados de Toluca y Guanajuato..... 31

Tabla 8. Porcentaje de germinación de *Phaseolus vulgaris* tratado con diferentes concentraciones de lixiviados de Toluca y Guanajuato..... 33

Tabla 9. Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca a diferente concentración sobre frijol en su fase de plántula y floración. 39

Tabla 10 Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris*, L. 43

Tabla 11 Peso de los parámetros contaminantes del ICL..... 55

Tabla 12. Lecturas de absorvancia del lixiviado de Toluca y Guanajuato 62

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el índice de contaminación de lixiviados (ICL) de dos muestras de lixiviado (LX) una proveniente de un relleno sanitario (RESA) y otra de un sitio de disposición final incontrolado. Este trabajo se complementó con un estudio de fitotoxicidad de ambos LX sobre frijol (*Phaseolus vulgaris, L.*) variedad junio con el objetivo de relacionar el valor numérico del ICL con el la respuesta del frijol. Se determinaron los parámetros fisicoquímicos del LX de Guanajuato y su ICL (38.83) y del LX de Toluca (19.30). Se realizaron dos bioensayos de fitotoxicidad de los LX en el frijol. En el primer bioensayo se determinó la fitotoxicidad de ambos LX en el frijol en sus primeras etapas de crecimiento en caja Petri. Las semillas de frijol fueron tratadas con LX al 6.25%, 12.5%, 25%, 50%, 75% y 100% (v/v); y semillas irrigadas con agua potable como control absoluto. En el segundo bioensayo, se evaluó la fitotoxicidad de ambos LX en frijol en sus etapas de plántula, floración y madurez. El frijol fue tratado con LX al 25, 50, 75 y 100% y frijol usado como control relativo se alimentó con una solución mineral. Las variables respuestas medidas: % de germinación, fenotipia, biomasa y rendimiento del grano. Los resultados indicaron que LX de Guanajuato por sus propiedades fisicoquímicas con mayor ICL, fue más fitotóxico en el frijol en sus primeras etapas de crecimiento desde la dilución 25%; el LX de Toluca desde el 50%. Para el segundo bioensayo se determinó que en las fases de plántula y floración ambos LX funcionaron como un efecto benéfico para la planta, sin embargo en el rendimiento del grano un efecto tóxico se observó más en el LX de Toluca que con el de Guanajuato. El ICL de ambos LX determino su potencial de daño ambiental y el ensayo con frijol relacionó este valor numérico con su fitotoxicidad.

Palabras Clave: Fitotoxicidad, lixiviados, relleno sanitarios, residuos sólidos urbanos,

ABSTRACT

In this paper the leachate pollution index (ICL) in two samples of leachate (LX) from a landfill (RESA) and one from an uncontrolled disposal site was determined. This work was complemented by a study of phytotoxicity on both LX bean (*Phaseolus vulgaris* L.) variety June with the aim of relating the numerical value of the ICL with the response of beans. Physicochemical parameters of Guanajuato LX and ICL (38.83) and LX Toluca (19.30) were determined. Two phytotoxicity bioassays of LX were performed in beans. In the first phytotoxicity bioassay was determined both LX beans in their early stages of growth in Petri dish. Bean seeds were treated with 6.25% LX to 12.5%, 25%, 50%, 75% and 100% (v/v) and irrigated with water seeds as absolute control. In the second bioassay, phytotoxicity was evaluated in both LX beans in their seedling stage, flowering and maturity. Beans LX was treated with 25, 50, 75 and 100% and used as a control on beans was fed with a mineral solution. Responses measured variables: % germination, phenotyping, biomass and grain yield. The results indicated that LX Guanajuato for their physicochemical properties more ICL was more phytotoxic beans in their early stages of growth from 25% dilution, the LX Toluca from 50%. For the second bioassay was determined that in the seedling and flowering stages LX functioned as both a beneficial effect on the plant, however grain yield in a toxic effect was observed more in the LX with the Toluca Guanajuato. The ICL both LX determine its potential for environmental damage and related bean test this number with phytotoxicity

Keys words: phytotoxicity, leachate, landfill, solid wastes.

Dedicado a mí

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos Institucionales

Se agradece este trabajo a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el apoyo brindado. Así como a los proyectos 150001 SENER-CONACyT, 2.7 y 5.15 (2013) de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH.

Agradecimientos particulares:

Quiero agradecer a Dios por la realización de este proyecto que emprendí. Por todas sus bondades y designios para llegar a terminar este ciclo.

Agradezco a mi hija Matilda por haberme acompañado en este camino y por haber soportado tantas estancias en los laboratorios. Por dormir ahí, comer ahí, vivir ahí y aprender las dos juntas de este sendero. Te agradezco hija por haber aguantado ausencias, regaños, tareas sin hacer y falta de atención. Gracias por la compañía. Siempre juntas.

Agradezco a mi Padre Jesús Manuel y a mi Madre Maura por su incansable perseverancia con esta hija para que realizara todos sus proyectos. Si no fuera por su insistencia, amor, comprensión, regaños no estaría aquí ni terminando este grado.

Gratitud profunda a mi estimada asesora, maestra, colega y ahora amiga a la Dra. Liliana Márquez Benavides. Por todo, por un detalle, por un regaño, por una comida. Gracias por ayudarme tanto, por sacarme del lodo de vez en vez, no sólo académicamente sino personal. Gracias por su inteligencia, por sus consejos y por ayudarme a salvar este camino que elegí seguir. No tengo palabras ni el tiempo y vida me alcanzarán para regresarle todo lo que me ha brindado aquí. Gracias por ser mi amiga.

Dr. Juan Manuel Sánchez, infinitas gracias por ser mi asesor, no solo de tesis sino de vida. Gracias por el conocimiento adquirido, por la confianza que me brindó y por levantar a esta

mujer de vez en vez, por estirarme de un tirón la puntería en lo académico y en lo personal. Gracias por permitirme conocer su persona, no solo al Dr. También a la persona. Mil gracias por apoyarme y darme aliento cuando más lo necesité. Gracias porque me inspira por la admiración y estima que siempre le guardaré.

Gracias a Susana, por ser mi amiga y darme ánimos, por ser amiga de mi hija, por cuidarla. A Martha por su infinito apoyo en todo lo que necesité. Por un detalle, por una comida por jugar con mi hija, por el dinero, por la ayuda, por la comprensión. A Pedro por su sincera amistad, ayuda y apoyo en el laboratorio y fuera de él, por guardarme mi material cuando necesitaba gracias por forrar la caja de Maty. A Vanessa y Eduardo Graduño porque también aprendí de ellos y por la ayuda brindada para acabar mi experimento. A Gladys, Yatziri, Mariana, Julissa, Eduardo Baltierra, Mayra, Celeste, Yunuem, Iván por toda su comprensión al haberme permitido tener a mi hija aquí, por cuidarla, entretenerla, jugar, aguantarla, por apreciarla y tratarla bien. A todos en general del Laboratorio de Microbiología Ambiental por su infinito apoyo. Gracias.

Al Dr, Marco Martínez Cinco, por haberme abierto las puertas de su casa cuando no lo tenía. Por su ayuda infinita en todo lo académico y por las bondades que su persona siempre ha mostrado.

A la Dra. Ruth, Dr Raúl, Dr. Otoniel y Dr. Edmundo por los conocimientos brindados, por una palabra de aliento y por el apoyo para realizar este trabajo.

A Mateo por el cargador, a Victor por su amistad y compañía, y a todos aquí en Morelia por ayudarme de una u otra forma.

A mis hermanos Silvia, Miguel, Marcela por su comprensión, su apoyo incondicional, por estar siempre. Por cuidar a mi hija cuando necesitaba escribir tesis o estar en el laboratorio. Por ayudarme y aguantarme.

Gracias Dios por todo

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son desechos sintéticos y naturales que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en actividades domésticas. En México la generación de RSU en el 2010 fue de 40,058,000 Ton y para el año 2011 se incrementó a 41,062,000 Ton de RSU (SEMARNAT 2011).

Actualmente en México y Latinoamérica la tecnología más usada para la disposición final de RSU es el uso de RESA (Schiappacasse *et al.* 2008). Sin embargo, en la comunidad europea los RESA son la última instancia y la menos favorable desde el punto de vista ambiental; la forma más común de gestionar los RSU es propiciar el reciclaje, la reutilización, incineración o incluso la pirolisis (Gallardo & Colomer-Mendoza 2011).

En los RESA se generan reacciones que llevan a la formación de biogás y LX, los cuales son un problema ambiental. Las emisiones producidas aumentan los gases de efecto invernadero. Los LX poseen componentes que son potencialmente contaminantes al entrar en contacto con el suelo, aguas subterráneas y superficiales (Arvizu & Huacuz 2003). Conocer las propiedades fisicoquímicas de LXS es el primer paso para evaluar la toxicidad a organismos y daños al ambiente (Słomczyńska & Słomczyński 2004).

Existen varias metodologías para evaluar el grado de contaminación de un LX al ambiente. Entre ellas se encuentran los análisis químicos (caracterización de LX, análisis del suelo y agua); los métodos biológicos (estudios ecotoxicológicos, fitotoxicidad y evaluaciones bioquímicas) y también la utilización de métodos numéricos. En esta última categoría se encuentra el *índice de contaminación de lixiviados* (ICL); que consiste en una herramienta cuantitativa en donde los datos sobre el grado de contaminación de LX de los RESA pueden ser reportados de manera uniforme. El ICL mide y compara el potencial de contaminación del LX de un RESA a otro (D. Kumar & Alappat 2005). Debido a la variabilidad de los componentes de un LX a otro es difícil homogeneizar la información y obtener un consenso de qué tan contaminante puede llegar a ser. Además, los análisis o métodos para evaluar el grado de contaminación de LX difieren unos de otros y cada estudio es específico. Por lo que el ICL es una herramienta concentradora de información de distintos parámetros de la caracterización de LX y que califica el potencial de contaminación de un LX numéricamente del 5-100. Sin embargo, se desconoce si este

número está en efecto relacionado con el efecto que un LX dado ejercería sobre un organismo vivo. El objetivo de este trabajo es determinar el ICL de 2 sitios de disposición final para estudiar su significancia en relación a la fitotoxicidad que los LX ocasionen sobre plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris L*)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Rellenos Sanitarios

Un RESA es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería, con la finalidad de controlar y minimizar el impacto ambiental y reducir los riesgos a la salud. De acuerdo a la norma mexicana (NOM-083-SEMARNAT 2003), un RESA debe contar con una barrera geológica natural que funcione como sistema de impermeabilización, un sistema para la extracción y captación del biogás, celdas que incluyen los residuos sólidos depositados y el material de cobertura, un sistema de drenaje pluvial para el desvío de escurrimientos de agua de lluvia, un sistema de canales subterráneos de drenaje y colecta de LX para su posterior control y tratamiento. La norma señala que los sitios que no cumplan con las especificaciones de RESA se clasifican en sitios controlados y sitios no controlados; los primeros cumplen con requerimientos de RESA pero no con los de impermeabilización y los segundos no cumplen con la normatividad ambiental.

Independientemente del control que se tenga en el sitio, la descomposición de RSU genera emisiones de biogás, cuyos principales componentes son el metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), considerados gases de efecto invernadero (Solórzano 2003). Otro problema ambiental que los RESA generan son los LX que contienen componentes tóxicos y si se infiltran al subsuelo, aguas subterráneas y superficiales de riesgo a la salud humana y al ecosistema (Kiss *et al.* 2007).

2.2. Degradación de la fracción orgánica de RSU en RESA.

La formación del LX depende de los componentes de los RSU y condiciones ambientales como humedad, oxígeno (O₂) disponible, temperatura (Szantó & Colomer-Mendoza 2011) y otros factores que serán tratados en otra sección. El LX se genera por la entrada de agua de lluvia al sitio y por la descomposición anaerobia de la fracción orgánica (FO) de los

RSU, que está constituida por carbohidratos (60%), proteínas (2.5%) y lípidos (6%) (Westlake 1995). Su aspecto es de amarillo oscuro a negro, de olor fuerte y penetrante, fluido y, en zonas de acumulación y/o estancamiento, presenta una capa superficial de varios centímetros de espuma (Szantó & Colomer-Mendoza 2011). La descripción de la descomposición de la FO de RSU y formación de LX se describen en cuatro fases:

Fase I Hidrolítica aerobia. Macromoléculas como las proteínas son hidrolizadas a aminoácidos; polisacáridos a azúcares simples y grasas de alto peso molecular en ácidos grasos y glicerol para su posterior degradación a ácidos volátiles durante aprox. 15 días (Szantó & Colomer-Mendoza 2011; Tchobanoglous *et al.* 1998). En esta etapa, el O_2 de los espacios vacíos de las celdas de RSU es consumido rápidamente, se produce CO_2 (Figura 1) y se da un incremento en la temperatura de los RSU ($70^\circ C$) (Kjeldsen, *et al.*, 2002). La mayoría del LX que se genera deriva de la humedad liberada por la compactación de los RSU y el agua de lluvia que entra.

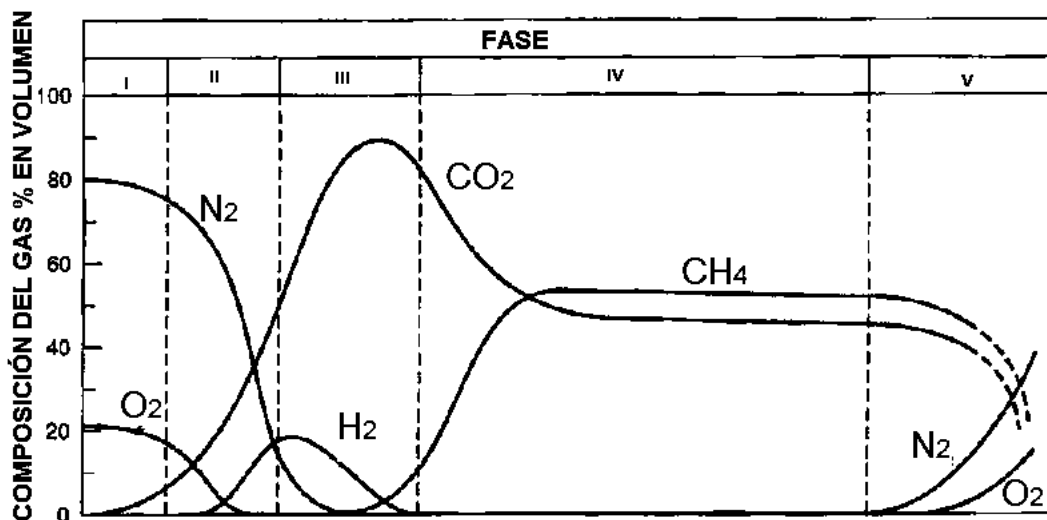


Figura 1. Formación de gases en un RESA (Tchobanoglous *et al.* 1998). C

Fase II fermentativa o acidogénica:

La fermentación de los monómeros de azúcares y ácidos grasos produce ácido butírico, acético CO_2 y H_2 . La fermentación de aminoácidos produce ácidos grasos de cadena corta como el ácido succínico, aminoaléxico y el H_2 (Szantó & Colomer-Mendoza 2011). En

esta fase, el pH del LX (Figura 2), desciende a causa de la formación de los ácidos orgánicos y por la elevada concentración de CO₂ dentro del RESA. (Tchobanoglous, *et al.*, 1998).

Fase III acetogénica: Las bacterias como *Syntrophomonas wolfei* y *S.wolinii* transforman el valeriato, butirato y propionato en acetato y H₂ (Szantó & Colomer-Mendoza 2011). El pH del LX, descenderá aún más hasta 5 o menos por los ácidos orgánicos que siguen generándose y el CO₂ de la fase anterior (Figura 2). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la conductividad del LX se incrementará significativamente durante esta fase. Debido al pH ácido en el LX se solubilizan algunos metales pesados como cromo (Cr), plomo (Pb), níquel (Ni) y arsénico (As) (Tchobanoglous, *et al.*, 1998).

Fase IV metanogénica, es dominada por bacterias estrictamente anaerobias llamadas metanogénicas. Son bacterias tipo archeas *hidrogenotróficas* y *acetoclásticas*, convierten el ácido acético y H₂, producidos en la fase anterior en CH₄ y CO₂. Es en esta etapa donde se registra la más alta producción de CH₄ de un 40 a un 60% por volumen de biogás. El pH del LX que era ácido en la fase anterior, ahora ascenderá hasta 6.8 a 8. Bajo estas condiciones se reducirá la concentración de DBO y la demanda química de oxígeno (DQO) (Kjeldsen *et al.* 2002; Tchobanoglous *et al.* 1998). Esta fase dura de 10 a 25 años, dependiendo de las condiciones del sitio.

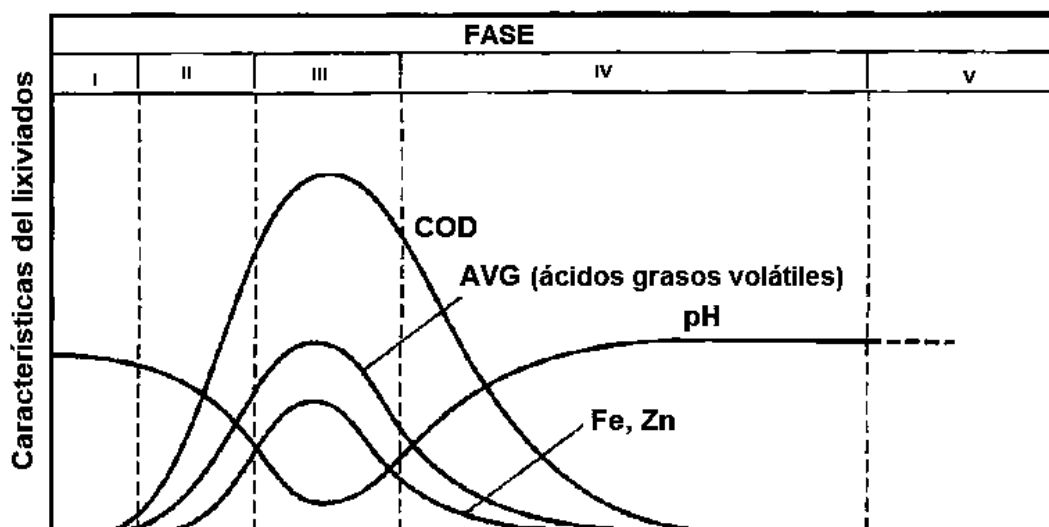


Figura 2. Etapas en la Formación de lixiviados en el RESA (Tchobanoglous *et al.* 1998).

2.3. Composición química de lixiviados

Los LX de RESA contienen un amplio número de compuestos naturales orgánicos, inorgánicos y xenobióticos. En general, los LX tienen altas concentraciones de materia orgánica y componentes inorgánicos, fuertemente asociados a la fase de degradación del sitio de disposición final. La concentración de estos compuestos son de 1000 a 5000 veces más altos que los valores de aguas residuales (Kjeldsen *et al.*, 2002). La Tabla 1 muestra la composición general de un LX de RESA.

Tabla 1. Composición química de lixiviados de rellenos sanitarios (Bagchi 1994)

Parámetro	Rango de concentraciones (mg/L, excepto los indicados)
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	584 - 55,000
Conductividad	480 - 72,500
Total de Sólidos Suspendidos (TSS)	2 - 140,900
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	ND - 195,000
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	6.6 - 99,000
Carbono Orgánico Total (COT)	ND - 40,000
pH	3.7-8.9 unidades
Alcalinidad Total	ND - 15,050
Dureza	0.1 - 225,000
Cloruros	2 - 11,375
Calcio	3 - 2,500
Sodio	12 - 6,010

Total de Nitrógeno Kjeldahl	2	-	3,320
Hierro	ND	-	4,000
Potasio	ND	-	3,200
Magnesio	4	-	780
nitrógeno Amoniacal	ND	-	1,200
Sulfato	ND	-	180
Aluminio	ND	-	85
Zinc	ND	-	731
Magnesio	ND	-	400
Fósforo Total	ND	-	234
Boro	0.87	-	13
Bario	ND	-	13
Níquel	ND	-	8
Nitrógeno-Nitrato	ND	-	250
Plomo	ND	-	14
Cromo	ND	-	6
Antimonio	ND	-	3
Cobre	ND	-	9
Talio	ND	-	1
Cianuro	ND	-	6
Arsénico	ND	-	70
Molibdeno	0.01	-	1
Estaño	ND	-	0
Nitrógeno-Nitrito	ND	-	1
Selenio	ND	-	2
Cadmio	ND	-	0
Plata	ND	-	2
Berilio	ND	-	0
Mercurio	ND	-	3
Turbidez	40	-	500 Jackson unidades

Además de los cambios que ocurren por fase, la composición de LX dependen de la edad del RESA, composición de los RSU vertidos en el sitio, forma de operar del RESA, humedad de la matriz de los residuos, temperatura, precipitación pluvial, diseño de la cobertura diaria, grado de compactación, etc. (Kostova 2006; Robinson 2007). Según Robinson (2007) la composición y concentración de contaminantes de LX varía de acuerdo a la ubicación del RESA, el clima, el tipo de RESA, si se le da tratamiento o no al LX, si se encuentra en fase acidogénica o metanogénica. La Tabla 2 muestra la variabilidad de los componentes de LXS de diferentes RESA en el mundo.

Tabla 2. Composición química de lixiviados de diferentes rellenos sanitarios.

Parámetro (mg/L) *	Estados Unidos ^a	Italia ^a	Alemania ^a	México ^b
pH	7.03-8.50	6-8.5	5.7-8.1	7.9-8.5
Conductividad eléctrica	3.58-14.16 +	-	-	17.1-18.5 ++
DQO	320-1340	7750-38,520	1630-63,700	4268-7610
DBO	-	-	-	236-2580
Cloruros	-	-	-	2489-3654
N-NH3	-	-	-	795-2303
N-org	-	-	-	82-320
Nitrógeno Total Kjeldahl	-	-	-	1004-2515
K	198-778	-	-	1636-23100
Na	320-1342	-	-	1632-28180
Ca	47.2-137.5	0-175	70-290	-
Mg	27.8-103	827-1469	100-270	-
Cd	<0.15	-	-	0.001-0.158
Cr	0.01-0.18	-	-	4.74-14.35
Cu	0.01-4.38	-	-	0.056-0.388
Fe	0.25-5.44	47-330	8-1979	7.92-164.4
Mn	0.18-5.27	-	-	0.12-1.49
Ni	0.04-0.14	-	-	0.319-0.387
Pb	<0.02	-	-	0.016-0.9
Zn	0.04-1.61	5.0-10	-	0.43-5.8

* Excepto el pH y conductividad eléctrica.

+ en dS/m ++ mS/cm

^a (Al-Wabel *et al.* 2011)

^b (Mendez-Novelo *et al.* 2009)

La edad del relleno es uno de los factores más importantes que influyen en la composición de un LX. Los LX jóvenes son los que proceden de sitios de disposición final de 1- 2 años de operación y, los maduros son con más de 3 -20 años de operación (Giraldo 2001; Kulikowska & Klimiuk 2008). Los LX jóvenes presentan valores más altos de la demanda química de oxígeno (DQO) y de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) como se observa en la tabla 3. Algunas diferencias entre LX jóvenes y maduros se muestran a continuación:

Tabla 3. Composición química de lixiviados de RESA de diferentes edades

Parámetro(mg/L) excepto pH	Edad del Relleno Sanitario en años			
	0-5	5-10	10-20	>20
DBO	10,000 - 25,000	1,000 - 4,000	50 - 1,000	<50
DQO	15,000 - 40,000	10,000 - 20,000	1,000 - 5,000	<1000
Nitrógeno Kjeldhal	1,000 - 3,000	400 - 600	75 - 300	<50
Nitrógeno amoniacal	500 - 1,500	300 - 500	50 - 200	<30
Sólidos Disueltos Totales	10,000 - 25,000	5,000 - 10,000	2,000 - 5,000	<1000
pH	3 - 6	6 - 7	7 - 8	8
Calcio	2,000 - 4,000	500 - 2,000	300 - 500	<300
Sodio y Potasio	2,000 - 4,000	500 - 1,500	100 - 500	<100
Magnesio y Hierro	500 - 1,500	500 - 1,000	100 - 500	<100
Zinc y Aluminio	100 - 200	50 - 100	10 - 50	<10
Cloruros	1,000 - 3,000	500 - 2,000	100 - 500	<100
Sulfatos	500 - 2,000	200 - 1,000	50 - 200	<50
Fósforo	100 - 300	10 - 100	-	<10

(El-Fadel *et al.* 2002)

Según Bagchi (1994), el volumen de un LX depende de:

-La precipitación: La cantidad de lluvia que caiga sobre el RESA influenciará en la cantidad del LX. El contenido de humedad del residuo ya que la cantidad de LX aumentará cuando los RSU se comprimen y liberará agua, mientras que un RSU seco reducirá el volumen de LX.

El diseño de la cobertura final. El volumen del LX se reducirá significativamente después de que el relleno sea cerrado y finalmente cubierto. Esto es debido al crecimiento de vegetación en la superficie de la capa final que reduce la infiltración de humedad.

Como se observa en las tablas, los LX de RESA son muy complejos y distintos entre si. La composición de LX se puede realizar mediante caracterizaciones fisicoquímicas Sin embargo, conocer únicamente la caracterización de un LX puede no proporcionar información suficiente acerca del impacto que puede causar en el ambiente; de ahí el interés en el ICL que incluye los parámetros más significativos y permitir una comparación confiable entre LX.

3. ANTECEDENTES

En esta sección se abordarán los métodos para evaluar el grado de contaminación por LX así como los impactos provocados en el ambiente por los mismos.

3.1. Contaminación de aguas por lixiviados

Las aguas superficiales y subterráneas son los principales impactados por LXS (Kjeldsen *et al.* 2002).

En un estudio en el 2011, Akinbile & Yusoff reportaron pozos de agua contaminados por LXS cercanos a un RESA en Nigeria. Concentraciones de Fe de 0.9 a 1.4 mg/L, nitrato de 30 a 60 mg/L, nitrito de 0.7 a 0.9 mg/L y calcio de 17 a 122 mg/L se encontraron en los análisis de agua. Metales pesados como Zn y Plomo (Pb) tenían valores de 0.3 a 2.3 mg/L y 1.1 a 1.3 mg/L, respectivamente. Los datos anteriores rebasaron los límites permisibles para la calidad de agua en ese país.

3.2. Contaminación de suelos por lixiviados

Las geomembranas para el recubrimiento de la base de un RESA son de PEAD (polietileno reticulado de alta densidad) de diferentes diámetros de espesor. Estos sistemas evitan la migración de LX en el subsuelo (Sánchez-Yáñez & Márquez-Benavides 2011). Un sitio de disposición final no controlado que sólo utiliza suelo como recubrimiento es potencialmente más contaminante que uno que utiliza las membranas. Daños al suelo por LX han sido reportados por autores como Sunil *et al.*, (2009), quienes indicaron que un suelo laterítico contaminado con LX se modificaron las propiedades químicas y promovieron la destrucción de los agregados de la arcilla. Esto ocasionó una disminución en la dureza mecánica (resistencia al corte) del suelo.

3.3. Herramientas para medir el potencial de contaminación de lixiviados

La composición de un LX puede ser potencialmente tóxica también para los organismos de los sistemas mencionados. No obstante, las herramientas para evaluar el grado de contaminación son múltiples y particularizadas por áreas, son heterogéneas ya sean en plantas o animales, agua o suelo. Estas evaluaciones incluyen análisis químicos de suelo, de agua y caracterización de LX; bioensayos: estudios ecotoxicológicos, fitotoxicidad y

evaluaciones bioquímicas y métodos numéricos (apoyados con índices de contaminación como el índice de interacción ambiental y el ICL). La Figura 3 muestra un diagrama donde se resumen las distintas formas de medir el grado de contaminación de un LX.



Figura 3. Herramientas para medir el grado de contaminación de lixiviados

3.3.1. Análisis químicos

Otra forma de medir el potencial de contaminación de LX es la caracterización. Nájera *et al.* (2009) realizaron la caracterización de los LX de un sitio de disposición final de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, para determinar el tratamiento que se le pudiera dar al LX en base a sus propiedades fisicoquímicas y la concentración de los contaminantes en el LX.

Al-Yaqout & Hamoda (2003) determinaron las propiedades fisicoquímicas de LX de dos RESA uno activo y otro clausurado en Kuwait. El análisis de datos confirmó que ambos sitios están severamente contaminados debido a los compuestos orgánicos, sales y metales pesados de los LXS.

A pesar de que se realice la caracterización de LX esta información no es precisa ni uniforme, ya que cada LX varía de acuerdo al sitio, clima y factores mencionados anteriormente. Además, la información de qué tan contaminante puede llegar a ser, más

allá es difícil de predecir solo con estos valores ya que muchas veces se refiere a límites mayormente diseñados para aguas residuales.

3.3.2. Bioensayos

Los bioensayos de toxicidad son procesos experimentales en donde organismos como peces, ratas, crustáceos, plantas o vegetales son expuestos a diferente concentración o dosis del LX para evaluar la respuesta del organismo expuesto al agente (Piña-Guzmán 2011).

Algunos de los ensayos biológicos para evaluar los efectos de los LX de RESA en el ambiente son estudios ecotoxicológicos. Pastor *et al.* (1993) analizaron el efecto de LXS de un RESA con suelo silíceo sobre ratas (*Rattus norvegicus*) y dos plantas: pasto (*Hordeum murinum* L) y una leguminosa (*Trifolium tomentosum*) que crecen en el RESA. Las ratas con agua natural como control, LX al 50%, LX sintético con 490 ppm de sulfato y LX sintético con 10 ppm de fluoruro. Las plantas fueron sometidas al mismo tratamiento. Las variables de respuesta fueron el peso de las ratas y el crecimiento de las plantas. No encontraron diferencias significativas en el peso de las ratas al con LX al 50% ni el control; sin embargo LX con sulfato provocaron una disminución en el peso de los animales después de 8 semanas. Con las plantas, no hubo diferencia significativa entre el control y los tratamientos.

Otros de los bioensayos para evaluar los efectos del LX en organismos son los de fitotoxicidad. Por mencionar un ejemplo Žaltauskaitė & Čypaitė (2008) determinaron la fitotoxicidad de LX en lechuga (*Lactuca sativa* L.) y mastuerzo (*Lepidium sativum* L.). Las variables de respuesta fueron la germinación de las semillas y el crecimiento a corto plazo de las plántulas. Producto de esta investigación se obtuvo que para estas plantas los LXS son severamente tóxicos ya que la germinación de las semillas disminuyó 61% en mastuerzo y 72% para lechuga expuestas a LX concentrados (100%) en comparación con LXS diluidos o con un control. Los LX también inhibieron el crecimiento de la raíz hasta un 74.5% en mastuerzo y un 86% en lechuga. Diluciones de 6.25%, 12.5%, 25% y 50% de LX tienen suficientes nutrimentos como el nitrógeno y fósforo no limitan el porcentaje de germinación de las semillas y el crecimiento de la raíz. También se pueden utilizar otro tipo de plantas como el trigo (*Triticum spp*), maíz (*Zea mays*) y frijol (Marín-M.D. *et al.* 2006)

como indicadores de toxicidad por LX u otro contaminante como metales pesados, hidrocarburos o aguas residuales.

3.3.3. Métodos numéricos

También existen métodos estadísticos para analizar los LX. Según (Kylefors 2003) se puede analizar el LX de un RESA, determinar su calidad, su clasificación según el tipo de RESA y predecir ciertos componentes orgánicos no incluidos en análisis comunes a través del método Multivariado que brinda información de todas las variables del LX sin la necesidad de llevar a cabo tantos análisis de laboratorio.

En relación a los RESA existen disponibles dos índices de contaminación:

(i) Un índice de interacción ambiental propuesto por (Calvo *et al.* 2004) que aplica una metodología de Diagnóstico Ambiental para Vertederos de Residuos Urbanos en la provincia de Granada en España y,

(ii) El ICL propuesto por Kumar y Alappat (2003).

El índice de interacción ambiental se basa en la sumatoria de 5 parámetros ambientales aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo, atmósfera y salud y que son los receptores de los impactos producidos por los rellenos. Esta información es útil en la toma de decisiones para el mejoramiento, reducción y corrección de impactos ambientales causados por los RESA.

Por otra parte, el ICL desarrollado por Kumar y Alappat, (2003) es una herramienta que permite cuantificar el potencial de contaminación de LXS de diferentes RESA basándose en una escala comparativa. El uso de esta herramienta provee información acerca de cual RESA requieren atención inmediata en términos de medidas de remediación para el mejoramiento de las instalaciones. El ICL se describe con detalle en la siguiente sección.

3.4. Índice de Contaminación de lixiviados (ICL)

La formulación y elaboración del ICL se basa en la metodología Delphi desarrollado por la Corporación Rand en E.U., (Dalkey 1969). Esta técnica utiliza encuestas para aprovechar el conocimiento de expertos en el tema, buscando alcanzar opiniones lo más uniformemente posible de la temática tratada.

Para la selección de las variables se seleccionaron de la literatura reportada 50 parámetros comunes de LX para su posible inclusión en el ICL. Se aplicó un primer cuestionario a los panelistas para ver cuáles de los 50 parámetros se podrían utilizar para la inclusión en ICL propuesto, también se les preguntó si añadirían alguna otra variable a la lista de los 50 parámetros y que pudiera ser incluido en el ICL. La designación de los parámetros se hizo mediante 3 opciones: No incluir, indeciso o incluirlo. A los panelistas se les pidió que a cada parámetro marcado como “incluido” lo calificaran de acuerdo a la importancia de contribución de contaminación general en el LX. El rango de calificación fue dado en una escala del 1 al 5, siendo el 1 el parámetro que menor importancia tiene de contaminación al LX y 5 el parámetro que tiene la mayor importancia. Basado en ese cuestionario se procedió otro segundo cuestionario con la finalidad de hacer un mejor consenso de los 18 parámetros seleccionados.

Los parámetros seleccionados incluyen parámetros físicos, químicos y biológicos.

En un tercer cuestionario a un grupo seleccionado de expertos se les encuestó para el desarrollo de las curvas de calibración para las 18 variables seleccionadas. Se les proporcionó hojas de gráficas, donde los niveles de contaminación del LX fueron dados del 0 al 100 (puntuación en el subíndice) e indicados en el eje de las “x” en las gráficas. A la vez, el nivel de varias concentraciones de una variable en particular (ya reportadas en literatura anteriormente) se representó en el eje de las “y”.

A los expertos se les pidió dibujar una curva en cada gráfica, la cual a su juicio representa la contaminación de LX producida por las diferentes concentraciones de cada variable contaminante. Las curvas tenían que iniciar con un valor mínimo de 5, inclusive si la variable contaminante no presentaba ningún valor de contaminación. Al darle el valor mínimo de 5 se aseguraba que el valor del ICL no diera cero, se obtuvo así el rango teórico del ICL de 5 a 100 (Kumar y Alappat 2003).

Para aplicar este índice, se realizó un estudio en cuatro RESA en Hong Kong para determinar el potencial de contaminación de LX. Se compararon dos RESA clausurados Ma Tso-Lung (MTL) y Nagu Chi Want (NCW) con dos que aún estaban en operación Pillar Point (PP) y Shuen Wan (SW). El valor del ICL para cada sitio fue el siguiente: 45.01 para el sitio clausurado MTL, 36.48 para PP y 39.04 SW para los dos sitios activos y

15.97 para el sitio clausurado NCW. El sitio MTL que tuvo el ICL más alto indica que el RESA aún no está estabilizado, que el LX debe ser tratado y el lugar debe ser monitoreado constantemente. El sitio NCW con el valor más bajo del ICL indica que el LX del lugar está estabilizado. Este cálculo del ICL sirvió para comparar los cuatro RESA del lugar y conocer cuál de esos cuatro necesita más atención. Con esta escala se realiza la comparación de los sitios de disposición final con el ICL y se obtiene información de los RESA que requieren acciones de remediación y monitoreo.

El ICL por ser una escala numérica, aporta información con un número del grado de contaminación del LX. Un estudio de fitotoxicidad ayudará a estudiar si existe una relación entre el número generado y el impacto que pueda causar un LX frente a una planta como el frijol.

4. JUSTIFICACION

. Por tanto, la utilización de una herramienta tal como el ICL puede resultar benéfica para efectos de comparación entre distintos sitios de disposición, dado de que está basada en la opinión del conocimiento experto y un análisis estadístico. El impacto que causan los LX al ambiente se es posible evaluarlo con un estudio de fitotoxicidad. El frijol que es una planta de rápido crecimiento se puede utilizar para dicho bioensayo y relacionar la fitotoxicidad con el ICL. El cálculo del ICL en México es escaso o no existente; el desarrollo de este trabajo permitirá establecer una base de datos de caracterización de LXS para referencias futuras.

5. HIPÓTESIS

EL valor numérico del ICL tiene relación con el efecto fitotóxico del lixiviado sobre frijol.

6. OBJETIVO

Obtener el ICL de dos lixiviados de dos sitios de disposición final de México y determinar su relación con el impacto fitotóxico que ejercen los lixiviado en plantas de frijol.

Objetivos Particulares:

- Calcular el ICL de 2 lixiviados de distintos sitios: Guanajuato y Edo. De México.
- Realizar un primer bioensayo de fitotoxicidad del lixiviado sobre frijol en cajas Petri en las primeras fases de crecimiento de raíz y tallo.
- Analizar lixiviados para determinar a partir de cuál concentración comienza el lixiviado a ser fitotóxico para el frijol.
- Realizar un segundo bioensayo con de fitotoxicidad en frijol con jarras de Leonard en sus tres fases de crecimiento: plántula, floración y madurez.
- Relacionar la respuesta del frijol expuesto a ambos lixiviados con el valor del ICL obtenido.

7. METODOLOGÍA

El plan general de trabajo y la metodología empleada para este trabajo se realizará en tres fases, de las cuales se han finalizado dos.

7.1 Fase I. Obtención del ICL de Guanajuato y Edo. De México

Actividad 1. Obtención de las muestras de lixiviados de Guanajuato y Edo. De México.

Actividad 2. Determinación de los parámetros fisicoquímicos correspondientes

Actividad 3. Cálculo el ICL

7.2 FASE II. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol en cajas Petri

Actividad 1. Formulación del diseño experimental

Actividad 2. Montaje y monitoreo de prueba de fitotoxicidad en cajas Petri

Actividad 3. Medición de variables respuesta

7.3 FASE III. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol con jarras de Leonard

Actividad 1. Formulación del segundo diseño experimental

Actividad 2. Montaje del experimento y preparación del material

Actividad 3. Medición de variables respuesta

7.1. Fase I. Obtención del ICL de Guanajuato y Edo. De México

7.1.1. Actividad 1. Obtención de muestras de lixiviados de RESA de Guanajuato y Edo. De México

Se tomaron muestras de dos sitios de disposición final SDF: el primero proporcionado por Universidad Tecnológica de León, Gto. El SDF se localiza en San Francisco del Rincón que entre las coordenadas geográficas $20^{\circ} 55' 07''$ de latitud norte y $101^{\circ} 55' 47''$ de longitud oeste, con una altitud aproximada de 1830 m.s.n.m. Está localizado al sureste de la zona urbana municipal, entre las comunidades de Maravillas, El Pitahayo, El Jaralillo y Vista Hermosa. Se ubica en la carretera El Maguey-Jesús del Monte km. 7+800, frente a la comunidad La California (figura 4). El segundo LX proporcionado por el Instituto Tecnológico de Toluca fue obtenido del RESA ubicado en el municipio de Zinacantepec (Figura 5) el cual se localiza en el ejido de San Luis Mexztepec en el km 11.5 de la carretera Toluca-Zitácuaro. Zinacantepec se localiza a los $19^{\circ} 17' 00''$ de latitud norte (LN) y a los $99^{\circ} 44' 00''$ de longitud oeste (LW) del meridiano de Wreenwich; El municipio de Zinacantepec limita al norte con Almoloya de Juárez; al oeste con Toluca (TOL); al oeste con Temascaltepec y Amanalco de Becerra y al sureste con Coatepec Harinas, el clima es templado subhúmedo con temperaturas en verano de 20°C e invierno de 5°C bajo cero de esta ciudad, la cual es una de las ciudades más grandes de México con una temperatura de clima subhúmedo y una precipitación anual de 747 mm.



Figura 4. Localización del SDF de San Francisco del Rincón.

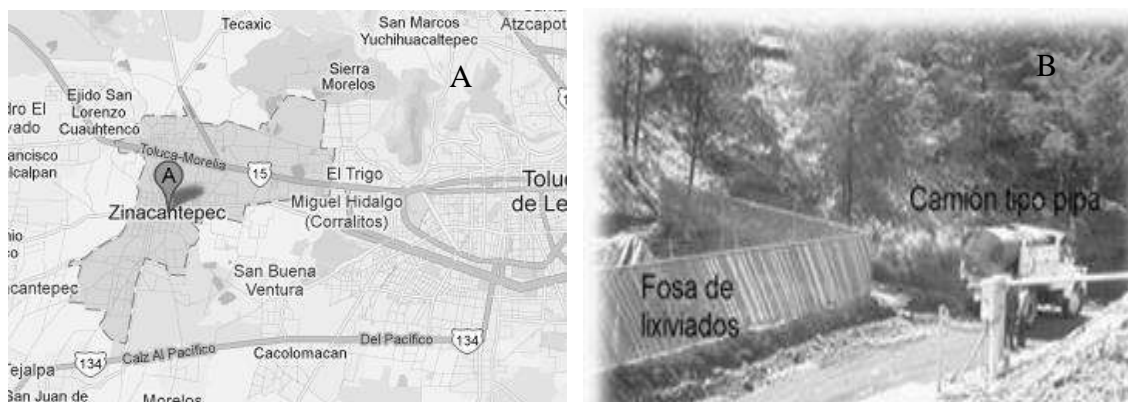


Figura 5. Localización de Relleno Sanitario de Zinacantepec (A) y laguna de lixiviados del sitio (B).

Del LX de TOL se obtuvo una muestra simple de lixiviados de la descarga correspondiente a la fosa de la celda 1 del RESA en estudio y se utilizó un camión tipo pipa como recipiente muestreador (propiedad de la empresa), el cual colectó la muestra mediante bombeo de la laguna de lixiviados de la Celda 1 (Figura 5).

De los dos sitios se colectaron 20 L en garrafas de plástico, llevadas inmediatamente al laboratorio y mantenidas a 4°C. La toma de muestras de ambos LX se realizó en base a los lineamientos de la NMX-AA-003-1980.

7.1.2. Actividad 2. Determinación de los parámetros fisicoquímicos correspondientes

Se realizaron los análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos, para la caracterización de cada uno de los LXS base a las Normas Mexicanas para la calidad de agua: Físicos, pH (NMX-AA-008-SCFI-2000), sólidos totales disueltos (STD) en base a la norma (NMX-AA-034-1981 1981). Químicos: DBO₅, (NMX-AA-028-SCFI- 2001). La determinación de DQO (Anexo II), se realizó de acuerdo al método de dicromato aprobado por la USEPA (HACH 1997). Total Nitrógeno Kjeldhal (NMX-AA-026-SCFI-2001); Nitrógeno Amoniacal de acuerdo al método colorimétrico (Anexo II) reportado por (Márquez-Benavides 2004).; Hierro Total, Cobre, Níquel, Zinc, Plomo, Cromo Total, Mercurio, Arsénico con (NMX-AA-051-SCFI-2001); Compuestos Fenólicos por cromatografía (Anexo II) de gases en base a (Valenciaga *et al.* 2009), Cloruros, (NMX-AA-073-SCFI-2001.); Cianuros, (NMX-AA-058-SCFI- 2001) y Biológicos, coliformes totales en base a la norma (NMX-AA-42-1987).

7.1.3. Actividad 3. Cálculo del ICL

Se determinó en base a (Kumar & Alappat 2005) el ICL de las muestras del LXS obtenidas. Véase Anexo I.

El valor del ICL se obtuvo mediante la ecuación 1 propuesta por (D. Kumar & Alappat 2005) para cuando se tienen todos los parámetros y la ecuación 2 para cuando falta alguno de los parámetros contaminantes. Estos valores se obtuvieron por medio de las curvas expuestas en el Anexo I, localizando en el eje de las “x” la concentración de cada parámetro contaminante y en el eje de las “y” el valor del subíndice “p” para posteriormente hacer el cálculo y obtener el valor del ICL.

$$LPI = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad \text{Ec. (1)}$$

$$LPI = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

LPI= Índice de Contaminación de lixiviados

Wi= el peso para la variable del contaminante

Pi= El valor del subíndice para la variable contaminante de lixiviados

m= número de variables de contaminantes de lixiviados usados en el cálculo

Los pasos que se siguieron para la obtención del ICL fueron los siguientes:

(1) Se determinó la concentración de los 18 contaminantes utilizados para el ICL. (2) Se utilizaron las curvas de calibración, y localizó cada parámetro contaminante en el eje de las “x” con su respectiva concentración. (3) Se realizó un cruce entre la concentración y la curva en el eje de las “y” y así se encontró el valor de (p_i). (4) Se multiplicó el valor del peso del contaminante dado por w_i y por el valor encontrado de p_i . (5) Se realizó la

sumatoria total de $(w_i)(p_i)$ y se obtuvo un valor parcial del ICL. (6) El valor parcial del ICL obtenido se divide entre la sumatoria del peso del contaminante (w_i) y así se obtuvo el valor final del ICL (Tabla 7)

7.2. FASE II. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol en cajas Petri

7.2.1. Actividad 1. Formulación del diseño experimental

Se realizó este primer ensayo sobre cajas Petri con la finalidad de obtener la concentración límite a la cual el LX comienza a ser tóxico para el frijol, únicamente para las primeras fases de crecimiento de raíz y tallo, así como el % de germinación de la semilla. Posteriormente utilizar esas concentraciones límites de ambos LXS y realizar un segundo bioensayo en jarras de Leonard y alimentar el frijol con las concentraciones encontradas. El diseño experimental para este primer bioensayo fue de 7 tratamientos para cada LX con 4 semillas por caja y 5 repeticiones por tratamiento (Tabla 4).

Tabla 4. Diseño experimental para el bioensayo de fitotoxicidad de frijol (*Phaseolus Vulgaris*, L)

Frijol	Lixiviado Guanajuato					Lixiviado Toluca				
T1 CA Solo agua										
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
T2 LX 6.25%										
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
T3 LX 12.5%										
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
T4 LX 25%										
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
T5 LX 50%										
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5

T6 LX 75%										
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
T7 LX 100 %										
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5

7.2.2. Actividad 2. Montaje y monitoreo de prueba de fitotoxicidad en cajas Petri

Prueba de viabilidad de la semilla

Se colocaron las semillas en un vaso de precipitado con agua y se dejaron por 10 minutos. Las semillas que se fueron al fondo se escogieron.

Preparación de las semillas

El ensayo de fitotoxicidad fue llevado a cabo en cajas Petri con semillas de frijol (*Phaseolus Vulgaris*, L) variedad junio previamente desinfectadas con una solución de hipoclorito de sodio al 4%. por 10 minutos, se esterilizó agua por 15 minutos a 121°C, y se enjuagaron las semillas con agua estéril 6 veces, posteriormente las semillas se colocaron en una solución de etanol al 70% por 10 minutos, se enjuagó con agua estéril nuevamente.

Siembra de semillas

Se sembraron cuatro semillas de frijol en cada caja Petri en base (Žaltauskaitė & Čypaitė 2008) con papel canela y algodón estéril como se muestra en la tabla 1.

Perfil de diluciones de lixiviado

Para este primer bioensayo se utilizó un control (C) con agua de la llave como referencia y para los demás tratamientos el frijol fue alimentado con 10 ml del LX de TOL y de GTO como se observa en la figura 6 y 7, con concentraciones de 6.25, 12.5, 25, 75 y 100% de acuerdo a las recomendaciones de la (EPA 2000) para las pruebas de toxicidad en organismos. Las semillas de frijol se alimentaron con cada uno de los LXS en las cajas Petri, solo al inicio del experimento, después sólo se irrigaron con 2 ml de agua estéril. Se colocaron las cajas en oscuridad a 25°C ± 2°C durante 24 horas, posteriormente a 25°C ± 2°C con un régimen de 16:8 horas luz:oscuridad durante 120 horas.

7.2.3. Actividad 3. Medición de variables respuesta

Evaluación de la fitotoxicidad en primordio de frijol

Se midieron variables de % de germinación y en base a su fenotipia: longitud de la raíz y altura de la planta en sus primeras fases de crecimiento. La biomasa se midió en base al peso fresco aéreo (PFA) y radical (PFR) y peso seco radical (PSR) y aéreo (PSA).

El % de germinación se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de germinación} = \frac{\# \text{ total de semillas}}{\# \text{ de semillas germinadas}} \times 100 \quad (\text{ec. 3})$$

Las variables de fenotipia se midieron con una regla y se obtuvieron los datos de primordio de tallo y raíz. El PFA y PFR se pesó en una balanza analítica marca OHAUS AS260D ; el PSA y PSR se obtuvo al secar la parte aérea de la planta y parte radical en horno marca FELISA FE-291A a 80°C/24 h. de convección forzada. La metodología para realizar este primer experimento se resume a continuación en el siguiente diagrama de flujo correspondiente a la figura 8.

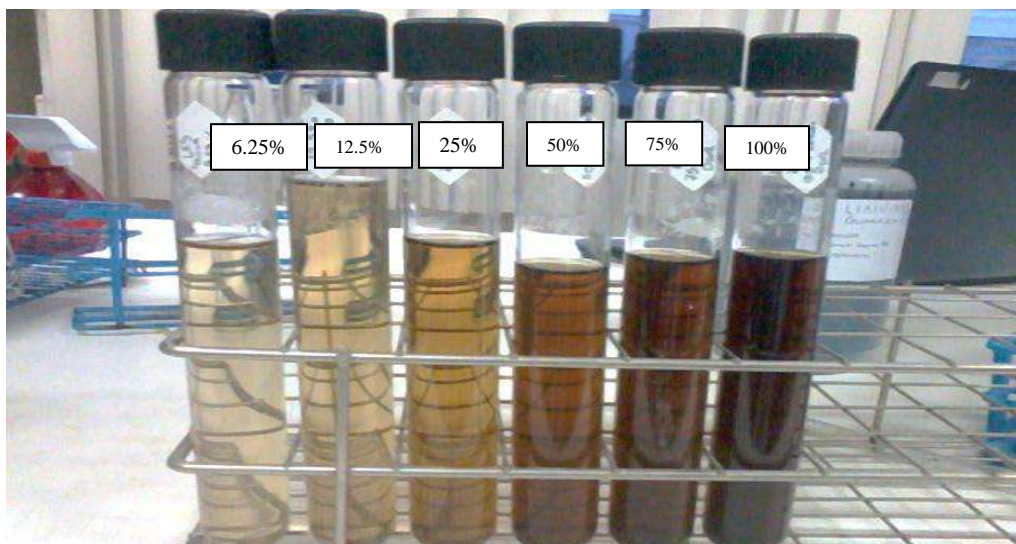


Figura 6. Diluciones del lixiviado de Toluca

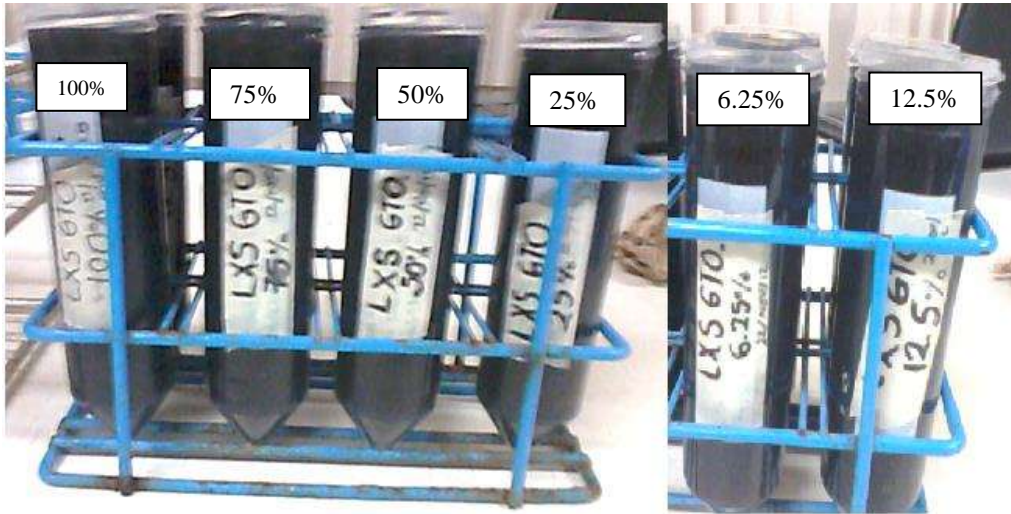


Figura 7. Diluciones del lixiviado de Guanajuato

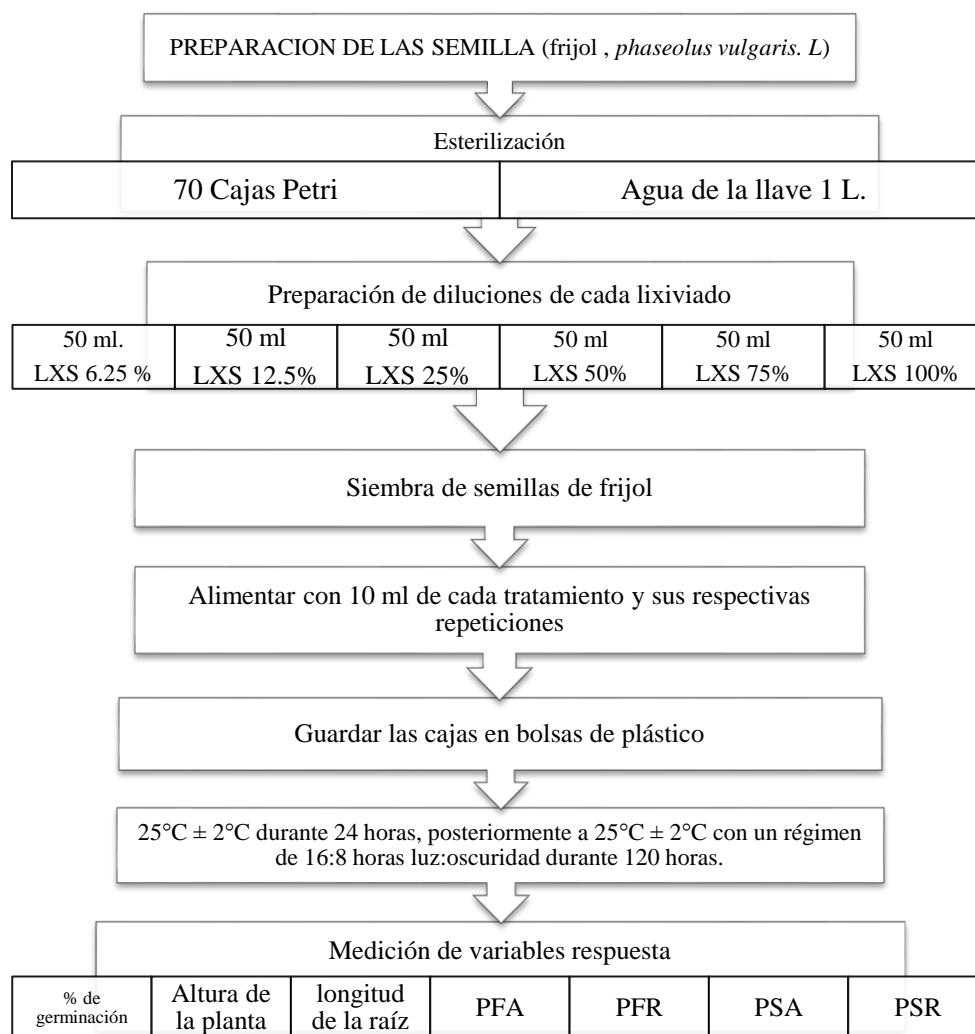


Figura 8. Diagrama de flujo del bioensayo de fitotoxicidad de frijol en cajas Petri.

7.3. FASE III. Bioensayo de fitotoxicidad en frijol con jarras de Leonard

7.3.1. Actividad 1. Formulación del segundo diseño experimental

Se elaboraron 3 repeticiones, los cuales se determinaron del perfil de diluciones de LX encontradas en la fase I con caja Petri. Estos fueron LX de GTO y TOL diluidos al 25, 50 y 75%, 100 % es LX sin diluir. Los datos se validaron mediante una prueba de comparación de medias de t-student para cada concentración con un α de 0.05.

7.3.2. Actividad 2. Montaje del experimento y preparación del material

Preparación de suelo usado para el cultivo de frijol

Se realizó una mezcla de: arena, turba y suelo franco arcilloso en una proporción 50% , 30% y 20% respectivamente. La turba y arcilla se obtuvieron de la tenencia de Cuanajo ubicado en la en la carretera 14 que es la autopista a Pátzcuaro a 24 km de esta cabecera municipal. La turba se trituroó en un molino para hacer más el tamaño de partícula equivalente a 2.0-10 mm. La arena se adquirió de manera comercial. Este suelo se mezcló y se solarizó para su desinfección.

Preparación Jarras de Leonard

800 gr. del suelo preparado de acuerdo al punto anterior se colocaron en el recipiente superior del sistema hidropónico de jarras de Leonard (figura 9a) mientras que en la base se colocó 250 ml agua de la llave y la sol. nutritiva de acuerdo al diseño experimental. La base de la jarra fue cubierta con plástico negro (figura 9 b).



Figura 9a. Sistema de jarra de Leonard. Figura 9b. Jarra cubierta con plástico

Origen y preparación de las semillas de frijol variedad junio

La semilla de frijol variedad junio se obtuvo de una tienda comercial especializada en la venta de granos. 500 semillas de frijol se humedecieron en agua tibia a 35°C /40 min; luego se desinfectaron en 200 ml de cloro comercial Clorox® al 25% /5 min., (figura 10) se lavaron con agua estéril 6 veces y posteriormente se trataron con el fungicida Tecto® al 10% /1 min.



Figura 10. Semillas desinfectadas de frijol

Siembra de semillas

En la jarra de Leonard se colocaron 4 semillas en los cuatro puntos cardinales. Se cubrieron hasta su germinación con plástico negro durante cuatro días. Al quinto día el plástico se retiró y se dejaron invernadero a temperatura ambiente. Una vez que el frijol llegara a fase de plántula o aparecieran sus dos hojas primarias se realizó el aclareo y se dejaron dos plántulas por jarra (figura 11).



Figura 11. Aclareo de plántulas de frijol

Adición de lixiviado, agua de la llave y solución mineral al frijol.

Se prepararon 250 ml de ambos LX al 25%, 50, y 75% y 100% es LX sin diluir. LX de GTO y TOL fue agregado a las jarras de Leonard al estar en fase de plántula, floración y madurez de acuerdo al diseño experimental e irrigado directamente al suelo. Se preparó una SM para alimentar las plantas usadas como control relativo (CR) con ULTRASOL®, a concentración de 1g/l, la cual su composición es: 18% nitrógeno (N), 18% fósforo (P₂O), 18% potasio (K₂O), 1% azufre (S), 1% magnesio (MgO), otros nutrientes: Fe, Cu, Zn, Mn, Mo y B.

Frijol expuesto al lixiviado

El frijol fue expuesto al LX por tres días, posteriormente se le agregó una SM al 50% hasta que cambiara de estado fisiológico y nuevamente se agregó el LX a las jarras como lo menciona el apartado anterior.

7.3.3. Actividad 3. Medición de las variables

Se midieron las variables de fenotipia de la planta: altura de la planta, y longitud de la raíz y se determinaron las variables de biomasa: PFA, PFR, PSA y PSR. Se realizó el análisis en sus dos fases de crecimiento de la planta: plántula y floración.

A continuación se muestra en la figura 12 el diagrama de flujo del segundo bioensayo a realizar:

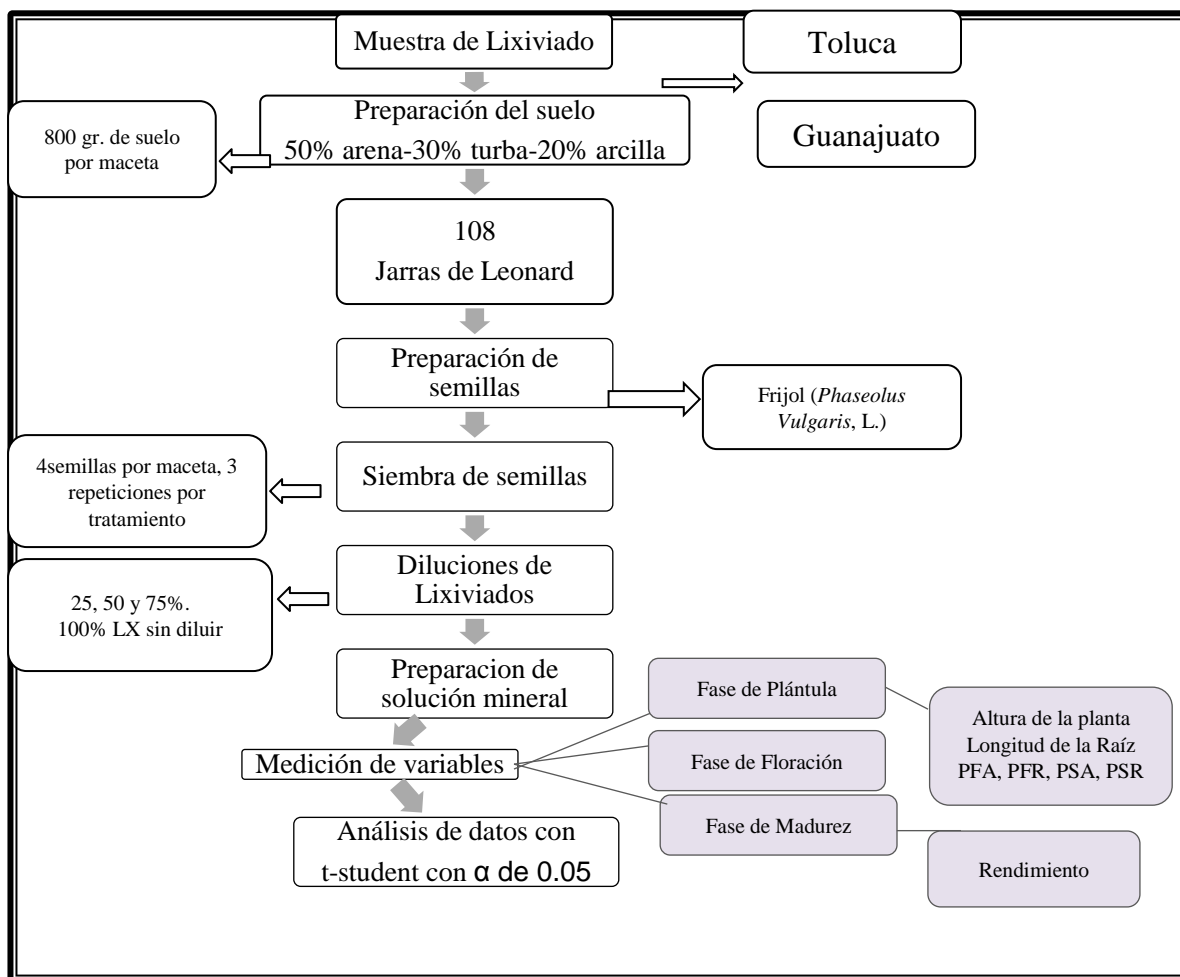


Figura 12. Diagrama de flujo del segundo experimento de fitotoxicidad de ambos lixiviados en frijol (*Phaseolus, Vulgaris, L.*)

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del cálculo del ICL y de la respuesta del frijol alimentado con distinta concentración de ambos LX se describen a continuación:

8.1. Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados de Guanajuato y Toluca

Los resultados de los análisis de cada LX se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización química de los lixiviados de Guanajuato y Toluca

	Contaminante	Concentración del LX de GTO	Concentración del LX de TOL
1	pH	8.2*	8.5*
2	Sólidos Disueltos Totales	27,905.0	11,790.0
3	DBO ₅	2,034.5	1,032.0
4	DQO	42,000.0	1,084.7
5	Total Nitrógeno Kjeldhal	2,240.0	1,792.0
6	Nitrógeno Amoniacal	3,087.2	1,095.2
7	Hierro Total	45.834	15.692
8	Cobre	1.26	0.008
9	Níquel	0.85	0.354
10	Zinc	0.49	0.38
11	Plomo	0.91	0.14
12	Cromo Total	31.13	0.468
13	Mercurio	0.008	0.002
14	Arsénico	10.89	1.89
15	Compuestos Fenólicos	34.2	ND
16	Cloruros	5,998.1	3,349.0
17	Cianuros	0.025	0.025
18	Coliformes Totales	ND	ND

* Todos los valores en mg/L excepto pH
ND= No detectable

8.2. Cálculo del ICL

El SDF de Guanajuato fue el que obtuvo el mayor ICL de 38.83 en comparación con el ICL de Toluca de 19.30. El valor alto del ICL de GTO está relacionado con la alta concentración obtenida en todos sus contaminantes (Tabla 5). Como se observa en la tabla

la concentración de materia orgánica en el LX de GTO es mayor que la del LX de Toluca, algunos de los compuestos inorgánicos como el NH₃-N, el TNK y Cloruros también es mayor en el LXS de GTO que en el de TOL. Algunos de los metales pesados reportados para el LX de GTO como el Pb, Cr, As y Cianuros inclusive rebasan los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales para aguas nacionales como lo marca la (NOM-001-ECOL-1996). Varios autores han calculado el ICL de distintos SDF y se han obtenido valores similares a los de este estudio en base a la concentración de cada uno de los contaminantes presentes en el LX. (D. Kumar & Alappat 2005; Umar *et al.* 2010; Rafizul *et al.* 2011).

Según los datos reportados por los autores y los datos obtenidos en este estudio el valor del ICL es mayor cuando la concentración de los contaminantes es alta y un ICL bajo representa bajas concentraciones. El tipo de SDF también influye en el valor obtenido del ICL. Existen notables diferencias entre las concentraciones del LX de GTO y TOL ya que proceden de distintos sitios, el LX de GTO proviene de un SDF y no opera en base a los lineamientos de la (NOM-083-SEMARNAT 2003), no se le da un tratamiento al LX e inclusive no existe un sistema de impermeabilización en laguna para la captación del contaminante como se puede observar en la figura 13.



Figura 13. Laguna de lixiviados del sitio de disposición final de San Francisco del Rincón, época de seca (izq.) y época de lluvia (der.) (Turcott-Cervantes *et al.* 2012).

El LX de TOL procede de un RESA y por los tanto cumple con la (NOM-083-SEMARNAT 2003), la laguna de LX de donde se tomó la muestra posee una geomembrana

por lo que las propiedades fisicoquímicas de ambos LXS difieren y el ICL de Toluca se ve reflejado en su valor bajo en comparación con el LX de GTO.

Similares resultados se muestran en la Tabla 6 donde distintos autores reportan el cálculo del ICL de varios SDF y RESA y se observa que el ICL está en función tanto del tipo de sitio que se hable como de la concentración de sus contaminantes

Tabla 6. Comparación de ICL de diversos sitios de disposición final

Contaminante *	(Dinesh Kumar & Alappat 2005)				(Umar <i>et al.</i> 2010)				(Rafizul <i>et al.</i> 2011)	Este estudio	
	RESA				RESA				RESA SIMULADO	SDF	RESA
	Ma Tso Lung	Nagu Chi Wan	Pillar Point	Shuen Wan	Pulau Burung landfills	Kulim Landfill Site	Ampang Jajar Landfill Site	Kuala Sepetang Landfill Site	Khulna, Bangladesh	GTO México	Toluca, México
DBO ₅	22000	81	5000	5000	3588	515	48	85	1160	2034	1032
DQO	50000	750	30000	13000	1788	1593	549	990	9360	42000	1084
TNK	13000	960	3800	11000	1685	612	822	1176	1470	2240	1792
NH ₃ -N	13000	760	3000	11000	1380	503	566	996	ND	3087	1095
Cloruros	30000	770	3600	30000	622	290	124	655	1270	5998	3348
Ecuación	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sitio	C	C	AC	AC	SA	SA	A	A	A	AC	AC
ICL	45.01	15.97	36.48	39.04	23.45	19.50	16.44	21.77	24.29	38.83	19.30

*Todos los valores en mg/L

C= Clausurado, AC= Activo, SA= Semiaerobio, A= Anaerobio, ND= No disponible

Tabla 7. Índice de Contaminación de Lixiviados de Toluca y Guanajuato.

Contaminante	Significancia	GUANAJUATO (GTO) (Ec. 2)				TOLUCA (TOL) (Ec. 1)				
		VALOR	Peso del contaminante (wi)	(pi)	(pi) (wi)	VALOR	Peso del contaminante (wi)	(pi)	(pi) (wi)	
1	pH	3.509	8.1*	0.055	5	0.275	8.5*	0.055	5	0.275
2	Sólidos Disueltos Totales	3.196	27,905.0	0.05	64	3.2	11790.0	0.05	24	1.2
3	DBO ₅	3.902	2,034.4	0.061	44	2.684	1032.0	0.061	28	1.708
4	DQO	3.963	42,000.0	0.062	89	5.518	1084.6	0.062	44	2.728
5	Total Nitrógeno Kjeldhal	3.367	2,240.0	0.053	78	4.134	1792.0	0.053	63	3.339
6	Nitrógeno Amoniacal	3.25	3,087.2	0.051	100	5.1	1095.2	0.051	100	5.1
7	Hierro Total	2.83	45.834	0.045	5	0.225	15.692	0.045	5	0.225
8	Cobre	3.17	1.260	0.05	7	0.35	0.008	0.05	5	0.25
9	Níquel	3.321	0.850	0.052	6	0.312	0.354	0.052	5	0.26
10	Zinc	3.585	0.490	0.056	5	0.28	0.38	0.056	5	0.28
11	Plomo	4.019	0.910	0.063	8	0.504	0.14	0.063	5	0.315
12	Cromo Total	4.057	31.13	0.064	100	6.4	0.468	0.064	5	0.32
13	Mercurio	3.923	0.008	0.062	5	0.31	0.002	0.062	5	0.31
14	Arsénico	3.885	10.89	0.061	38	2.318	1.89	0.061	5	0.305
15	Compuestos Fenólicos	3.627	ND	-	-	-	34.24	0.057	39	2.223
16	Cloruros	3.078	5,998.14	0.048	56	2.688	3348.96	0.048	27	1.296
17	Cianuros	3.694	0.025	0.058	5	0.29	0.025	0.058	5	0.29
18	Coliformes Totales	3.289	0.00	0.052	5	0.026	0.00	0.052	5	0.02
Σ TOTAL				0.948		37.24				
		ICL = 34.84				ICL= 18.46				

*Todos los valores en mg/L excepto pH

ND= No detectable

Para determinar si el ICL tiene relación a un impacto ambiental potencialmente ejercida por un lixiviado, se llevó a cabo un bioensayo para evaluar la respuesta del frijol alimentado a diferentes concentraciones de ambos LXS. Los resultados de este bioensayo se describen a continuación en la siguiente sección.

8.3. Bioensayo de fitotoxicidad en semilla de frijol en cajas Petri

La respuesta de la semilla de frijol con distinta concentración del LX de GTO y TOL mediante las variables respuesta % de germinación, altura del primordio de tallo, longitud del primordio de raíz, y biomasa :PFA, PFR, PSA y PSR. Imágenes del bioensayo véase Anexo III.

8.3.1. Porcentaje de germinación

La germinación del frijol tratado con las diferentes concentraciones del LX de GTO mostró diferencias significativas con la semilla C en contraste con la semilla tratada al LX 100%, ya que sólo germinaron 8 semillas de las 20 sembradas con el LX al 100% (Tabla 8). Cuando la semilla se trató con las concentraciones del 6.25 hasta 75% no hubo diferencia significativa con el C. La semilla de esta leguminosa tratada con LX de TOL al 75% y 100% la germinación se inhibió con ambas. Pocos han sido los autores que han reportado datos sobre el % de germinación de semillas tratadas con LXS. Žaltauskaitė & Čypaitė (2008) cuantificaron el % de germinación en plantas como (*Lactuca sativa* L.) y (*Lepidium sativum* L.) donde hubo una disminución en su germinación cuando las semillas fueron tratadas con LX al 75% y 100%. Aunque a concentraciones elevadas de LX de TOL inhibió por completo la germinación de las semillas de frijol, el LX de GTO mostró menor % de germinación a diluciones más bajas que las del LX de TOL. El LX ejerce un efecto tóxico sobre la germinación del frijol y está relacionado con la concentración de sus contaminantes y en este caso con el valor del ICL.

Tabla 8. Porcentaje de germinación de *Phaseolus vulgaris* tratado con diferentes concentraciones de lixiviados de Toluca y Guanajuato

Muestra de lixiviado	Control	Concentración de lixiviado (%)					
		6.25	12.5	25	50	75	100
		% de germinación de las semillas					
GTO	95 ^a	70 ^a	80 ^a	65 ^a	70 ^a	60 ^a	40 ^b
TOL		70 ^a	85 ^a	95 ^a	80 ^a	0 ^b	0 ^b

Comparación de medias usando prueba de Tukey ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes a lores con diferencia significativa (Tukey $p < 0.05$)

8.3.2. Efecto del lixiviado en la altura del primordio de tallo frijol

La figura 14 muestra el efecto del LX de GTO y TOL en la altura del primordio de tallo del frijol. LX de GTO al 75 y 100% fue más tóxico al reducir su altura en comparación con la misma leguminosa usada como C con diferencia estadística significativa. LX de GTO al 225% también mostró una diferencia estadísticamente significativa sobre la altura del primordio del tallo que el frijol usado como C, por lo que se observa que a partir de esta concentración el LX de GTO comienza a inhibir el desarrollo del frijol.

El LX de TOL a partir del 50, 75 y 100% fue tóxico para la semilla ya que se registró una disminución en la altura del primordio del tallo a diferencia de la semilla usada como C. Esto por la pérdida de germinación. Cabe destacar que las medias de las alturas del frijol tratado con LX de GTO fue menor que el LX de TOL a concentraciones más bajas.

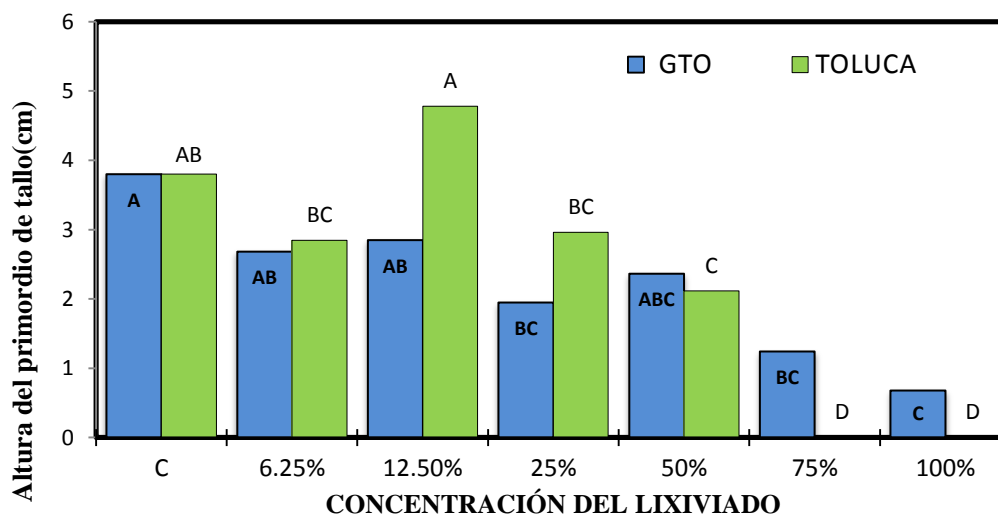


Figura 14. Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca sobre la altura del primordio de tallo del frijol. Comparación de medias usando prueba de Tukey ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

8.3.3. Efecto del lixiviado sobre la longitud del primordio de la raíz.

El LX de Guanajuato del 25 al 100% fue tóxico para el primordio de la raíz en comparación con la semilla C debido a que se redujo su longitud significativamente como se muestra en la figura 15. LX de TOL al 12.5 % favoreció el crecimiento del primordio de raíz ya que obtuvo una longitud estadísticamente similar al frijol C. El efecto benéfico de esta concentración de LX en particular ha sido reportado por (Bialowiec & Randerson 2010; Žaltauskaitė & Čypaitė 2008) donde en esta concentración están los nutrientes en balance para el adecuado crecimiento de la planta (Frank & Agamuth 2010). LX al 75 y 100 % de TOL causaron un efecto tóxico por ser significativamente diferentes a los demás tratamientos debido a que a estas concentraciones la germinación se inhibió.

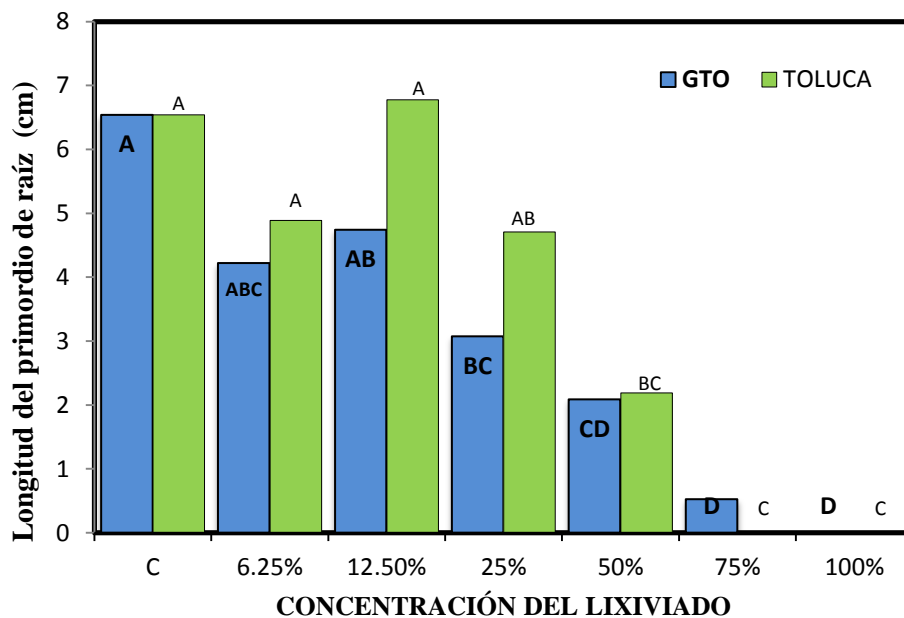


Figura 15. Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca sobre la longitud del primordio raíz del frijol.

Comparación de medias usando prueba de Tukey ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

8.3.4. Efecto del lixiviado sobre el peso fresco aéreo del frijol

Se observó que el LX de GTO fue tóxico para el frijol a partir del 75 y 100%, se encontraron diferencias estadísticas significativas entre el PSA del tallo de estos tratamientos con el PSA del frijol usado como control (Figura 16). El frijol expuesto al LX

de TOL a concentraciones del 75 y 100% causó una toxicidad en el primordio de tallo al no desarrollarse a causa de la pérdida de inhibición de la germinación esto se comprueba con diferencias estadísticas significativas entre los PSA de las semillas tratadas con LX de TOL al 75 y 100% y las semillas C.

LX de GTO Y TOL causaron un efecto tóxico en la semilla sobre el PSA a partir del 75%. Sin embargo los pesos obtenidos en el primordio de tallo a concentraciones más bajas con el LX de GTO fueron menores a los obtenidos con el LX de TOL. Por lo que de igual forma el impacto negativo se refleja mayormente con el LX de GTO, esto debido a las propiedades fisicoquímicas que posee el LX y relacionado con el valor alto de su ICL. Varios autores han reportado que elevada concentración de LX (75% y 100%) causa efectos negativos e inhibe por completo el crecimiento de diversas plantas (Žaltauskaitė & Čypaitė 2008; Frank & Agamuth 2010).

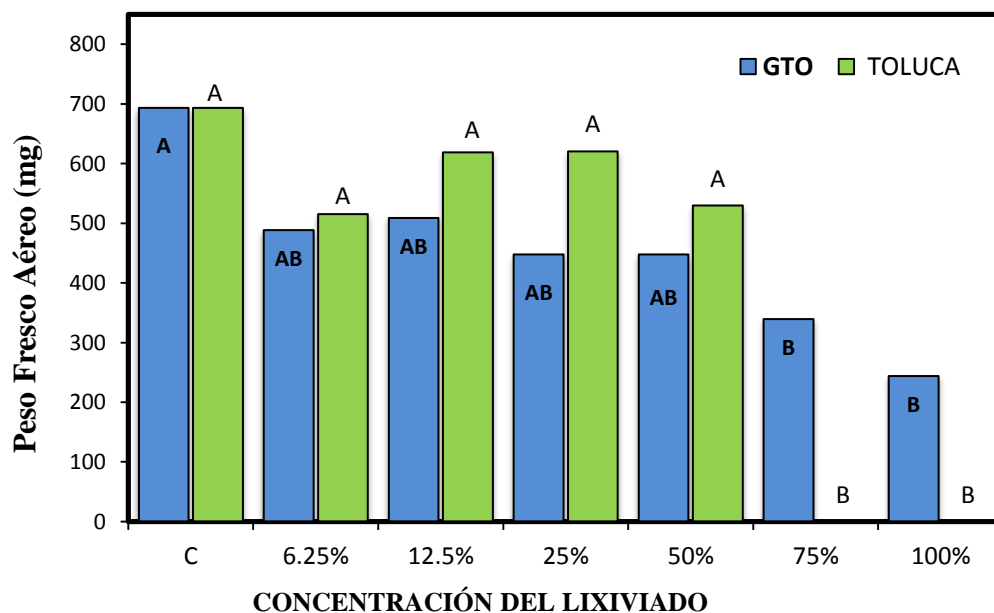


Figura 16. Efecto de ambos lixiviados a diferentes concentraciones sobre el peso fresco aéreo del frijol.

Comparación de medias usando prueba de Tukey ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

8.3.5. Efecto del lixiviado sobre el Peso Fresco Radical (PFR) del frijol

LX de GTO a partir de la concentración del 25, 50, 75 y 100% fue tóxico para la semilla al haber diferencias estadísticas significativas en el PFR del frijol tratado con estas concentraciones al PFR del frijol usado como C. Esta disminución en su peso es debido al exceso de minerales contenidos en el LX. Puesto que el LX de GTO al 6.25% también causó una disminución en el PSR del frijol a comparación del frijol usado como C. Pero esta disminución es causada a la concentración baja de minerales en el LX. El LX de TOL sólo causó una fitotoxicidad a concentraciones del 50, 75 y 100% ya que el frijol expuesto a estas concentraciones disminuyeron el PSR en contraste con el frijol irrigado solo con agua.

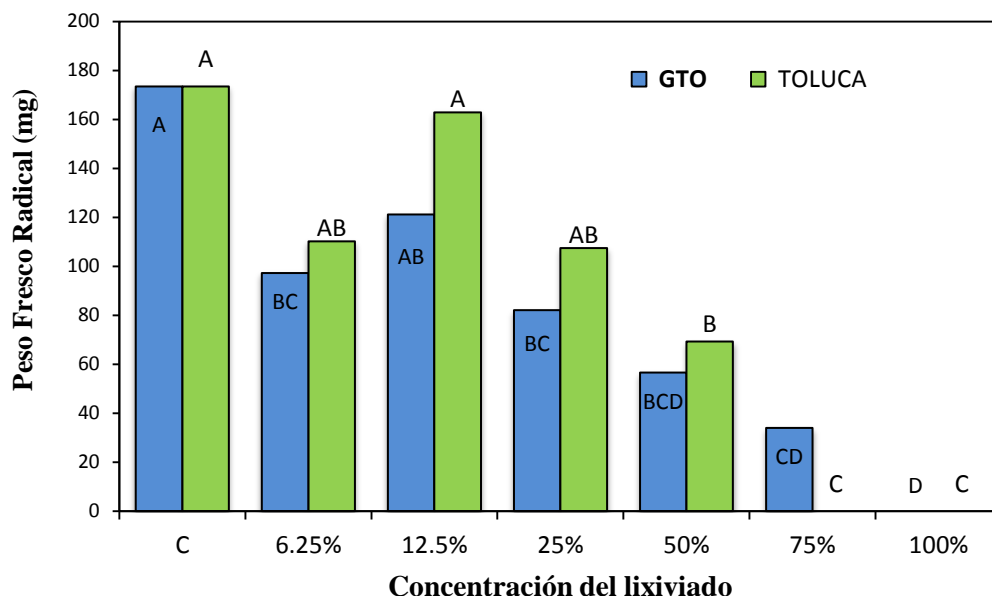


Figura 17. . Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca a diferentes concentraciones sobre el peso fresco radical del frijol.

Comparación de medias usando prueba de Tukey ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

8.3.6. Efecto del lixiviado sobre el Peso Seco Aéreo (PSA) y Peso Seco Radical (PSR) del frijol.

El PSA del frijol alimentado con ambos LX (Figura 18 A) tuvo una tendencia similar a los PFA, por lo que la fitotoxicidad del frijol en el LX de GTO comienza a partir de la

concentración del 25% y en el LX de TOL a partir del 50%. Concentración del 12.5% de ambos LXS representa una respuesta favorable para el peso del frijol, este tratamiento presentó una adecuada concentración de minerales necesarios para suplir su demanda y que a la vez disminuyó la cantidad de las sustancias fitotóxicas en los LXS.

La figura 18 B indica el efecto de ambos LXS sobre el PSR del frijol. Frijol alimentado con LX de Toluca al 12.5% causó un efecto positivo en el PSR, inclusive mejor que el regado solo con agua lo que indicó que en esa concentración se encontraban los nutrientes adecuados para el correcto crecimiento de la planta (Žaltauskaitė & Čypaitė 2008; Bialowiec & Randerson 2010). El LX de Guanajuato causó un efecto positivo en el PSR del frijol a la dilución del 25%. Ambos LXS causaron un efecto tóxico a las concentraciones del 75% y 100% para el PSA y PSR debido a la alta concentración de sustancias tóxicas en el LX (Cuevas & Walter 2004).

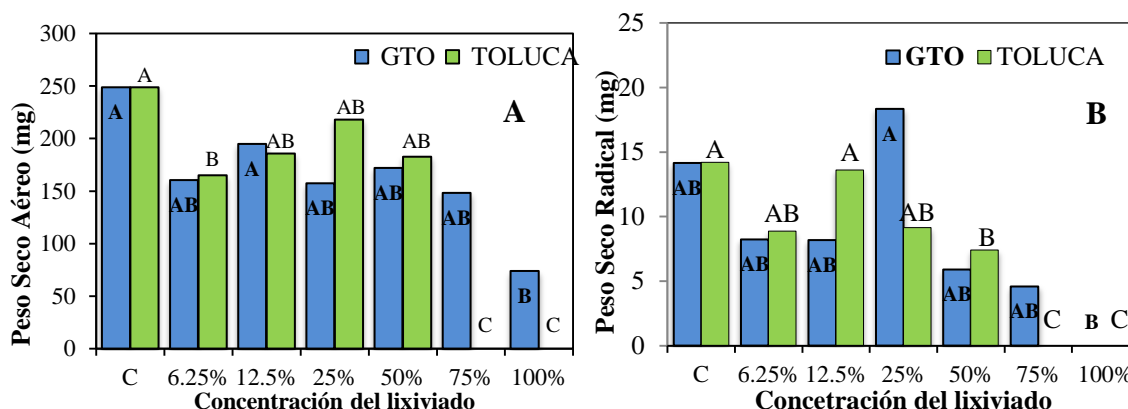


Figura 18. (A) Efecto de ambos lixiviados a diferentes concentraciones sobre el peso aéreo del frijol. (B) Efecto de ambos lixiviados sobre el peso seco radical del frijol.

Comparación de medias usando prueba de Tukey ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes

Las propiedades fisicoquímicas del LX de Guanajuato que obtuvo el ICL mayor, influyeron de manera negativa en la respuesta del frijol en contraste con el LX de TOL. Esto se debe probablemente a que el LX de GTO proviene de un SDF que no cumple con la NOM-083-SEMARNAT 2003 y que la concentración de sus componentes es superiores en varios de en comparación con el LX de TOL. Los resultados obtenidos mostraron que la concentración a la cual el LX de GTO comenzó a ser tóxico para el frijol es a partir del 25% y con el LX de TOL comienza a ser tóxico a partir del 50%. El valor del ICL de cada

uno de los LXS estudiados confirma la hipótesis planteada para esta primera etapa de crecimiento del frijol.

8.4. Bioensayo de fitotoxicidad con frijol en jarras de Leonard

El efecto del LX de GTO y TOL a distintas concentraciones sobre la fenotipia y biomasa del frijol se describen a continuación, las variables respuesta medidas fueron altura de la planta, longitud de la raíz, PFA, PFR, PSA y PSR en su fase de plántula y floración. Imágenes del bioensayo véase Anexo IV.

La tabla 9 muestra las medias de las variables respuesta del frijol tratado a diversas concentraciones. El análisis estadístico que se realizó fue mediante una comparación de medias usando prueba de t-student ($p < 0.5$).

8.4.1. Altura de la planta.

LX de GTO al 50% en fase de plántula fue más tóxico en el frijol a diferencia del frijol tratado con LX de TOL al 50% en la misma fase Cabe destacar que la altura de la planta disminuyó en función de la concentración y de la etapa de crecimiento de la leguminosa. Sin embargo al realizar el análisis estadístico de la comparación de medias por t-student se detectó que en las concentraciones del LX de TOL y GTO al 25, 75 y 100% no hubo diferencias estadísticas significativas en la altura del frijol al ser comparados con el frijol que se alimentó con una SM. Lo que indicó que a esas concentraciones ambos LX no fueron tóxicos para la planta.

Tabla 9. Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca a diferente concentración sobre frijol en su fase de plántula y floración.

VARIABLES							
Estadio	Tratamiento	ALTURA DE LA PLANTA (cm)	LONGITUD RADICAL (cm)	PFA (g)	PFR (g)	PSA (g)	PSR (g)
Lixiviado 25%							
Plántula	CR	53.2000 a	28.3166 a	5.6623 a	1.9580 a	0.4591 a	0.1104 a
	LX TOL	60.0666 a	20.2333 a	5.2551 a	0.9583 a	0.3714 a	0.0649 a
	LX GTO	52.2333 a	22.7666 a	4.8401 a	1.9576 a	0.4696 a	0.1012 a
Floración	CR	49.5330 a	34.2333 a	11.589 b	4.0349 a	2.1710 b	0.4379 a
	LX TOL	45.8000 a	32.0333 a	11.3707 b	2.1080 b	2.9863 ab	0.3789 a
	LX GTO	46.7000 a	35.5833 a	23.4376 a	5.8353 a	4.7130 a	0.5724 a
Lixiviado 50%							
Plántula	CR	53.200 a	28.3166 a	5.6623 a	1.9580 a	0.4591 a	0.1104 a
	LX TOL	60.4666 a	21.1833 a	4.8124 a	0.7921 b	0.3839 a	0.0462 b
	LX GTO	42.7500 b	20.9333 a	4.4793 a	1.6444 a	0.3436 a	0.0787 ab
Floración	CR	49.5333 a	34.2333 ab	11.5089 b	4.0349 ab	2.1710 b	0.4379 a
	LX TOL	47.5833 a	35.4116 a	23.8664 a	5.4238 a	6.5339 a	0.6127 a
	LX GTO	47.0000 a	27.9166 b	20.2644 a	2.9587 b	4.8247 a	0.9994 a
Lixiviado 75%							
Plántula	CR	53.200 a	28.3166 a	5.6623 a	1.9580 a	0.4591 a	0.1104 a
	LX TOL	56.7666 a	18.5166 b	4.0595 a	0.4985 b	0.326 a	0.0381 b
	LX GTO	44.8166 a	23.8000 ab	5.5329 a	2.2184 a	0.4342 a	0.0979 a
Floración	CR	49.5333 a	34.2333 a	11.5098 b	4.0349 a	2.1710 b	0.4379 ab
	LX TOL	42.7333 a	34.7000 a	21.4002 b	4.6571 a	2.5826 b	0.3077 b
	LX GTO	42.7500 a	38.6500 a	36.7779 a	6.6420 a	4.8247 a	1.009 a
Lixiviado 100%							
Plántula	CR	53.2000 a	28.3166 a	5.6623 a	1.9580 a	0.4591 a	0.1104 a

	LX TOL	48.7166 a	14.7000 b	2.8670 a	0.2886 b	0.2782 b	0.0277 b
	LX GTO	41.3666 a	26.4000 a	5.6623 a	2.0732 a	0.4723 a	0.0938 a
Floración	CR	49.5333 a	34.2333 a	11.5098 b	4.0349 a	2.1710 a	0.4379 a
	LX TOL	43.6666 a	33.9166 a	17.8518 ab	2.8117 a	4.5114 a	0.2923 a
	LX GTO	42.9666 a	26.7666 a	23.1747 a	3.5768 a	3.6171 a	0.4041 a

Comparación de medias en cada fase de crecimiento del frijol usando prueba de t-student ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

8.4.2. Longitud radical

La parte radical es uno de los componentes más sensibles para evaluar la respuesta de algún contaminante en diversas plantas (Prieto-Méndez *et al.* 2009). Diferencias estadísticas significativas e registraron a partir de la dilución al 50% y solo hasta la etapa de floración. En donde el LX de GTO tuvo una menor longitud radical que el LX de TOL. No obstante, El LX de TOL al 75 y 100% fue más tóxico para la raíz que el LX de GTO a partir de la etapa de plántula, ya que la longitud radical disminuyó al ser comparada con la planta que fue alimentada con la SM..

8.4.3. Peso Fresco Aéreo y Radical

En fase de plántula el PFA del frijol no se registraron diferencias significativas entre ambos LX con las diluciones del 25, 50 y 75%. Frijol tratado con LX de TOL al 100% tuvo un PFA menor al del frijol tratado con LX al 100% desde la fase de plántula. Los efectos de una disminución en el PFA del frijol se observaron a partir de la fase de floración, solo con los tratamientos del 25, 50 y 75%. En los tres casos el PFA del frijol alimentado con LX de TOL fue menor que el de GTO, por lo que el LX de TOL causó una disminución en su crecimiento.

El PFR del frijol se vio afectado mayormente con el LX de TOL desde la concentración del 25% hasta la del 100% que con el LX de GTO. En dosis bajas del LX de TOL (25%) el PFR fue menor solo hasta la etapa de floración de la planta. Sin embargo a partir del 50% el PFR del frijol tratado con LX de TOL fue menor estadísticamente que el de GTO y desde la etapa de plántula. En cada una de las etapas la planta del frijol requiere de diversos nutrientes para su adecuado crecimiento. Estos nutrientes son principalmente macronutrientes (N, P, K) y micronutrientes (S, Ca, Mg, B, Fe, Cu, Mn, Zn), que cuando se encuentran en balance, la respuesta del frijol a condiciones adecuadas puede ser benéfica para su crecimiento y cosecha. Sin embargo cuando estos nutrientes no están en equilibrio existe un estrés nutricional por déficit de los mismos o por un exceso de estos elementos (CIAT 1987)

8.4.4. Peso Seco Aéreo y Radical.

El PSA del frijol tratado con ambos LX al 25 y 50% no se registraron diferencias estadísticas significativas ni en la etapa de plántula y floración. Solo a partir de la concentración del 75% se registró que el LX de TOL causó una disminución en el PSA de la planta en comparación con el LX de GTO y sólo hasta la fase de floración. Frijol alimentado con LX de TOL al 100% obtuvo un peso menor que el de GTO a partir de la etapa de plántula por lo que LX de TOL a etapas tempranas y a concentración alta es más tóxico que el de GTO.

El PSR del frijol también se afectó al ser tratado con LX de TOL y a concentraciones desde el 50% y desde su etapa de plántula. El LX de GTO obtuvo un PSR mayor estadísticamente que el LX de TOL. Esto puede sustentarse con el bioensayo de la fase II de esta investigación en donde el LX de TOL a concentraciones del 75 y 100% inhibió por completo la germinación de las semillas en comparación con LX de GTO con el cual a alta concentración alta si hubo germinación.

Se han hecho estudios de que el LX a diversas concentraciones puede causar o un efecto benéfico en el frijol ya que funciona como fertilizante, o puede llegar a causar una fitotoxicidad y daños al frijol (Zupanc & Justin 2010). Sin embargo esta característica del LX puede variar en función del origen del LX y de la concentración de los contaminantes presentes en el LX.

EL ICL se calculó para relacionar el valor numérico obtenido con un bioensayo en plantas de frijol. Para este caso en una planta ya más desarrollada la hipótesis de que el ICL está relacionado con la respuesta del frijol tratado con ambos LX no es válida, ya que en base a los resultados obtenidos el LX de TOL fue más tóxico que el de GTO en otras etapas de desarrollo del frijol. El ICL aplica y valida la hipótesis en las primeras etapas de crecimiento para el frijol en donde el ICL de GTO (38.83) indica que éste fue más tóxico para el frijol en comparación con el ICL de TOL (19.30). Sin embargo para fases del frijol más avanzadas el valor numérico del ICL no tiene relación con el frijol (*Phaseolus Vulgaris, L.*) en etapas de plántula y floración.

8.4.5. Efecto del lixiviado sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris*, L

La cosecha del frijol se realizó a los 104 días después de la siembra. En la tabla 10 se muestra el efecto del LX de GTO y TOL el rendimiento del frijol.

Tabla 10 Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris*, L.

Estadío	Tratamiento	Rendimiento Ton ha ⁻¹
Lixiviado 25%		
Madurez	CR	0.431 ^a
	LX TOL	0.143 ^b
	LX GTO	0.098 ^c
Lixiviado 50%		
Madurez	CR	0.431 ^a
	LX TOL	0.081 ^c
	LX GTO	0.195 ^b
Lixiviado 75%		
Madurez	CR	0.431 ^a
	LX TOL	0.067 ^c
	LX GTO	0.170 ^b
Lixiviado 100%		
Madurez	CR	0.431 ^a
	LX TOL	0.003 ^c
	LX GTO	0.068 ^b

Comparación de medias usando prueba de *t*-student ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes

En la tabla 10 se muestra el efecto tóxico de ambos LX sobre el rendimiento del frijol. La literatura reporta que el rendimiento de esta leguminosa en el mundo y de México regularmente varía de 1 a 3 Ton ha⁻¹ (Graham & Ranalli, 1997; Acosta-Gallegos *et al.*, 1996; Singh & Gutierrez 1990). Para este estudio se detectó que todas las diluciones de ambos LX causaron un efecto negativo en el rendimiento del frijol en comparación con el homólogo usado como CR basado en una diferencia estadística significativa. Sin embargo

el LX de GTO fue menos tóxico que el LX de TOL de acuerdo con el rendimiento del frijol obtenido con las diluciones del LX de GTO que con LX de TOL lo que se confirmó por la diferencia estadística significativa entre ambos LX.

LX de GTO y TOL disminuyeron la producción del frijol variedad junio.

9. CONCLUSIONES

El ICL puede ser usado como herramienta para comparar el grado de contaminación de diversos LX. Un bioensayo de fitotoxicidad con frijol en sus primeras etapas de crecimiento tratado a diversas dosis del LX ayudó a validar el valor numérico del ICL. Sin embargo el valor numérico del ICL solo se relacionó con la respuesta del frijol en sus primeras etapas de crecimiento. Para el caso del rendimiento del frijol ambos LX fueron tóxicos para el frijol al reducir la producción de semillas. Esto es en caso contrario al ICL ya que el LX de GTO fue el menos tóxico para el rendimiento del frijol que el de TOL. El LX en función a su origen y propiedades puede causar diversos efectos tanto positivos como negativos en plantas. Este estudio fue llevado a cabo con dos LX y con frijol. Debido a la variabilidad en las propiedades de un LX a otro, es importante continuar esta investigación con otro ser vivo expuesto a diferentes LX para relacionar el ICL con su respuesta y poder medir de una manera más uniforme el impacto provocado por los LX.

10. VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis de este trabajo se planteó de la siguiente forma:

“EL valor numérico del ICL tiene relación con el efecto fitotóxico del lixiviado sobre frijol”

Esta hipótesis se valida parcialmente debido a el valor numérico del ICL para ambos LX solo se relacionó con la respuesta del frijol en sus primeras etapas de crecimiento y no para una planta más desarrollada. Es evidente que existe una fitotoxicidad de LX en función al origen y concentración de los componentes. A medida que la planta crece y desarrolla la cantidad de minerales requeridos va aumentando por lo que en un inicio la concentración afectó de manera negativa la germinación del frijol y se relaciona el ICL con esa respuesta. No obstante a etapas posteriores del crecimiento del frijol los requerimientos de nutrientes que la planta absorbe y que el LX inclusive ayuda como fertilizante.

11. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

Obtener el ICL de dos lixiviados de dos sitios de disposición final de México y determinar su relación con el impacto fitotóxico que ejercen los lixiviado en plantas de frijol.

✓ **Cumplido**

Objetivos Particulares:

- Calcular el ICL de 2 lixiviados de distintos sitios: Guanajuato y Edo. De México.

✓ **Cumplido**

- Realizar un primer bioensayo de fitotoxicidad del lixiviado sobre frijol en cajas Petri en las primeras fases de crecimiento de raíz y tallo.

✓ **Cumplido**

- Determinar a partir de cuál concentración ambos LX comienzan a ser fitotóxico para el frijol.
✓ **Cumplido**
- Realizar un segundo bioensayo con de fitotoxicidad en frijol con jarras de Leonard en sus tres fases de crecimiento: plántula, floración y madurez.
✓ **Cumplido**
- Relacionar la respuesta del frijol expuesto a ambos lixiviados con el valor del ICL obtenido.
✓ **Cumplido.**

12. REFERENCIAS

- Akinbile, C.O. & Yusoff, M.S., 2011. Environmental Impact of Leachate Pollution on Groundwater Supplies in Akure, Nigeria. *International Journal of Environmental Science Development*, 2(1).
- Al-Wabel, M.I. et al., 2011. Characteristics of landfill leachates and bio-solids of municipal solid waste (MSW) in Riyadh City, Saudi Arabia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 10(2), pp.65–70. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2011.03.009>.
- Al-Yaqout, a F. & Hamoda, M.F., 2003. Evaluation of landfill leachate in arid climate-a case study. *Environment international*, 29(5), pp.593–600. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12742402> [Accessed August 15, 2012].
- Arvizu, J. & Huacuz, J., 2003. Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. *Boletín IIE*, pp.118–123.
- Bagchi, A., 1994. Leachate and Gas Generation. In *Design, Construction and Monitoring of Landfills*. Interscience, Wiley, pp. 22–52.
- Bialowiec, A. & Randerson, P.F., 2010. Phytotoxicity of landfill leachate on willow--*Salix amygdalina* L. *Waste management (New York, N.Y.)*, 30(8-9), pp.1587–93.
- Calvo, F. et al., 2004. Metodología de Diagnóstico Ambiental para Vertederos de Residuos Urbanos.
- CIAT, 1987. *Desordenes Nutricionales de la Planta de Yuca*. C. I. de A. Tropical, ed., Cali Colombia.
- Cuevas, G. & Walter, I., 2004. Metales Pesados en Maíz (*Zea mays* L.) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20, pp.59–68.
- Dalkey, N.C., 1969. The Delphi Method. , p.87.
- El-Fadel, M. et al., 2002. Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste management (New York, N.Y.)*, 22(3), pp.269–82. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11952174>.
- EPA, 2000. *Method Guidance and Recommendations for Whole Effluent Toxicity (WET) Testing (40 CFR Part 136)*,
- Frank, O. & Agamuth, P., 2010. Nutrient Value Of Landfill Leachate On The Growth Of Brassica Rapa L. *Malaysian Journal Of Science*, 29(2), pp.119–128.
- Gallardo, A. & Colomer-Mendoza, F., 2011. Principios Generales de la Gestión de Residuos Sólidos. In *Residuos Sólidos. Ecología y Medio Ambiente. Libros en Red*, pp. 41–57. Available at: www.librosenred.com.
- Giraldo, E., 2001. Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios : Avances Recientes. , pp.44–55.
- HACH, 1997. Sistema DQO de Hach para análisis de agua residual. *Lit. No. 4257, H74* ©Hach Company. *Estados Unidos de América*. Available at: <http://www.hach.com/fmmimghach?/CODE:L42575109%>.

- Jaramillo, J., 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*, Colombia.
- Kiss, G. et al., 2007. Caracterización del biogás generado en trece sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Gaceta Ecológica*, 082, pp.25–35.
- Kjeldsen, P. et al., 2002. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate : A Review. *North*, 32(4), pp.297–336.
- Kostova, I., 2006. Leachate from sanitary landfills – origin , characteristics , treatment. , (July).
- Kulikowska, D. & Klimiuk, E., 2008. The effect of landfill age on municipal leachate composition. *Methods*, 99, pp.5981–5985.
- Kumar, D. & Alappat, B.J., 2005. Analysis of leachate pollution index and formulation of sub-leachate pollution indices. *Waste Management & Research*, 23(3), pp.230–239. Available at: <http://wmr.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0734242X05054875> [Accessed November 14, 2011].
- Kumar, D. & Alappat, B.J., 2005. Evaluating leachate contamination potential of landfill sites using leachate pollution index. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7(3), pp.190–197. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10098-004-0269-4> [Accessed November 14, 2011].
- Kylefors, K., 2003. Evaluation of leachate composition by multivariate data analysis (MVDA). *Journal of Environmental Management*, 68(4), pp.367–376. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479703001038> [Accessed January 6, 2012].
- Marín-M.D., Peña-Cabriales, J. & Sánchez-Yáñez, J., 2006. Efecto de metales pesados de agua residual sobre la producción de un suelo agrícola. *monografias.com*. Available at: <http://www.monografias.com/trabajos33/efecto-metales-pesados/efecto-metales-pesados.shtml> [Accessed January 29, 2012].
- Márquez-Benavides, L., 2004. “*Study of the Effect of Soil Inclusion on the Anaerobic Degradation of Municipal Solid Waste.*” University of Strathclyde in Glasgow, United Kingdom.
- Mendez-Novelo, R. et al., 2009. Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), pp.133–145.
- Mor, S. et al., 2006. Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental monitoring and assessment*, 118(1-3), pp.435–56. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16897556> [Accessed August 23, 2011].
- Nájera, H. et al., 2009. Caracterización y Tratamiento Fisicoquímico de Lixiviados Maduros Producidos en el Sitio de Disposición final de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México. *REDISIA*, pp.1–9.
- NMX-AA-008-SCFI-2000, 2000. Análisis de Agua-Determinación del pH- Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación.*, pp.1–31.
- NMX-AA-026-SCFI-2001, 2001. Análisis De Agua - Determinación De Nitrógeno Total Kjeldahl En Aguas Naturales , Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba. *Diario Oficial De La Federación.*, Pp.2–16.

- NMX-AA-028-Scfi-2001, 2001. Análisis De Agua - Determinación De La Demanda Bioquímica De Oxígeno En Aguas Naturales , Residuales (Dbo 5) Y Residuales Tratadas - Método De Prueba. *Diario Oficial de la Federación.*, pp.1–20.
- NMX-AA-034-1981, 1981. Fomento industrial norma mexicana NMX-AA-034-1981 “Análisis de agua . - Determinación de sólidos .” *Diario Oficial de la federación*, pp.1–7.
- NMX-AA-051-SCFI-2001, 2001. Análisis De Agua - Determinación De Metales Por Absorción Atómica En Aguas Naturales , Potables , Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba. *Diario Oficial De La Federación.*, Pp.1–47.
- NMX-AA-058-SCFI-2001, 2001. Análisis De Aguas - Determinación De Cianuros Totales En Aguas Naturales , Potables , Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba. *Diario Oficial De La Federación.*, Pp.1–23.
- NMX-AA-073-SCFI-2001, Análisis De Agua - Determinación De Cloruros Totales En Aguas Naturales , Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba. *Diario Oficial de la Federación.*, pp.1–13.
- NMX-AA-42-1987, 1987. FOMENTO INDUSTRIAL NORMA MEXICANA NMX-AA-42-1987 Calidad Del Agua Determinacion Del Numero Mas Probable (Nmp) De Coliformes Totales , Coliformes Fecales (Termotolerantes) Y Escherichia Coli Presuntiva . Water Quality-Determination Of The Most Probable. *Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.*
- NOM-001-ECOL-1996, 1996. Norma Oficial Mexicana que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales. *Diario Oficial de la federación*, pp.1–29.
- NOM-083-SEMARNAT, 2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. *Diario Oficial de la federación.*
- Pastor, J. et al., 1993. Ecotoxicological studies on effects of landfill leachates on plants and animals in Central Spain. *The Science of the Total Environment.*, pp.127–134.
- Pérez, M. et al., 2002. Influencia del Basurero Municipal en la Calidad del Agua del Acuífero de la Ciudad de Durango, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 18(3), pp.111–116.
- Piña-Guzmán, A.B., 2011. Toxicología de la contaminación proveniente de los residuos sólidos. In *Residuos Sólidos. Ecología y Medio Ambiente. Libros en Red*, pp. 277–310.
- Polo, M. & Guevara, E., 2001. Contaminación de Acuíferos por Efecto de los Lixiviados en el Área adyacente al Vertedero de Desechos Sólidos La Guásima Municipio Libertador, Estado Carabobo. *Ingeniería UC.*, 8(2).
- Prieto-Méndez, J. et al., 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), pp.2–44.
- Rafizul, I.M., Alamgir, M. & Islam, M.M., 2011. Evaluation of contamination potential of sanitary landfill lysimeter using leachate pollution index. In *Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Sardinia.

- Robinson, H., 2007. The Composition Of Leachates From Very Large Landfills : An International Review. *Business*, 8(June), pp.19–32.
- Sánchez-Yáñez, J. M. & Márquez-Benavides, L., 2011. Biorremediación de lixiviados de residuos sólidos urbanos. In L. Márquez-Benavidez, ed. *Residuos Sólidos. Ecología y Medio Ambiente. Libros en Red*, pp. 322–340.
- Schiappacasse, M., Chamy, R. & Poirrier, P., 2008. Efecto de la Recirculación del lixiviado tratado en el comportamiento del relleno sanitario. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica.*, 1(4).
- SEMARNAT, 2011. Generación estimada de residuos sólidos urbanos por Entidad Federativa. *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Available at: <http://semarnat.gob.mx> [Accessed December 2, 2012].
- Słomczyńska, B. & Słomczyński, T., 2004. Physico-Chemical and Toxicological Characteristics of Leachates from MSW Landfills. *Polish Journal of Environmental Studies*, 13(6), pp.627–637.
- Solórzano, G., 2003. Aportación de gases de efecto invernadero por el manejo de residuos sólidos en México : el caso del metano. *Gaceta Ecológica*, 66, pp.7–15.
- Sunil, B.M., Shrihari, S. & Nayak, S., 2009. Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. *Engineering Geology*, 106(1-2), pp.20–25. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795208003244> [Accessed December 6, 2011].
- Szantó, M. & Colomer-Mendoza, F., 2011. Vertederos (rellenos sanitarios): Generalidades. In *Residuos Sólidos. Ecología y Medio Ambiente. Libros en Red*, pp. 193–224.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S.A., 1998. Evacuación de residuos Sólidos y rechazos. In *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Mc Graw Hil, p. 407.
- Turcott-Cervantes, D.E. et al., 2012. Diagnóstico de los lixiviados del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos de San Francisco del Rincón, Guanajuato. *GIRESOL*.
- Umar, M., Aziz, H.A. & Yusoff, M.S., 2010. Variability of Parameters Involved in Leachate Pollution Index and Determination of LPI from Four Landfills in Malaysia. *International Journal of Chemical Engineering*, 2010, pp.1–6. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/ijce/2010/747953/> [Accessed October 9, 2011].
- Valenciaga, D. et al., 2009. Composición de la lignina de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-115 y su variación con la edad de rebrote. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 3 (43), pp.315–319.
- Westlake, K., 1995. Biological, Chemical and Physical Processes Within Landfill. In *Landfill Waste Pollution & Control*. Albion Publishing Linted.
- Žaltauskaitė, J. & Čypaitė, A., 2008. Assessment of Landfill Leachate Toxicity Using Higher Plants. *Engineering*, 4(4), pp.42–47.
- Zupanc, V. & Justin, M.Z., 2010. Changes in soil characteristics during landfill leachate irrigation of *Populus deltoides*. *Waste management (New York, N.Y.)*, 30(11), pp.2130–6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20554192> [Accessed August 6, 2013].

ANEXOS

Anexo I

Cálculo del ICL

Determinar el ICL en base a (Kumar & Alappat 2005) con la siguiente ecuación:

ICL= Ecuación

$$LPI = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad \text{ec. (1)}$$

En donde:

LPI= Índice de Contaminación de Lixiviados

Wi= el peso para la variable contaminante

Pi= El valor del sub índice para la variable contaminante de lixiviado

n= número de variables de contaminantes de lixiviados usados en el cálculo

En caso de que alguna de las variables no estén disponibles se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$LPI = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (\text{ec. 2})$$

Donde m= es el número de variables contaminantes disponibles y m debe ser <18 y

$$\sum_{i=1}^m w_i < 1$$

La significancia de las variables es la calificación de la variable de acuerdo a la importancia de su contribución a la contaminación del LXS. La escala es del 1al 5, donde el valor de uno es la variable con menos importancia y el 5 es la variable con mayor importancia.

Los factores de peso o coeficientes se calculan para indicar la importancia de los contaminantes individuales. Dado que las variables contaminantes reciben significancia diferente, las variables deben tener pesos diferentes. Los pesos de los parámetros contaminantes (indicados en la Tabla 9) son calculados en base al valor de significancia de la variable.

Tabla 11 Peso de los parámetros contaminantes del ICL

	Contaminante	Significancia	Peso del Contaminante (w_i)
1	pH	3.509	0.055
2	Sólidos Disueltos Totales	3.196	0.050
3	DBO ₅	3.902	0.061
4	DQO	3.963	0.062
5	Total Nitrógeno Kjeldhal	3.367	0.053
6	Nitrógeno Amoniacal	3.250	0.051
7	Hierro Total	2.830	0.045
8	Cobre	3.170	0.050
9	Níquel	3.321	0.052
10	Zinc	3.585	0.056
11	Plomo	4.019	0.063
12	Cromo Total	4.057	0.064
13	Mercurio	3.923	0.062
14	Arsénico	3.885	0.061
15	Compuestos Fenólicos	3.627	0.057
16	Cloruros	3.078	0.048
17	Cianuros	3.694	0.058
18	Coliformes Totales	3.289	0.052
	Total	63.165	1.000

Para calcular el ICL primero se computa el valor de "p" para todos los parámetros basados en las curvas y en la concentración de los contaminantes. Los valores de P son obtenidos localizando la concentración del contaminante en el eje de las "x" en las curvas. Para localizar los valores de p_i utilizar las siguientes curvas de los subíndices de los contaminantes se muestran en la figura 18 (a-r).

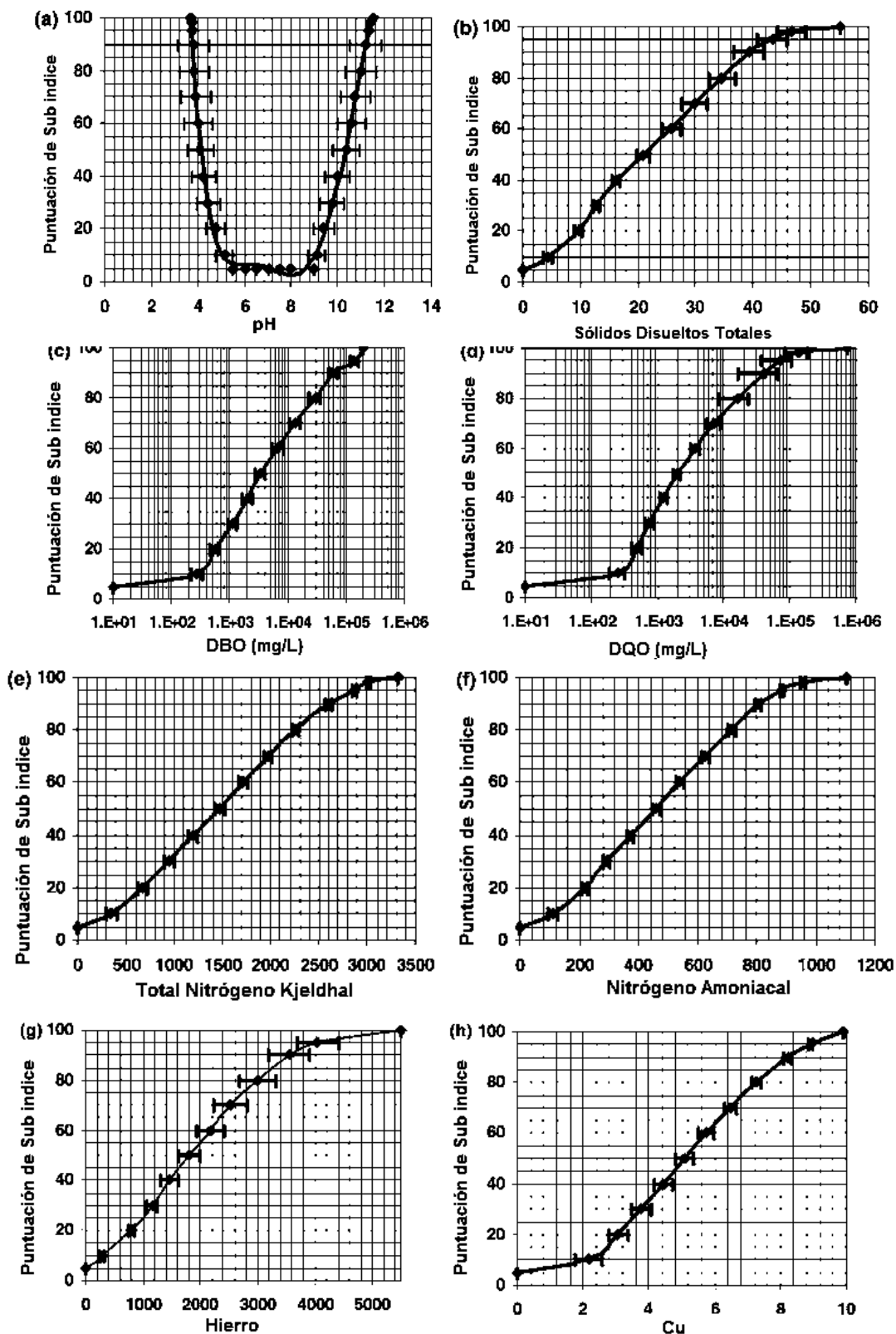


Figura 19 (a-h). Curvas de los subíndices de los contaminantes de lixiviados

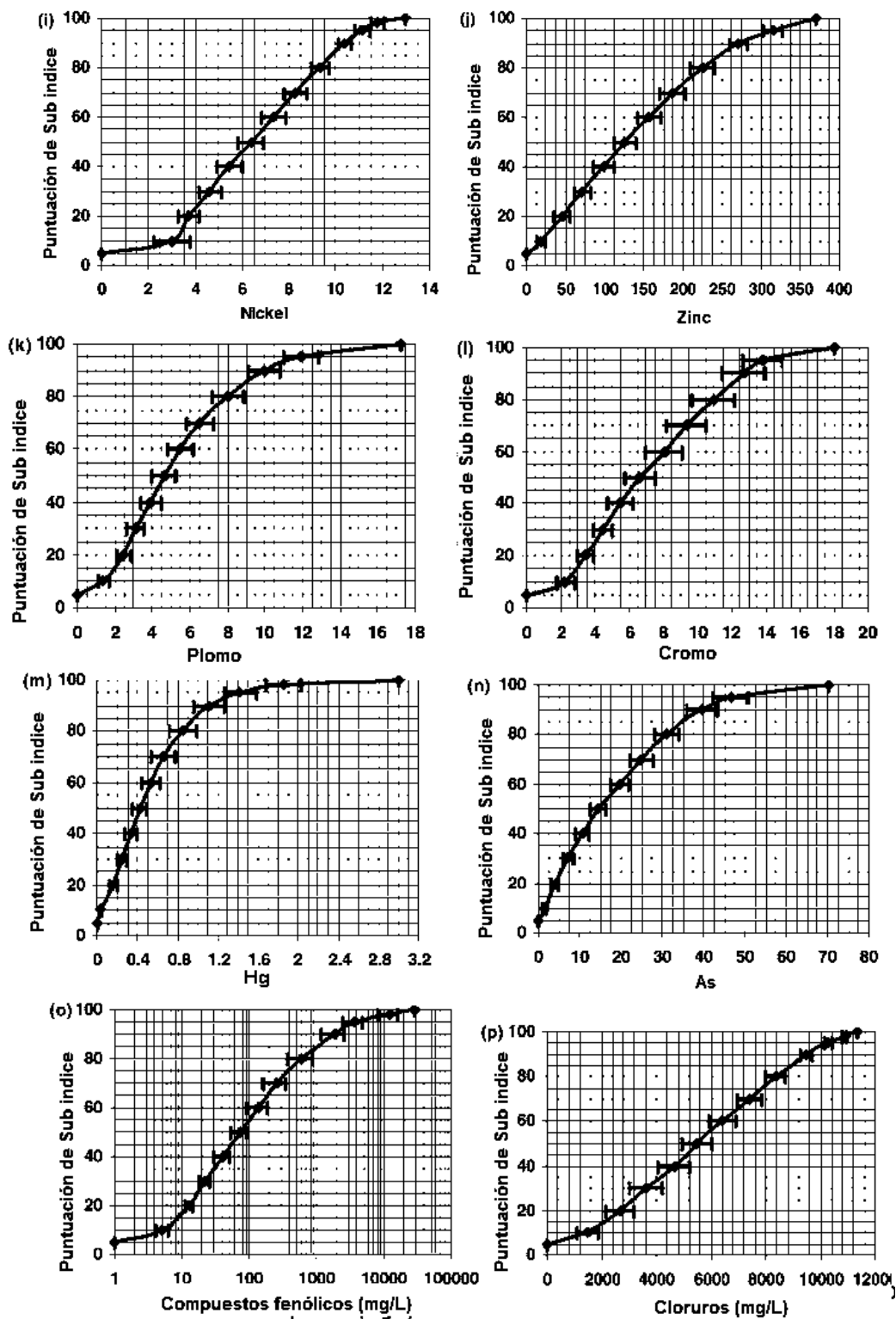


Figura 18 (h-p). Curvas de los subíndices de los contaminantes de lixiviados. Continuación

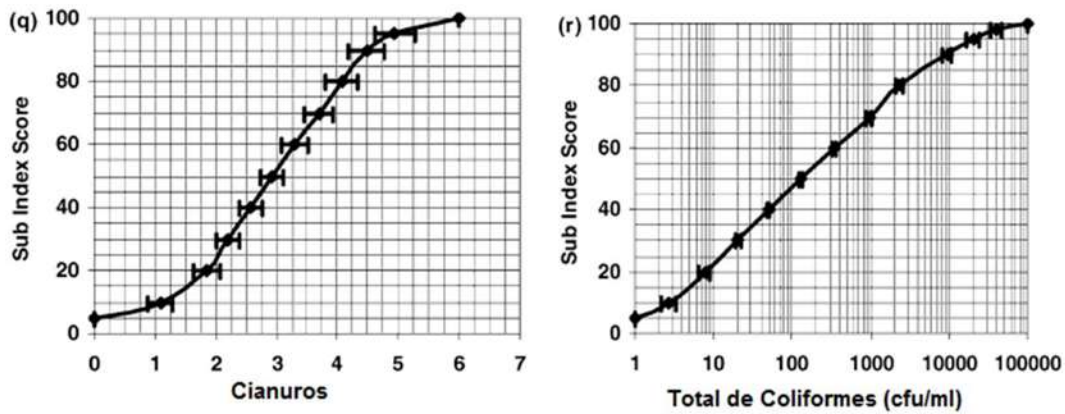


Figura 18 (q-r). Curvas de los subíndices de los contaminantes de lixiviados. Continuación.

Calcular el valor del sub índice multiplicando el valor de w_i (peso del contaminante de la tabla 3) por el valor de p_i encontrado en la curva. Realizar la sumatoria de todas las variables contaminantes y obtener el valor del ICL.

Anexo II
TÉCNICAS Y METODOS PARA LIXIVIADOS

DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

La determinación de DQO en las muestras de LXS producidos, se realizó por duplicado de acuerdo al método de dicromato aprobado por la USEPA (HACH, 1997). Para esto se utilizaron los siguientes equipos, materiales y reactivos:

- Digestor marca HACH, modelo DR200
- Espectrofotómetro marca HACH, modelo DR/2500
- Matraces aforados de 100 o 50 ml
- Micropipeta con émbolo marca BRAND de 1000 L
- 136 Puntillas de plástico para micropipeta
- Tubos con reactivo para 1500 mg/L marca HACH
- Agua desionizada

Las determinaciones de DQO incluyeron la dilución de las muestras de lixiviados cuando su valor esperado fue superior a 1500 mg/L. Con la micropipeta se adicionaron 2 ml de muestra de lixiviado a un tubo con reactivo HACH. Se tuvo cuidado de mezclar la muestra cada vez que se tomaron 1000 L con la micropipeta. Una vez cerrado con su tapón, se agitó inclinándolo suavemente para mezclarlo. Esta preparación se realizó por duplicado para cada muestra de lixiviado.

Una vez preparados todos los tubos con reactivo HACH para DQO, se colocaron en el digestor DR200 previamente estabilizado a 150°C y se dejaron digerir por 2 horas conforme al programa para DQO de dicho digestor. Terminada la digestión se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se calibró el espectrofotómetro DR/2500 y se determinó la cantidad de DQO en mg/L a la longitud de 620 nm mediante el programa —435 COD HR Limit 1500 mg/L de este equipo. Como blanco se utilizó agua desionizada.

DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONIACAL

La determinación de nitrógeno amoniacal en las muestras de LXS producidos, se realizó por duplicado de acuerdo al método colorimétrico reportado por Márquez-Benavides (2004). Para esto se utilizaron los siguientes equipos, materiales y reactivos:

- Espectrofotómetro marca HACH, modelo DR/2500
- Centrífuga 5415D marca EPPENDORF
- Balanza analítica marca Explorerr Pro
- Estufa de circulación forzada marca RIOSSA modelo HCF-41
- Vórtice marca APOLLO Tubos de ensaye marca HACH de 10 ml
- 140 Tubos Ependorf de 2 ml
- Micropipeta con émbolo marca BRAND de 1000 L
- Micropipeta con émbolo marca BRAND de 250 L
- Puntillas de plástico para micropipeta.
- Matraces aforados de 10, 25, 50 y 100 ml
- Agua desionizada

Reactivos

- Alcohol fenílico 10 % (w/v):
- Fenol, C₆H₅OH marca J.T. Baker
- Metanol, CH₃OH marca Meyer Solución de nitroprusiato al 0.5 % (w/v),
- Na₂[Fe(CN)₅NO] marca Fluka Citrato alcalino por litro:
- 200 g Citrato de sodio, NaH₂C₃H₅O (COO)₃ marca Meyer
- 10 g de Hidróxido de sodio, NaOH marca Golden Bells Solución de hipoclorito de sodio al 15% (v/v), NaClO marca J.T. Baker Agente oxidante: 10 ml de citrato alcalino más 2.5 ml de la solución de hipoclorito (prepararse fresca para cada ensayo) Solución de cloruro de amonio 2 g / L, NH₄Cl marca J.T. Baker. Los reactivos pueden almacenarse a 4°C y utilizarse dentro de un mes. El agente oxidante debe ser preparado el día de su utilización. En la preparación de los reactivos se utilizó agua desionizada, menos en el alcohol fenílico. La preparación de 100 ml de citrato alcalino requiere una agitación en el vórtice de 20 minutos.

Se colocó 2 ml de la muestras homogenizada de lixiviado en un tubo Eppendorf, y se clarificó en una centrifuga a 10,000 rpm durante 10 min. Con la micropipeta se transfirió 1.5 ml del sobrenadante del tubo Eppendorf a un tubo de ensaye y se le adicionó 1.5 ml de agua desionizada, 60 µL de alcohol fenílico, 60 µL solución de nitroprusiato y 150 µL del agente oxidante. Se incubaron por una hora a 50°C en la estufa y se enfriaron a temperatura ambiente. Finalmente se realizó la lectura de absorvancia por triplicado en un espectrofotómetro a 640 nm, utilizando agua desionizada como blanco para la calibración del equipo. Las lecturas de absorvancia se convirtieron a mg/L con una curva de calibración. La curva de calibración se elaboró mediante soluciones acuosas de NH₄Cl de 1 a 17 mg / L (Figura 19). Se utilizó agua desionizada como blanco.

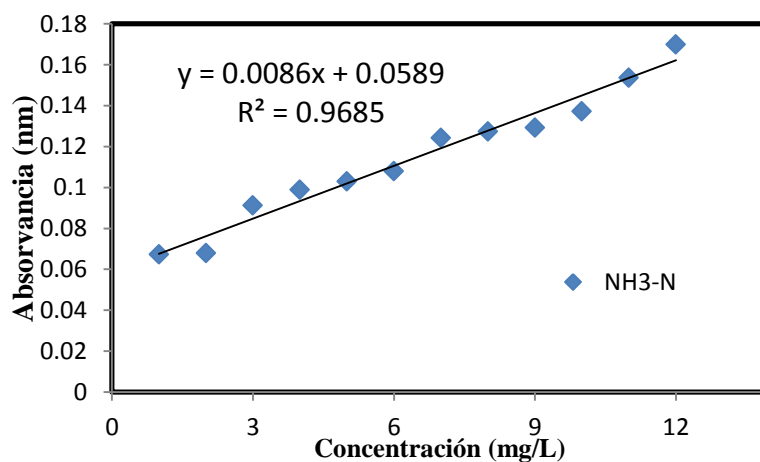


Figura 20. Curva de calibración para NH₃-N

Se utilizaron diluciones de ambos lixiviados ya que lectura de absorvancia con 3 ml de LX clarificado reportó valores mayores de 0.01. El factor de dilución para cada LX y las lecturas de absorvancia en (nm) se muestran en la tabla 9.

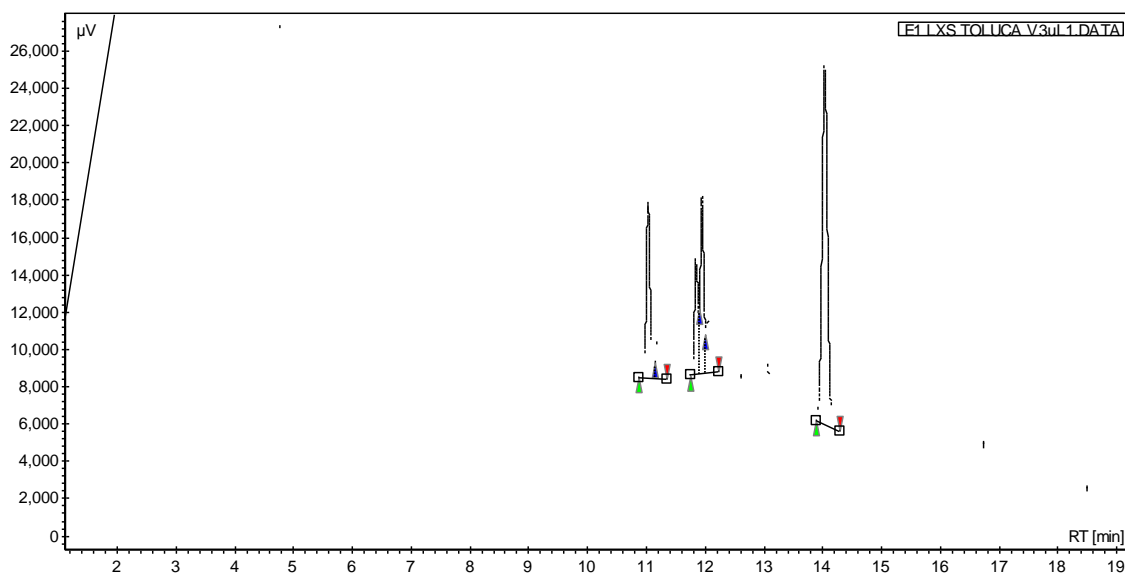
Tabla 12. Lecturas de absorvancia del lixiviado de Toluca y Guanajuato

	Factor de dilución	Factor de dilución
	0.5%	0.2%
Lixiviado	TOL	GTO
	0.106	0.102
	0.106	0.128
	0.106	0.106
promedio (nm) =	0.106	0.112
Concentración	5.477	6.174
Concentración real de NH ₃ -N (mg/L)	1095.2	3087.20

DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS:

Para el análisis en el cromatógrafo se empleó una columna capilar DB-5 con fase 5% fenil metilpolisioxano de 30 m de longitud y 0.53 mm de diámetro interno. Se establecieron las siguientes condiciones para el análisis: gas de arrastre (2ml min⁻¹), temperatura de detección de 300 °C, temperatura del inyector de 270 °C, temperatura de la columna de 120 °C, 1 min, 10 °C min⁻¹. Se utilizaron como patrones los ácidos p-hidroxibenzoico, vanilínico, ferúlico y siríngico, de la marca Sigma-Aldrich.

En la siguiente figura se muestra el cromatograma del análisis para la determinación de compuestos fenólicos para el LX de TOL.



ANEXO III

IMÁGENES DEL BIOENSAYO EN CAJAS PETRI

FRIJOL ALIMENTADO CON LIXIVIADO DE GUANAJUATO



Fig. I. Control Absoluto (solo agua)



Fig. II. LX al 6.25%



Fig. III. LX al 12.5%



Fig. III. LX al 25%



Fig. IV. LX al 50%



Fig. V. LX al 75%



Fig. VI. LX al 100%

FRIJOL ALIMENTADO CON LIXIVIADO DE TOLUCA



Fig. I. Control Absoluto (solo agua)



Fig. II. LX al 6.25%



Fig. III. LX al 12.5%



Fig. III. LX al 25%



Fig. IV. LX al 50%



Fig. V. LX al 75%



Fig. VI. LX al 100%

ANEXO IV

IMÁGENES DEL BIOENSAYO EN JARRAS DE LEONARD



Variables de rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.)

Efecto del lixiviado de Guanajuato y Toluca sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris*, L

VARIABLES					
Estadio	Tratamiento	Número de Vainas	Longitud de la vaina (cm)	No. de granos por vainas	Peso de 100 granos (gr)
Lixiviado 25%					
Madurez	CR	46 ^a	7.97 ^a	3.89 ^a	14.40 ^a
	LX TOL	27 ^b	6.69 ^b	2.74 ^b	11.55 ^a
	LX GTO	18 ^c	6.63 ^{ab}	3.61 ^{ab}	9.92 ^a
Lixiviado 50%					
Madurez	CR	46 ^a	7.97 ^a	3.89 ^a	14.40 ^a
	LX TOL	25 ^b	5.35 ^b	1.88 ^b	10.305 ^a
	LX GTO	48 ^a	6.25 ^b	2.70 ^b	9.009 ^a
Lixiviado 75%					
Madurez	CR	46 ^a	7.97 ^a	3.89 ^a	14.44 ^a
	LX TOL	14 ^b	6.44 ^b	2.07 ^b	13.81 ^a
	LX GTO	44 ^a	5.88 ^b	2.07 ^b	10.29 ^a
Lixiviado 100%					
Madurez	CR	46 ^a	7.97 ^a	3.89 ^a	14.44 ^a
	LX TOL	3 ^c	5.46 ^{ab}	2.00 ^{ab}	3.17 ^b
	LX GTO	23 ^b	4.90 ^b	1.65 ^b	10.68 ^a

Comparación de medias usando prueba de *t*-student ($p < 0.05$). Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes