



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**ANÁLISIS DE PRUEBAS ECOTOXICOLÓGICAS PARA  
DETERMINAR LA AFECTACIÓN DE LOS LIXIVIADOS QUE SE  
INFILTRAN A ÁREAS DE CULTIVO PRÓXIMAS A LOS SITIOS DE  
DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**CARLA SAHAGÚN ARAGÓN**

**ASESOR**

**DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

**2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**



**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ**  
**Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la **Tesis**:

Análisis de pruebas ecotoxicológicas para determinar la afectación de los lixiviados que se infiltran a áreas de cultivo próximas a los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos

Que presenta la pasante: **Carla Sahagún Aragón**

Con número de cuenta: 407010226 para obtener el Título de: Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”**

Cuautitlán Izcallí, Méx. a 16 de junio de 2011.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	M.C. José de Jesús Pérez Saavedra	
<b>VOCAL</b>	I.Q. Graciela Ruth Delgadillo García	
<b>SECRETARIO</b>	Dra. María Nefalí Rojas Valencia	
<b>1er SUPLENTE</b>	M. en I. Rosalva Euricides Sámano Osuna	
<b>2do SUPLENTE</b>	M. en I. Julio Cesar Morales Mejía	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).  
HHA/pm

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Salvador Sahagún Márquez y Ofelia Aragón Bonilla por estar siempre conmigo, por su apoyo, consejos y cariño, los amo.

A mi abuelo Salvador Sahagún Pérez<sup>†</sup> por los bellos recuerdos y porque estoy segura que en estos momentos estas orgulloso de mí donde quiera que te encuentres, te extraño.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme día a día, por darme una bella familia, por poner en mi camino tan buenas personas y por permitirme llegar hasta este momento tan importante para en mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por formarme como profesionista, es un orgullo ser UNAM.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por la beca otorgada durante la realización de este trabajo.

A la Dra. Neftalí Rojas Valencia por su apoyo, confianza, sugerencias y consejos durante la parte experimental y la escritura de la tesis, pero sobre todo por dejarme ser parte de su equipo de trabajo.

A mis padres por todo su apoyo, esfuerzo, amor y confianza, que a pesar de la distancia los sentí más cerca que nunca.

A mi hermano Chava por su ánimo y apoyo en todo momento.

A la familia Ocampo-Márquez, Alfonso, Ivett, Janin e Ivone por recibirme en su hogar y darme la oportunidad de ser parte de ustedes, en especial a Rosita Iris por sus consejos, atenciones y gran cariño.

A mi gran familia que estuvo cerca de mí, con sus bendiciones y buenos deseos.

A mi novio Christopher Torres por alentarme en la realización de este trabajo, por su apoyo y paciencia, por estar siempre a mi lado.

Al profesor Héctor Coss Garduño por sus sugerencias y asesorías en la parte estadística de este trabajo.

Al Ing. Villavicencio por permitir el muestreo de los lixiviados del relleno sanitario de Tlalnepanta de Baz, Edo. de México.

A mi tío Lázaro Bonilla por sus sabios consejos de su experiencia como agricultor.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería, Sergio y Roberto, por su compañía y apoyo en la parte experimental de este trabajo.

A mis amigos de la FES Cuautitlán UNAM por todos los buenos momentos que compartimos.

**CONTENIDO**

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	6
<b>LISTA DE FOTOGRAFÍAS</b>	7
<b>LISTA DE TABLAS</b>	8
<b>ABREVIATURAS</b>	9
<b>RESUMEN</b>	11
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	12
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b>	13
<b>3. ANTECEDENTES</b>	14
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	16
4.1. Disposición final de residuos sólidos urbanos	16
4.2. Reacciones involucradas en sitios de disposición final	17
4.3. Emisiones de gases	18
4.4. Lixiviado	19
4.5. Procesos bioquímicos en un sitio de disposición final	20
4.6. Composición del lixiviado	21
4.7. Principales fuentes de afectación de los lixiviados	23
4.8. Efectos en cultivos al estar en contacto con lixiviados	23
4.9. Microorganismos en los lixiviados	28
4.10. Tratamiento de los lixiviados	30
4.11. Ecotoxicología	30
<b>5. OBJETIVOS</b>	32
5.1. Objetivo general	32
5.2. Objetivos específicos	32
<b>6. HIPÓTESIS</b>	33
<b>7. METODOLOGÍA</b>	34
7.1. Estudio de gabinete	34
7.2. Análisis fisicoquímico y microbiológico de los lixiviados	34
7.2.1. Muestreo	34
7.2.2. Análisis fisicoquímico	35
7.2.3. Análisis microbiológico	35
7.2.4. Identificación de microorganismos en lixiviados	36
7.3. Pruebas ecotoxicológicas	38
7.3.1. Prueba ecotoxicológica de germinación de semillas	38
7.3.1.1. Ensayo ecotoxicológico con semillas estandarizadas de lechuga ( <i>Lactuca Sativa</i> )	39
7.3.1.2. Ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de frijol	39
7.3.1.3. Ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de calabaza	40
7.3.2. Ensayo ecotoxicológico con cebolla ( <i>Allium cepa</i> )	40
7.3.3. Ensayo ecotoxicológico con rábano ( <i>Rhapanussativus</i> )	40
7.4. Cultivo de vegetales y hortalizas irrigados con lixiviados	41
7.4.1. Análisis fisicoquímico y microbiológico del suelo empleado en los cultivos	41
<b>8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	42
8.1 Resultados del estudio de gabinete	42



8.2. Resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico de los lixiviados	44
8.2.1. Resultados de la identificación de microorganismos en lixiviados	46
8.3. Resultados de las pruebas ecotoxicológicas	47
8.3.1. Resultados de la prueba ecotoxicológica de germinación de semillas	47
8.3.1.1. Resultados del ensayo ecotoxicológico con semillas estandarizadas de lechuga ( <i>Lactuca Sativa</i> )	47
8.3.1.1.1. Resultados del análisis estadístico	50
8.3.1.2. Resultados del ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de frijol	50
8.3.1.2.1. Resultados del análisis estadístico	52
8.3.1.3. Resultados del ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de calabaza	53
8.3.1.3.1. Resultados del análisis estadístico	55
8.3.2. Resultados del ensayo ecotoxicológico con cebolla ( <i>Allium cepa</i> )	59
8.3.2.1. Resultados del ensayo de elongación de las raíces	59
8.3.2.1.1. Resultados del análisis estadístico	60
8.3.2.2. Resultados del ensayo de elongación del tallo	61
8.3.2.2.1. Resultados del análisis estadístico	63
8.3.3. Resultados del ensayo ecotoxicológico con rábano ( <i>Rhapanussativus</i> )	66
8.3.3.1. Resultados del análisis estadístico	68
8.4. Resultados del cultivo de vegetales y hortalizas irrigados con lixiviados	69
8.4.1. Resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico del suelo empleado en los cultivos	75
<b>9. CONCLUSIONES</b>	77
<b>10. RECOMENDACIONES</b>	78
<b>11. BIBLIOGRAFÍA</b>	79
<b>12. ANEXO</b>	84



LISTA DE FIGURAS

Figura	Nombre	Página
1	Clasificación de sitios de disposición final de residuos sólidos en México	16
2	Tipos de tratamiento de lixiviados	30
3	Proceso del análisis microbiológico para la determinación de coliformes totales y fecales	36
4	Microorganismos identificados en la muestra de lixiviado	46
5	Tasa promedio de germinación (TPG) e índice de germinación (InG) en la prueba con semillas estandarizadas de lechuga	49
6	Tasa promedio de germinación (TPG) e índice de germinación (InG) en la prueba con semillas no estandarizadas de frijol	52
7	Tasa promedio de germinación (TPG) e índice de germinación (InG) en la prueba con semillas no estandarizadas de calabaza	55
8	Comparación de la tasa promedio de germinación (TPG) de semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación	57
9	Comparación del índice de germinación (InG) de semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación	58
10	Comparación de la inhibición de la germinación (IG) de semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación	58
11	Inhibición de la elongación (IE) de las raíces de cebolla	60
12	Inhibición de la elongación (IE) del tallo de cebolla	63
13	Comparación de la elongación promedio (EP) de raíces y tallo de cebolla	65
14	Comparación de la inhibición de la elongación (IE) de raíces y tallo de cebolla	65
15	Peso promedio de la planta (PPP) en la prueba ecotoxicológica con rábano	68
16	Observaciones acerca del cultivo de cebollín	69

**LISTA DE FOTOGRAFÍAS**

Fotografía	Nombre	Página
1	Muestreo de lixiviado en el relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz, Edo.de México.	35
2	Visor para paneles BBL Crystal	37
3	Preparación de cajas Petri con semillas de lechuga y su incubación	39
4	Prueba ecotoxicológica con rábano.	41
5	Sitio de disposición final, San Cristóbal de las Casas, México.	44
6	Muestra control al término de la prueba y medición de la radícula de la plántula	47
7	Cajas Petri correspondientes a las soluciones 12.5, 25, 50 y 75 % lixiviado, al término del tiempo de exposición.	48
8	Semillas de frijol al término de la prueba	51
9	Semillas de calabaza al término de la prueba	54
10	Elongación de las raíces al término de la prueba	59
11	Cebollas al termino del tiempo de exposición a las soluciones de ensayo	62
12	Daño del rábano en la zona con contacto directo de la solución 50 % lixiviado	66
13	Rábanos al final del tiempo de exposición a las diferentes soluciones	67
14	Cebollines regados con la solución control	70
15	Cebollines regados con las soluciones 12.5 y 25 % lixiviado	70
16	Cebollines regados con las soluciones 50 y 75 % lixiviado	71
17	Cebollines regados con diferentes diluciones de muestra y control	71
18	Matas de frijol regadas con diferentes diluciones de muestra y control	72
19	Vaina de frijol de las plantas regadas con solución control y 12.5 % lixiviado respectivamente	72
20	Plantas de frijol regadas con soluciones 75, 50, 25 % lixiviado	73
21	Daño en hojas de calabaza regada con solución 50 y 75 % lixiviado	74
22	Mata de calabaza regada con solución control	74
23	Mata de calabaza regada con solución 75 % lixiviado	75



## LISTA DE TABLAS

Tabla	Nombre	Página
1	Compuestos encontrados en los residuos depositados en los sitios de disposición final	18
2	Porcentajes típicos de los gases en base al volumen seco	19
3	Composición media de los lixiviados de rellenos sanitarios	22
4	Principales tipos de lixiviados	23
5	Clasificación de fertilidad de suelos de acuerdo a la capacidad de intercambio iónico	25
6	Límites permisibles que marca la NOM-001-ECOL-1996 sobre la calidad de agua requerida para reuso en agricultura	27
7	Guía de calidad microbiológica recomendada por la OMS para uso del agua residual en la agricultura.	29
8	Resultados promedio de las diferentes diluciones de lixiviado	44
9	Resultados de la prueba de germinación de semillas estandarizadas de lechuga	48
10	Resultados de la prueba de germinación de semillas no estandarizadas de frijol	51
11	Resultados estadísticos de la prueba con semillas no estandarizadas de frijol	52
12	Tabla del ANOVA para la prueba con semillas no estandarizadas de frijol	53
13	Resultados de la prueba de germinación de semillas no estandarizadas de calabaza.	54
14	Resultados estadísticos de la prueba con semillas no estandarizadas de calabaza	56
15	Resultados de la prueba de inhibición del crecimiento promedio de raíces de <i>Allium cepa</i> .	60
16	Resultados estadísticos de la prueba de elongación de raíz de cebolla	61
17	Resultados de la prueba de elongación del tallo de <i>Allium cepa</i>	62
18	Resultados estadísticos de la prueba de elongación del tallo de cebolla	63
19	Tabla del ANOVA de la prueba de elongación del tallo de cebolla	64
20	Resultados de la prueba de ecotoxicológica con rábano	68
21	Resultados estadísticos de la prueba ecotoxicológica con rábano	69
22	Resultados promedio de los suelos	75



**ABREVIATURAS**

AGV = Ácidos grasos volátiles  
ANOVA = Análisis de varianza  
CF = Coliformes fecales  
CIC = Capacidad de intercambio catiónico  
COT = Carbono orgánico total  
COV's = Compuestos orgánicos volátiles  
CT = Coliformes totales  
CV = Coeficiente de variación  
DBO = Demanda bioquímica de oxígeno  
DQO = Demanda química de oxígeno  
EP = Elongación promedio  
EPR = Elongación promedio de la radícula  
F = Estadístico F  
 $F_{cal}$  = F calculada  
 $F_{tab}$  = F tabulada  
gl = Grados de libertad  
HH = Huevos de helminto  
 $H_0$  = Hipótesis nula  
 $H_1$  = Hipótesis alternativa  
IC = Inhibición del crecimiento  
IE = Inhibición de la elongación  
IG = Inhibición de la germinación  
InG = Índice de germinación  
MAX = Máximo  
MIN = Mínimo  
MS = Cuadrado medio  
ND = No detectado  
NG = No germinó  
NMP = Número más probable  
NSG = Número de semillas germinadas  
PD = Promedio diario  
pH = Potencial de hidrógeno  
PM = Promedio mensual  
PPP = Peso promedio de la planta  
RAS = Relación de absorción de sodio  
RC = Relleno controlado  
RM = Relleno metanogénico  
RS = Relleno sanitario  
s = Desviación estándar  
SDT = Sólidos disueltos totales  
SS = Suma de cuadrados  
SST = Sólidos suspendidos totales



TCA = Tiradero a cielo abierto  
TPG = Tasa promedio de germinación  
UFC = Unidades formadoras de colonias  
 $\bar{x}$  = Media muestral  
 $\mu$  = Media poblacional  
 $s^2$  = Varianza



## RESUMEN

La inadecuada captación y tratamiento de los lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos ocasiona la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, suelos y tierras de cultivo. Con el fin de evaluar la afectación de dicho líquido en cultivos agrícolas, se llevaron a cabo pruebas ecotoxicológicas rápidas, sencillas, de bajo costo y de fácil manejo en laboratorio, dentro de las cuales se analizó la germinación de semillas estandarizadas de lechuga y semillas no estandarizadas de frijol y calabaza, la elongación de tallo y raíces de cebolla, el crecimiento de rábano, así como el cultivo de hortalizas. Aunado a los ensayos ecotoxicológicos se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos basados en la normatividad mexicana tanto a los lixiviados como al suelo expuesto a estas sustancias durante el cultivo de vegetales.

Se clasificó al lixiviado en estudio como un lixiviado estabilizado con contenido de compuestos recalcitrantes y pobre en biodegradabilidad de acuerdo con su relación DBO/DQO de 0.07, con un valor de pH de 8.5, un contenido de 360 mg/L de sólidos suspendidos totales y conductividad de 1240  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Se identificaron los microorganismos *Staphylococcus equorum*, *Staphylococcus vitulus*, *Staphylococcus xylosus* y *Bacillus subtilis*.

Dentro de los ensayos ecotoxicológicos se determinaron amplios efectos negativos de los lixiviados a las comunidades vegetales generalmente a concentraciones mayores a 25 % de lixiviado.

En el cultivo de vegetales se observaron afectaciones como marchitamiento y bajo desarrollo de la planta en aquellas irrigadas con soluciones de concentraciones mayores de 25 % lixiviado.

Referente a las pruebas fisicoquímicas del suelo inicial y con tratamiento (irrigado con la solución 75 % lixiviado), se observó que la fertilidad del suelo disminuyó al ser invadido con lixiviados, gracias a la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de ambos suelos (el suelo inicial con un CIC de 99  $\text{cmol}(+)/\text{kg}$  y el suelo con tratamiento 33  $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ ), conjuntamente la permeabilidad del suelo se vio afectada por los sólidos suspendidos totales contenidos en los lixiviados (pasando de una permeabilidad de 18.5  $\text{cm}/\text{h}$  a 12.0  $\text{cm}/\text{h}$ ) y que ocasionaron un taponamiento físico al mismo. El suelo con tratamiento presentó una salinidad más elevada con una conductividad de 1810  $\mu\text{s}/\text{cm}$  que el inicial con 1320  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .



### 1. INTRODUCCIÓN

Se vive actualmente dentro de una sociedad en la que los residuos que generamos se han convertido en un grave problema para el medio ambiente. La mayor parte de estos residuos sólidos son llevados a sitios de disposición final, ésto conlleva a la generación de diferentes productos contaminantes (lixiviados y biogas), derivados de los procesos de descomposición microbiana y liberación de componentes contaminantes de los residuos. Uno de los productos generados en los sitios de disposición final es el lixiviado, el cual es un líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que pueden dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (SEMARNAT, 2004).

Se ha tenido conocimiento de varios hechos relacionados con la contaminación de ríos y tierras de cultivo por lixiviados, lo cual genera una gran problemática a nivel ambiental y social (Alfaro, 2009; Maya, 2010; Navarro, 2010).

Generalmente en la temporada de lluvias existe el peligro de que se genere una mayor cantidad de lixiviado de la que se puede controlar, y como consecuencia, este líquido originado por la percolación del agua a través de los residuos sólidos puede escurrir desde los tiraderos a cielo abierto hasta llegar a ríos, tierras de cultivo o casas habitación cercanas.

En México, en los últimos cinco años algunos de los lugares en los que han ocurrido este tipo de acontecimientos son: Zapopan y El Salto, Jalisco; Tultitlán, Ecatepec y Chiconautla, Edo.de México; Ayala, Cautla y Cuernavaca, Morelos; León, Guanajuato; Huejotzingo, Puebla; San Luis de la Paz, Guanajuato; etc. (Orta *et al.*, 2006; Bernache, 2009).

Para evaluar los efectos que tienen los lixiviados al estar en contacto con cultivos agrícolas se utilizaron ensayos ecotoxicológicos. Estas pruebas ecotoxicológicas son herramientas de diagnóstico adecuadas para establecer el efecto de agentes físicos y químicos sobre organismos de prueba bajo condiciones experimentales específicas y controladas. Tales efectos pueden ser tanto de inhibición como de magnificación, evaluados por la reacción de los organismos (mortalidad, índice de germinación, elongación radicular, crecimiento, proliferación, multiplicación, cambios morfológicos, fisiológicos o histológicos (Fernández *et al.*, 2006)).



### 2. JUSTIFICACIÓN

El peligro potencial de los lixiviados es la contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas, que puede darse por escurrimientos no controlados o por infiltraciones a través de formaciones permeables.

Con estas fugas de lixiviados las personas que viven cerca de los sitios de disposición final se ven altamente afectadas ya que puede iniciarse un foco de infección. También las tierras de cultivo se contaminan fácilmente, generando pérdidas de cosecha para los agricultores, la contaminación de sus siembras y de los animales que están en contacto con el sitio. Por lo regular los agricultores pasan por alto la contaminación de las hortalizas o frutos y proceden a comercializarlas para su consumo.

Es por ello que el tema de pruebas de toxicidad así como el tratamiento de lixiviados es necesario e importante para nuestra sociedad y ambiente, ya que al haber fugas en los sitios de disposición final, los lixiviados pueden contaminar el agua subterránea a la vez de causar un efecto negativo en la calidad del suelo o en las tierras de cultivo aledañas dañando así la actividad agrícola.

La necesidad de procedimientos baratos y rápidos para el análisis de la toxicidad de sustancias químicas presentes en muestras ambientales, ha conducido al desarrollo de diferentes bioensayos a corto plazo, como lo son las pruebas ecotoxicológicas con sistemas de plantas ya que estos son fáciles de manipular y almacenar, tienen un bajo costo, poseen similares mecanismos enzimáticos que los sistemas con animales y una buena correlación con otros sistemas de pruebas (Cantú, 2000).



### 3. ANTECEDENTES

A pesar de las múltiples noticias acerca de contaminación no sólo de cuerpos de agua, sino también de suelos, viviendas y cultivos a causa de infiltraciones de lixiviados generados en sitios de disposición final, actualmente no se ha hecho mucho para investigar y evaluar el daño ecológico que esta problemática conlleva.

A la fecha, no hay suficiente información acerca del estudio de infiltraciones de lixiviados en zonas de cultivo aledañas a sitios de disposición final, los estudios solo se refieren a cuerpos de agua. Por ejemplo, en un artículo en el que evaluaron la infiltración de lixiviados en suelos adyacentes a un cuerpo de agua en Oaxaca, México (Navarro, Belmonte y Aragón, 2006); es por ello que se busca profundizar en la afectación de los lixiviados en cultivos agrícolas puesto que estos llegan a los consumidores de forma contaminada o simplemente se pueden llegar a generar pérdidas en cosechas o la disminución de su valor económico, mientras que los agricultores desconocen las causas de dichas afectaciones en sus cultivos.

Los ensayos ecotoxicológicos en lixiviados ya han sido utilizados anteriormente para la evaluación de toxicidad en lixiviados generados en rellenos sanitarios. Principalmente en los países de Brasil, Colombia y EUA se utilizan pruebas ecotoxicológicas como un complemento de los análisis químicos utilizados en la caracterización de lixiviados o en la evaluación del tratamiento que se les da a los mismos (Ferreira, 2009; Ribé *et al.*, 2009; Zagorc-Končan, 2009).

Estas pruebas han sido en su mayoría bioensayos utilizando organismos acuáticos como lo son peces, algas o cretáceos como por ejemplo los bioensayos con el crustáceo invertebrado *Daphnia magna*, la bacteria marina *Photobacterium phosphoreum* y *Vibrio fischeri*, los peces *Cyprinus carpio* y *Danio rerio*, las algas *Chlamydomonas* y *Scenedesmus subspicatus*, entre otros organismos. Existen bioensayos de toxicidad que se distribuyen comercialmente por ejemplo Microtox® para evaluar la toxicidad de muestras medioambientales.

Aunque los estudios ecotoxicológicos de lixiviados o aguas contaminadas utilizando plantas son menos utilizados, los mayoritariamente reportados son los siguientes:

- Pruebas ecotoxicológicas en lixiviados con el uso de semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) para la obtención de la dosis letal al 50% (LD<sub>50</sub>) (Velazco *et al.*, 2003).
- Determinación de toxicidad evaluando el porcentaje de germinación, crecimiento de raíz y tallo usando tickle grass (*Agrostis scabra*), trigo (*Triticum aestivum*) y lechuga (*Lactuca sativa*) (Archambault *et al.*, 2004).



- Estimación de la toxicidad por la medición de la media del crecimiento de la raíz de cebollas (*Allium cepa*) (Torres, 2003).
- Prueba de toxicidad a corto plazo de la prolongación de la raíz de un vegetal, utilizando *Lactuca sativa* (Torres, 2003).
- Prueba con *Lactuca sativa* y con *Allium cepa* para la evaluación toxicológica de muestras ambientales, en el proyecto WaterTox, promovido por el Centro Internacional para el Desarrollo y la Investigación de Canadá ([http://www.idrc.ca/en/ev-84473-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/en/ev-84473-201-1-DO_TOPIC.html)).

En este trabajo se realizaron pruebas ecotoxicológicas utilizando plantas como organismos de prueba, algunos comúnmente usados en lixiviados o estandarizados como: semillas de lechuga *Lactuca sativa*, bulbos de cebolla (*Allium cepa*) y otros no estandarizados como: semillas de frijol, semillas de calabaza y rábanos. Aunando a esto, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica y microbiológica del lixiviado proveniente del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz, para este caso.

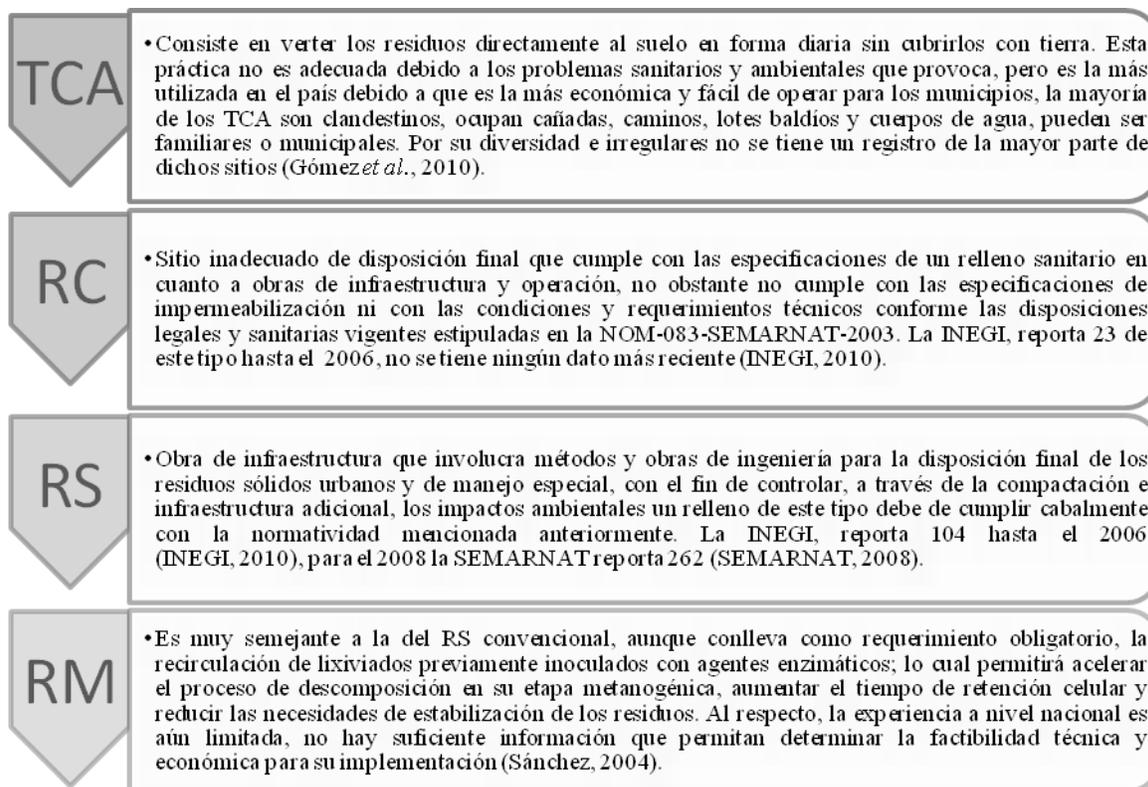
Sin embargo, no es suficiente solamente caracterizar el lixiviado sino también evaluar la problemática que se tiene cuando estos líquidos altamente tóxicos se infiltran o migran fuera del sitio de disposición final, generalmente a mantos acuíferos, cuerpos de agua, suelos o áreas de cultivos aledañas.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Disposición final de residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos según la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, son los generados en casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en sus actividades domésticas, de productos de consumo y de sus envases, embalajes o empaques; los que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

En México las prácticas más comunes para disponer los residuos sólidos urbanos o municipales en el suelo son: tiradero a cielo abierto (TCA), relleno controlado (RC), relleno sanitario (RS) y relleno metanogénico (RM) o biorreactor, los cuales se explican en la figura 1.



**Figura 1.** Clasificación de sitios de disposición final de residuos sólidos en México.



A nivel nacional el 64 % de los residuos se depositan en 88 rellenos sanitarios y 21 sitios controlados, siendo municipales 49 % de los rellenos, 18 % regionales y 33 % son operados por la iniciativa privada. Cabe resaltar que en algunos estados es mayor la cantidad de residuos depositados en tiraderos a cielo abierto que en sitios controlados, por ejemplo, en el año 2009, Oaxaca dispuso de 798,000 ton/año en TCA y solo 12,000 ton/año en sitios controlados (INEGI, 2010), un caso similar presenta el estado de Chiapas, el cual cuenta con 118 sitios para la disposición final de residuos sólidos, operando 95 % de éstos como tiraderos a cielo abierto sin control alguno y con afectaciones al entorno (Nájera *et al.*, 2010).

Respecto a los rellenos sanitarios en México, la mayoría de ellos cumplen parcialmente con la normatividad y solamente el 34 % del total cuentan con laguna de evaporación. En el resto, los lixiviados escurren libremente, pudiendo contaminar suelos y cuerpos de agua de los alrededores; existen escasos sitios de disposición final que cuentan con laguna para la evaporación de lixiviados y recirculación de los mismos a estratos de basura y plataformas de celdas, se tienen los de las ciudades de Mérida, Durango, Nuevo Laredo, Tamaulipas, Puebla, León, Guanajuato, Aguascalientes, Monterrey, rellenos conurbados del Estado de México (Tlalnepantla, Bordo Poniente, Tecámac y Naucalpan entre los principales).

Los residuos sólidos urbanos que son depositados en cualquier tipo de sitio de disposición final, sufren un proceso de descomposición microbiana, lo que conlleva a la generación de dos tipos de emisiones o subproductos: biogas y lixiviados. El primero se compone principalmente por metano y bióxido de carbono, en tanto que el segundo, son líquidos originados por los desechos heterogéneos en descomposición y los cuales arrastran todo tipo de contaminantes, muchos de ellos en elevadas concentraciones, por lo que son catalogados como los residuos más complejos y difíciles de tratar (Luna *et al.*, 2007).

#### 4.2. Reacciones involucradas en sitios de disposición final

Los componentes químicos contenidos en los residuos depositados en los sitios de disposición final pueden clasificarse en tres grupos: orgánicos naturales, orgánicos de origen antropogénico e inorgánicos. En la tabla 1 se explican estos tres tipos de componentes.

Las reacciones bioquímicas son las más importantes ocurridas en un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos, se trata de los procesos de descomposición de la materia orgánica biodegradable de los residuos.

Inicialmente la actividad química así como la oxidación biológica de la materia orgánica es alta, aunque a medida de que la cantidad de materia orgánica presente en los residuos depositados se va degradando, esta actividad química y biológica disminuye paulatinamente.



**Tabla 1.** Compuestos encontrados en los residuos depositados en los sitios de disposición final.

Tipo de compuestos	Proporción encontrada	Características
<b>Orgánicos naturales</b>	Mayoritaria	Debido al carácter reductor de la materia orgánica, durante su degradación consumen el oxígeno presente, generando un medio anóxico. Estos compuestos sufren una rápida fermentación, dando lugar a la formación de gases.
<b>Orgánicos de origen antropogénico</b>	Minoritarios	Constituidos, por elementos presentes en los compuestos naturales, así como por la presencia de cloro y mayores cantidades de azufre. Son sustancias que, aunque puedan participar en un número elevado de reacciones, se degradan muy lentamente.
<b>Inorgánicos</b>	Baja	Pueden participar en distintos procesos químicos (redox, complejación, ácido-base, etc.), originando productos solubles que pueden incorporarse a los lixiviados.

Fuente: Orozco *et al.*, 2003.

Los principales factores físicos que afectan la formación de lixiviados y biogas son: la composición y estado físico de los residuos, el contenido de humedad de los residuos y la temperatura del medio ambiente.

#### 4.3. Emisiones de gases

A consecuencia de la degradación de materia orgánica presente en los sitios de disposición final, se generan gases durante la vida del mismo, a la mezcla de estos gases se les conoce como biogas.

Los gases se forman por efecto de dos procesos, el aerobio y el anaerobio. El proceso anaerobio es el de mayor importancia, ya que el aerobio requiere del consumo de oxígeno por parte de las bacterias degradantes y el suministro de este elemento está limitado a la porción de aire atrapado en los intersticios de los desechos, por lo que la duración de la fase aerobia y su generación típica de agua y bióxido de carbono son más bien breves.



En cambio una vez consumido el oxígeno disponible, las bacterias anaerobias pueden activar su metabolismo y permanecer activas mientras exista un sustrato del cual puedan extraer la energía necesaria para sus procesos vitales. Las sustancias que libera este proceso son básicamente metano y bióxido de carbono.

Los porcentajes típicos de los gases con base al volumen seco se muestran en la tabla 2. Además del metano y el bióxido de carbono, se encuentran en cantidades muy pequeñas otros compuestos orgánicos volátiles (COV's) que pueden resultar tóxicos para la salud pública.

**Tabla 2.** Porcentajes típicos de los gases en base al volumen seco.

<b>GAS</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<b>Metano</b>	45-60 %
<b>Bióxido de carbono</b>	40-60 %
<b>Nitrógeno</b>	2-5 %
<b>Oxígeno</b>	0.1-1 %
<b>Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.</b>	0-1 %
<b>Amoniaco</b>	0.1-1 %
<b>Hidrógeno</b>	0-0.2 %
<b>Monóxido de carbono</b>	0-0.2 %
<b>Constituyentes en cantidades traza</b>	0.01-0.6 %

Fuente: Orozco *et al.*, 2003.

Habitualmente los gases generados en un relleno sanitario se queman o se utilizan para la recuperación de energía en forma de electricidad, aprovechándose así el biogas por su elevado poder calorífico (PCI) debido a su concentración de metano.

#### 4.4. Lixiviado

Un producto que siempre se genera en los sitios de disposición final es el lixiviado, éste líquido se forma debido a la percolación de agua a través de la masa de residuos encontrados en el sitio, además de la degradación de la materia orgánica presente en los residuos sólidos. La composición de este líquido cambia con el tiempo, de acuerdo a la fase de descomposición en la que el sitio de disposición final se encuentra.

Los lixiviados arrastran a su paso material disuelto, fijo o volátil, en concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, así como sales inorgánicas y una gran variedad de



microorganismos existentes en la biomasa de los residuos sólidos (Lopes y Peralta, 2005; Wiszniowski *et al.*, 2006). Estas características forman una corriente altamente agresiva al ambiente.

#### 4.5. Procesos bioquímicos en un sitio de disposición final

Los residuos sólidos urbanos se constituyen mayoritariamente por compuestos orgánicos biodegradables, que gracias al oxígeno existente en la masa de residuos depositada, éstos se degradan primeramente mediante procesos aerobios. Consecutivamente la degradación se presenta en condiciones anaerobias, ya que la compactación a la que se someten los residuos y las infiltraciones de agua, ayudan a desalojar el aire atrapado.

Orozco *et al.* (2003) y Orta *et al.* (2006) mencionan cuatro etapas características en el desarrollo de los procesos bioquímicos en un sitio de disposición final:

- 1) Fase inicial aerobia. De duración corta por el alto contenido de materia orgánica biodegradable y la limitada cantidad de oxígeno. La temperatura de los residuos se eleva hasta un rango de 70 °C a 90 °C. En la composición del lixiviado se tienen sólidos arrastrados, sales disueltas y cantidades pequeñas de especies orgánicas. En la composición del gas producido se aprecia una alta concentración de bióxido de carbono y nitrógeno, disminución en la concentración de oxígeno.
- 2) Fase inicial ácida. Es de duración variable, en condiciones anaerobias empieza la conversión biológica de la porción orgánica de los residuos; se produce bióxido de carbono e hidrógeno, disminuye la cantidad de nitrógeno. En la composición de lixiviados contiene principalmente nitrógeno amoniacal, ácidos grasos como el ácido acético, propiónico, butírico, láctico y fórmico. En algunas ocasiones pueden encontrarse metales pesados. Las temperaturas dentro del sitio de disposición final se reducen a un rango entre 30 °C y 50 °C.
- 3) Fase metanogénica. El lixiviado presenta un intervalo de pH de 6.5 - 7.5 y un decremento de la concentración de compuestos orgánicos volátiles, del porcentaje de hidrógeno, de DBO, DQO, COT y nutrientes. En condiciones anaerobias, microorganismos metanogénicos actúan para transformar los compuestos orgánicos a bióxido de carbono y metano; por lo cual, el gas formado se constituye fundamentalmente por significativas cantidades de metano y bióxido de carbono.



- 4) Fase post-metanogénica. El pH del lixiviado persiste casi constante. La materia orgánica remanente es difícilmente degradable. Se reduce de manera importante la velocidad de formación de biogás; el metano y el bióxido de carbono son los gases principales que se encuentran en esta fase.

Al medir la temperatura se puede evaluar indirectamente tanto la evolución química como bioquímica de un relleno sanitario. Se sabe que la velocidad de reacción aumenta proporcionalmente a la temperatura, es por ello que un incremento de temperatura indica una alta actividad química.

El pH es también un buen parámetro para determinar el estado de reactividad bioquímica del sitio de disposición final. Por ejemplo en la formación de complejos, a un pH ácido, el ligando (generalmente de carga negativa) tiende a adsorberse en la superficie de las partículas minerales, que habitualmente tiene carga positiva en estos medios. Ello favorece la descomposición del complejo y la liberación del metal, el cual, como está en forma de ión positivo, queda libre para ser arrastrado por el agua en percolación. Por el contrario, en medios alcalinos, la superficie de las partículas tiene una carga negativa, lo que atrae a los iones metálicos positivos. Además, también se produce desorción de ligandos, por lo que los iones metálicos no adsorbidos tenderán a acomplejarse. En esta situación la concentración de metales libres es mínima (Orozco *et al.*, 2003).

#### 4.6. Composición del lixiviado

La composición de lixiviado es variable ya que obedece varios factores presentes en los sitios de disposición final como son:

- ▶ Naturaleza del residuo. Factor de gran importancia ya que los contaminantes inmersos en el lixiviado provienen de los residuos vertidos en los sitios de disposición final.
- ▶ Edad del depósito. Se determina la composición según las etapas de evolución del sitio de disposición final.
- ▶ Tecnología del sitio de disposición final. Puede ser un relleno sanitario de alta, media o baja densidad. El lixiviado y su composición son determinados por las condiciones del sitio de disposición final como por ejemplo, la tecnología empleada, grado de compactación, frecuencia y método de cubierta, etc.
- ▶ Otros. Estación del año, clima e hidrogeología del lugar, tratamiento previo de los residuos a depositar, si existe recirculación de lixiviado, etc.

En la tabla 3, se expresan los valores típicos de algunos parámetros según la composición media de los lixiviados generados en un relleno sanitario.

**Tabla 3.** Composición media de los lixiviados de rellenos sanitarios.

PARÁMETRO	INTERVALO DE VALORES (g/L salvo otra indicación)
pH (unidades)	3.7 - 8.5
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	2810 - 16800
DQO (g $\text{O}_2/\text{L}$ )	0.04 - 89.5
DBO (g $\text{O}_2/\text{L}$ )	0.04 - 33.4
Materia seca (total)	0 - 59.2
Dureza ( $\text{CaCO}_3$ )	0 - 22.8
Fosfato (total)	0 - 0.13
$\text{NH}_4\text{-N}$	0 - 1.1
$(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$	$2 \times 10^{-4}$ - 0.01
Ca	0.05 - 7.2
Na	0 - 7.7
K	0.028 - 3.77
Mn	$9 \times 10^{-5}$ - 0.0125
Mg	0.017 - 15.6
Fe	0 - 2.82
Zn	0 - 0.037
Cu	0 - $9.9 \times 10^{-3}$
Cd	$< 3 \times 10^{-5}$ - $1.7 \times 10^{-2}$
Pb	$< 1 \times 10^{-5}$ - $2 \times 10^{-3}$
Cloruros	$4.7 \times 10^{-3}$ - 2.467
Sulfatos	1.10 - 1.558

Fuente: Orta *et al.*, 2006.

En un relleno sanitario se pueden clasificar a los lixiviados en tres tipos, esto en función del contenido de materia orgánica (DBO y DQO), grado de estabilización y edad del relleno. Esta clasificación del lixiviado se muestra en la tabla 4.

La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), para el lixiviado joven representa más del 80 % de la carga orgánica y para el lixiviado intermedio del 20 al 30 %. La relación DBO/DQO establece el contenido de materia orgánica (biodegradable y recalcitrante) y el grado de estabilización del lixiviado. Un valor de esta relación mayor que 0.3 indica un lixiviado joven y presencia de material biodegradable; a una relación menor o igual que 0.1 indica un lixiviado estabilizado con contenido de compuestos recalcitrantes.

En México, las observaciones acerca de la composición química de los lixiviados arrojan como resultado un pH de 9 y la presencia de gran cantidad de sales, lo que se refleja en una alta conductividad, ausencia de oxígeno y alto contenido de metales pesados, tales como cadmio, cromo, cobre, hierro y zinc, cuyas concentraciones rebasan los límites de toxicidad (Jiménez, 2001).



Tabla 4. Principales tipos de lixiviados.

Parámetro de referencia	Edad del relleno (años) y tipo de lixiviado		
	< 5 (Joven) I (Biodegradable)	5 - 10 (Medio) II (Intermedio)	> 10 (Viejo) III (Estabilizado)
pH	< 6.5	6.5 - 7.5	> 7.5
DQO (g/L)	> 20	3 - 15	< 5
DQO/COT	< 2.7	2.0 - 2.7	> 2.0
DBO/DQO	< 0.5	0.1 - 0.5	< 0.1
AGV (%COT)	> 70	5 - 30	< 5
Metales pesados (g/L)	2		< 50 mg/L

Fuente: Orta *et al.*, 2006.

#### 4.7. Principales fuentes de afectación de los lixiviados

El riesgo ambiental que presentan los lixiviados al no ser captados y tratados adecuadamente, es la contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas. Los lixiviados pueden presentar dos tipos de movimientos, uno vertical y otro horizontal. En el primero, el lixiviado se infiltra en el subsuelo y puede alcanzar los mantos freáticos y acuíferos, contaminando así el agua subterránea; en el segundo, los lixiviados se extenderán a lo largo del terreno y con ello contaminará y dañará el suelo y la vegetación del sitio y de zonas próximas al mismo, logrando conjuntamente la incapacidad del suelo para proveer cultivos de buena calidad sanitaria.

#### 4.8. Efectos en cultivos al estar en contacto con lixiviados

Los lixiviados que entran en contacto a zonas de cultivo próximas a los sitios de disposición final, ocasionan la contaminación del suelo causando la modificación de sus procesos naturales y la reducción de su fertilidad.

Parámetros a medir para determinar el daño por lixiviados en zonas de cultivo:

- Salinidad y RAS:

El exceso de salinidad es perjudicial para muchos cultivos, ya que el sodio plantea problemas de permeabilidad en los suelos.

Las concentraciones de sales solubles en el suelo aumentan en proporción con el grado de salinidad del agua de riego y a medida que el agua del suelo, pero no la sal, es removida por la evaporación y la transpiración.



La influencia negativa de la salinidad en los cultivos, puede ser motivada por dos situaciones:

\*Por el incremento del porcentaje de agua necesario, ya que las sales retienen por ósmosis parte del agua existente, compitiendo con las raíces, que se ven obligadas a realizar un mayor esfuerzo (consumo de energía metabólica) para poder absorberla.

\*Por toxicidad directa de ciertas sales:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ , etc.

El RAS se define como la relación de absorción de sodio y al estar combinada con una alta mineralización de agua, o en este caso del lixiviado, altera la estructura del suelo así como su permeabilidad. Esta relación se define por la siguiente fórmula:

$$\text{RAS} = \frac{[\text{Na}]}{([\text{Ca}][\text{Mg}])^{1/2}}$$

Donde:

$[\text{Na}^{1+}]$ : concentración de iones  $\text{Na}^{1+}$ , en meq/L

$[\text{Ca}^{2+}]$ : concentración de iones  $\text{Ca}^{2+}$ , en meq/L

$[\text{Mg}^{2+}]$ : concentración de iones  $\text{Mg}^{2+}$ , en meq/L

Los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , en las proporciones habitualmente encontradas en los suelos, mantienen la estructura de éstos. Cuando son regados con aguas de un alto contenido de sodio intercambiable, este sustituye a los iones alcalinotérreos de las arcillas, desfloculándolas y provocando la impermeabilización del suelo. Este riesgo se mide por medio del RAS y de la salinidad del agua. A un valor dado de RAS (<9) el riesgo es más severo a medida que aumenta la mineralización del agua. El agua cuyo contenido de sales disueltas sea superior de 2 000 mg/L es aceptable para la mayor parte de cultivos, excepto de los muy sensibles. Determinadas sales solubles pueden ser dañinas en cantidades excesivas. Por ejemplo, las concentraciones de cloruros del orden de 700 a 1500 mg/L, en la zona de las raíces, pueden provocar el quemado de las hojas y la posible muerte de las plantas (Jiménez, 2001).

La determinación de la conductividad eléctrica es la forma de medir la salinidad del agua o extractos del suelo.

- Permeabilidad del suelo y taponamiento:

La permeabilidad del suelo es la aptitud para permitir que el agua lo atraviese al ejercer un determinado gradiente. Se mide por medio del coeficiente de permeabilidad, el cual se define como la columna de agua que escurre en un tiempo determinado cuando el suelo se encuentra saturado y en régimen estable (Jiménez, 2001).



Según Jiménez (2001), el taponamiento del suelo es originado por tres causas.

- 1) Taponamiento físico. Originado por la obstrucción de los poros del suelo por los sólidos suspendidos totales (SST). Ocurre en las primeras capas y provoca la impermeabilización.
- 2) Taponamiento biológico. Ocasionado por la aparición de algas, generalmente cuando el agua se estanca en el terreno. Durante el desarrollo de estas algas, éstas precipitan sales como el carbonato de calcio, obstruyendo así los poros.
- 3) Taponamiento químico. Causado por la modificación de las características fisicoquímicas del medio como el pH, temperatura y potencial redox, con esto ocurren precipitaciones de algunas sales.

- Capacidad de intercambio catiónico (CIC):

Capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes minerales. Esta capacidad aumenta notablemente con la presencia de materia orgánica, y podría decirse que es la base de lo que se conoce como fertilidad del suelo. En la tabla 5 se muestra la clasificación de fertilidad de los suelos en función de la capacidad de intercambio catiónico.

**Tabla 5.** Clasificación de fertilidad de suelos de acuerdo a la capacidad de intercambio catiónico.

CLASE	CIC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )
Muy alta	> 40
Alta	25 - 40
Media	15 - 25
Baja	5 - 15
Muy baja	> 5

Fuente: Fernández *et al.*, 2006.

- Sólidos suspendidos totales (SST):

Se define como la materia particulada que se retiene en un filtro de vidrio con tamaño de poro de 0.45 m; permanece al evaporar el agua entre 103 °C y 105 °C. Los sólidos sedimentables son una fracción de los SST y representa el material que sedimenta en 45 minutos en un cono Imhoff al dejar reposar el agua (Jiménez, 2001).



Los SST, pueden ocasionar depósitos de lodo, originando condiciones anaerobias y por lo tanto obstrucción por sedimentos de los suelos; con esto la actividad agrícola se ve afectada, pues se impide la germinación de semillas. Cuando los SST entran en contacto con los cultivos, provocan una disminución en el crecimiento de las plantas, frena la actividad fotosintética en las hojas e incrementa el crecimiento de microorganismos.

- Sólidos disueltos totales (SDT):

Cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un líquido luego de una fina filtración (dos micrómetros). Se puede medir por métodos gravimétricos o por conductividad eléctrica.

Al entrar las sales en contacto con el suelo y no haber lixiviación, estas se acumulan y reducen su productividad, obteniendo como consecuencia la interrupción del desarrollo de cultivos.

- Elementos minerales traza:

Las plantas necesitan de cierta cantidad de elementos como los metales pesados, siempre y cuando no se encuentren en cantidades excesivas; en este caso se puede perjudicar el desarrollo de las mismas, causando problemas de toxicidad y bioacumulación.

Los denominados oligoelementos como el B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se, Zn y As, pueden llegar a servir como micronutrientes para los cultivos, debido a que los organismos los necesitan (en cantidades pequeñas) para completar su ciclo de vida. Pero si rebasan cierto umbral se vuelven tóxicos. Elementos como el Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Tl resultan altamente tóxicos y pueden llegar a acumularse en organismos vivos.

Cuando el suelo contiene una cantidad de metales la cual superalos límites máximos permitidos causan efectos inmediatos en los cultivos como lo es la inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas, así como también la disminución de las poblaciones microbianas en el suelo (Prieto-Méndez *et al.*, 2009).

En la tabla 6, se muestran los límites permisibles que marca la NOM-001-ECOL-1996 sobre la calidad de agua requerida para reuso en agricultura y por consiguiente que se pone en contacto con cultivos agrícolas.



**Tabla 6.** Límites permisibles que marca la NOM-001-ECOL-1996 sobre la calidad de agua requerida para reuso en agricultura.

<b>LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS</b>												
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES					
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)			
(mg/L, excepto cuando se especifique)	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SST	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125
DBO	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	75	150
Nitrógeno total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	40	60
Fósforo total	20	30	20	30	5	10	20	30	2	10	2	10
<b>LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS</b>												
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				SUELO	
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Uso en riego agrícola (A)	
(mg/L, excepto cuando se especifique)	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1
Cianuros	1	3	1	2	1	2	2	3	1	2	2	3
Cobre	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(1) Instantáneo; (2) Muestra simple promedio ponderado; (3) Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006 PD= Promedio diario; PM= Promedio mensual; (\*) Medidos de manera total (A),(B) y (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos



- Tipos de cultivo:

Legumbres, verduras y frutas. Se debe proteger de la contaminación por lixiviados a los vegetales destinados al consumo humano ya que se conoce que hay relación directa entre la ocurrencia de epidemias y el riego o contacto con agua contaminada, de las verduras y frutas que se consumen crudas.

Forrajes. Se pueden transmitir parásitos a los animales que lo consumen si es que los forrajes se cosechan sin esperar un buen tiempo después de que se tuvo contacto con el agua contaminada o en este caso el lixiviado.

#### 4.9. Microorganismos en los lixiviados

Se ha reportado (Orta *et al.*, 2006) que en los lixiviados se encuentran distintos contaminantes como lo son bacterias, virus, protozoarios y helmintos. Las bacterias que más frecuentemente pueden ser aisladas son la de los géneros *Bacillus*, *Corynebacterium* y *Streptococcus*, también se han observado en los lixiviados la presencia de enterovirus y de microorganismos fecales (coliformes y estreptococos). Los problemas de transmisión de enfermedades por microorganismos patógenos pueden ocasionarse a través de los alimentos o por contacto directo con la piel humana.

Algunos patógenos pueden transmitirse al ganado alimentado en campos regados con aguas residuales o que han sido contaminados con lixiviados y de ahí a los consumidores (Orozco *et al.*, 2003).

En la tabla 7, se exponen los criterios microbiológicos recomendados por la OMS para el agua residual predestinada al reuso agrícola.

-Riesgos epidemiológicos:

Se han reportado evidencias de que el consumo de verduras crudas que han estado en contacto con agua contaminada o aguas residuales, han provocado cuantiosos brotes epidemiológicos. Algunas enfermedades ocasionadas por esto son: cólera, fiebre tifoidea, amebiasis, disentería bacilar, ascariidiasis, etc.

Estos brotes epidemiológicos pueden ser causados por el consumo de verduras crudas regadas con agua residual, beber aguas superficiales contaminadas con aguas residuales, contacto de los trabajadores con agua contaminada, consumo de animales parasitados por helmintos y similares contenidos en aguas residuales.

**Tabla 7.** Guía de calidad microbiológica recomendada por la OMS para uso del agua residual en la agricultura.

CATEGORÍA	CONDICIONES DE REUSO	GRUPO EXPUESTO	NEMATODOS INTESTINALES <sup>B</sup>	COLIFORMES FECALES
			(media aritmética) HH/L <sup>c</sup> .	(media aritmética) NMP/L <sup>c</sup> .
<b>A</b>	Riego de cultivos que se consumen crudos, campos de golf y parques públicos.	Trabajadores, consumidores y público en general.	< 1	< 1000 <sup>d</sup>
<b>B</b>	Riego de cultivos como cereales, cultivos industriales, forrajeros y árboles <sup>e</sup> .	Trabajadores	< 1	Estándar no recomendado
<b>C</b>	Irrigación de localidades para los cultivos de la categoría B, pero la exposición de trabajadores y público nunca ocurre.	Ninguno	No aplicable	No aplicable

*a: En casos específicos, los estudios epidemiológicos locales, factores socioculturales y ambientales pueden ser tomados en cuenta y modificados.*

*b: Especies Áscaris, Trichuris y similares.*

*c: Durante el periodo de irrigación.*

*d: Una guía más estricta (< 200 UFC/100 mL) es apropiada para el césped público y de hoteles, con el cual la gente tiene contacto directo.*

*e: En el caso de árboles frutales, la irrigación puede suspenderse 2 semanas antes de la cosecha.*

Fuente: Jiménez, 2001.

#### -Supervivencia en suelos y vegetales:

Las plantas pueden contaminarse al ser bañadas con el lixiviado o al estar en contacto con el suelo contaminado.

Las bacterias, quistes de protozoarios y huevos de helmintos, se fijan fuertemente a la superficie de plantas y vegetales, estos organismos no se eliminan con un lavado simple, por ello las plantas contaminadas son difíciles de limpiar.

Existen varios factores como el tipo de organismo, la temperatura, la humedad, el tipo de suelo, etc. que determinan que las bacterias patógenas intestinales sobrevivan en el suelo y la vegetación.

Seoanez (1999) estudió que las bacterias patógenas humanas, las amebas y los huevos de helmintos, no son capaces de atravesar la superficie limpia de los vegetales sanos, pero pueden entrar fácilmente a través de grietas o heridas que interrumpen sus barreras naturales de defensa.



Se ha observado que la luz solar disminuye el número de microorganismos y que las lluvias intensas no arrastran o eliminan las bacterias sino que infectan secundariamente a las plantas.

Las plantas como la lechuga y otras verduras de crecimiento rápido, con hojas múltiples y pliegues hondos en la superficie, dan recuentos de coliformes más elevados que las lisas. Además de que las plantas inicialmente mencionadas pueden transportar fácilmente huevos de áscaris.

#### 4.10. Tratamiento de los lixiviados

Para impedir que los lixiviados producidos en los sitios de disposición final, entren en contacto con las aguas subterráneas o dañen el suelo y cultivos aledaños, se debe realizar su captación y tratamiento posterior. Como las características de los lixiviados pueden variar tanto, se han utilizado varias opciones para el tratamiento del lixiviado (figura 2).



**Figura 2.** Tipos de tratamiento de lixiviados.

#### 4.11. Ecotoxicología

La ecotoxicología se encarga del estudio de la contaminación, su origen y efectos sobre los seres vivos y sus ecosistemas (Capó, 2007).

Se entiende como ecosistema al conjunto de organismos vivos, de condiciones ambientales y de sus interacciones entre los mismos; y como contaminación a la interrupción del equilibrio biológico de un ser viviente por factores físicos, químicos y/o biológicos, afectando así a un sistema ecológico.



La ecotoxicología es una ciencia predictiva ya que además de estudiar la contaminación sobre los sistemas bióticos (ya sea en forma de toxicidad, alteración de especies, reducción de una determinada productividad, etc.), busca el bienestar del ser humano al informar y alertar de la peligrosidad de las alternativas del desarrollo y de la degradación del ambiente, así como también, prevenir, aportando datos que sirvan de guía a las entidades reguladoras para la toma de decisiones (Capó, 2007). Esto se ha llevado a cabo a partir de protocolos de ensayo generalmente divididos en tres secuencias: siendo la primera la liberación del contaminante (abarcando formación, fuentes de contaminación, transporte, etc.), la segunda es el ingreso de los contaminantes en el medio biológico y por último, la calificación y cuantificación de los efectos patológicos sobre los seres vivos y sus ecosistemas.

A pesar del limitado alcance de la información proveniente de los ensayos de ecotoxicidad para su extrapolación a escala ambiental, los estudios con organismos en laboratorio, en condiciones controladas y estandarizadas para la evaluación de respuestas, han venido siendo las fuentes de información predominantes para la evaluación ecológica de los efectos de los contaminantes tóxicos (Castillo, 2004).

Este tipo de ensayos ecotoxicológicos son por lo general procedimientos a corto plazo y baratos para determinar el efecto de un contaminante dentro de un ecosistema.

En este trabajo los ensayos ecotoxicológicos se basaron en sistemas de plantas debido a que son fáciles de manipular y almacenar, tienen bajo costo y tienen mecanismos enzimáticos similares a los animales y por ser organismos eucarióticos, son por ende más comparables a la mayoría de las especies de la flora y fauna superiores.

Los organismos elegidos como indicadores de toxicidad en las diferentes pruebas ecotoxicológicas se les evaluó el resultado de la interacción entre el lixiviado (en sus diferentes diluciones) y el sistema biológico; considerando que el efecto ocasionado en ellos fue provocado por la acción combinada de todas las sustancias presentes en el medio, incluso las no tóxicas pues pueden afectar las propiedades del sistema y como consecuencia, las condiciones de vida de los organismos expuestos. Estos efectos se hicieron visibles en las plantas usadas como indicadores ecotoxicológicos como, mortalidad, índice de germinación, elongación radicular, crecimiento, entre otros.

Al conocer los efectos obtenidos en los organismos utilizados en las pruebas ecotoxicológicas, se permite valorar y determinar los factores de riesgo asociados a su exposición, así como el grado de tolerancia o sensibilidad de la planta examinada. En conjunto, esto puede aportar mayor certeza, aunque no contundente, para vislumbrar el impacto ambiental y poder también atribuir a una especie el papel de bioindicador ambiental para un contaminante o conjunto de ellos (Fernández *et al.*, 2006).



## 5. OBJETIVOS

### 5.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la afectación de los lixiviados que se infiltran a áreas de cultivo próximas a los sitios de disposición final mediante el análisis de pruebas ecotoxicológicas utilizando semillas (estandarizadas y no estandarizadas) y plantas, para determinar los efectos ocasionados por las sustancias químicas y agentes tóxicos presentes en los lixiviados.

### 5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Investigar la información de gabinete acerca de la contaminación de tierras de cultivo por lixiviados mediante la revisión de artículos, normas y notas periodísticas, para analizar la problemática ocasionada por la infiltración de lixiviados a tierras de cultivos aledañas a sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos.
- 2) Caracterizar los lixiviados mediante un análisis fisicoquímico y microbiológico para determinar la concentración de sus componentes.
- 3) Evaluar experimentalmente la toxicidad del lixiviado aplicando diferentes dosis mediante pruebas ecotoxicológicas para determinar los efectos de las sustancias químicas y agentes tóxicos presentes en los lixiviados.
- 4) Evaluar experimentalmente el daño en suelos y cultivos ocasionado por los lixiviados en función de la exposición de organismos vivos a los agentes tóxicos de los lixiviados para determinar los efectos producidos.



### **6. HIPÓTESIS**

Al aplicar pruebas ecotoxicológicas se podrá determinar el grado de toxicidad de los lixiviados y con los resultados obtenidos de dichas pruebas se conseguirá evaluar la afectación de los mismos al infiltrarse a áreas de cultivo próximas a sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos.



### 7. METODOLOGÍA

Este trabajo se llevó a cabo en cuatro etapas: en la primera se hizo un estudio de gabinete cualitativo en donde se revisó la problemática ocasionada por la infiltración de lixiviados en áreas de cultivo próximas a sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, en la segunda se caracterizó a los lixiviados con pruebas fisicoquímicas y microbiológicas, en la tercer etapa mediante pruebas ecotoxicológicas se evaluó la toxicidad de los lixiviados y en la cuarta fase se evaluó experimentalmente el daño en cultivos y suelo causado por los lixiviados.

#### 7.1. Estudio de gabinete

Se estudió la problemática ocasionada por la infiltración de lixiviados hacia áreas de cultivo próximas a sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, así como su relevancia actual en México.

Se consultaron notas periodísticas acerca de la contaminación por lixiviados en México, normas mexicanas aplicadas a la protección ambiental en los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, además de diversos artículos nacionales e internacionales referentes a la problemática ocasionada por la infiltración de lixiviados.

#### 7.2. Análisis fisicoquímico y microbiológico de los lixiviados

##### 7.2.1. Muestreo

El lixiviado se tomó de un solo punto de muestreo, a la entrada de la laguna de lixiviados del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz, con dirección Camino viejo a las minas s/n, col. San Pedro Barrientos, Tlalnepantla, Estado de México, C.P. 54010 (fotografía 1).



**Fotografía 1.** Muestreo de los lixiviado en el relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz, Edo.de México.

### 7.2.2. Análisis fisicoquímico

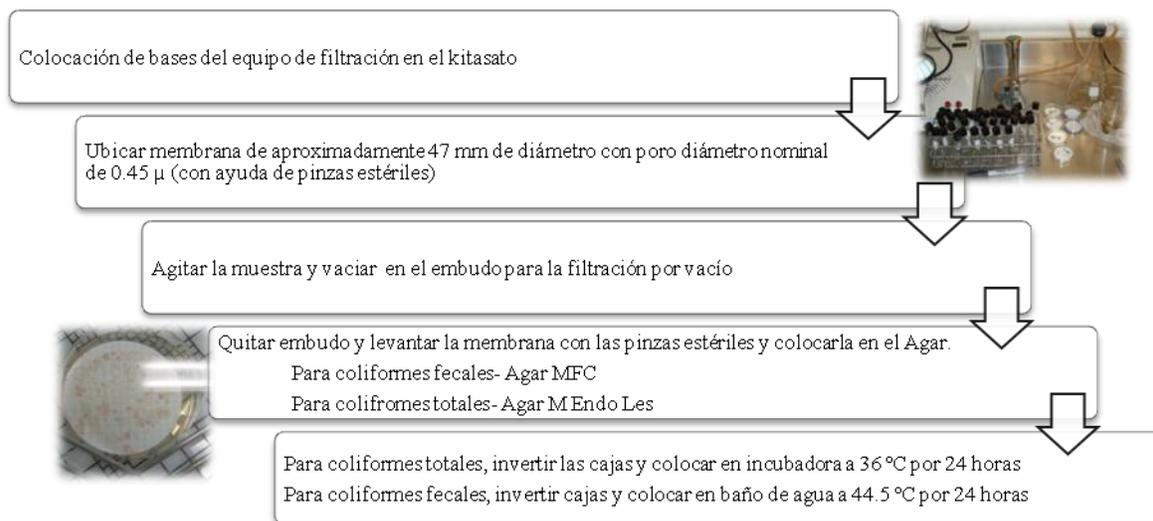
Se realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos al lixiviado: pH, salinidad (por conductividad eléctrica), metales pesados (Cd, Ni, Pb), sólidos suspendidos totales (SST), relación de absorción de sodio (RAS), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), dureza total. Todos estos análisis se basaron en la normatividad mexicana con la asistencia de un laboratorio certificado.

### 7.2.3. Análisis microbiológico

Se realizaron los siguientes análisis microbiológicos al lixiviado: determinación de coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), huevos de helmintos (HH) e identificación de microorganismos patógenos. Estos análisis se basaron en la normatividad mexicana.

El análisis microbiológico en laboratorio para la determinación de coliformes totales y coliformes fecales se basó en la norma mexicana NMX-AA-102-SCFI-2006 calidad del agua –detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva- método de filtración de membrana. Siguiendo el proceso descrito en la figura 3.

Se utilizó también esta metodología indicada en la norma para la determinación de bacterias heterotróficas; utilizando para este fin el medio de cultivo Agar Soya Tripticaseína (TSA).



**Figura 3.** Proceso del análisis microbiológico para la determinación de coliformes totales y fecales.

#### 7.2.4. Identificación de microorganismos en lixiviados

Para el aislamiento de colonias se resembró cinco veces en medio Agar de Soya Tripticaseína (TSA) para obtener un cultivo puro, se procedió al diagnóstico clínico de microorganismos positivos y/o negativos a la tinción de Gram mediante el método de coloración diferencial en frotis. Este procedimiento distingue dos tipos de células, las que retienen el colorante primario son llamadas Gram-Positivas y las que pierden el color primario y toman el color del colorante de contraste, las cuales son llamadas Gram-Negativas. Se observó cada muestra en el microscopio para determinar si se trataba de un microorganismo tipo bacilo o tipo cocos.

Para la identificación de microorganismos patógenos, los microorganismos identificados como Gram-Positivos se resembraron por sexta vez en medio Agar Sangre; después se utilizó el kit BBL Crystal identificación de bacterias Gram-Positivas; el sistema de identificación microbiana BBL Crystal está diseñado para identificar patógenos humanos clínicamente significativos, éste es un método de identificación miniaturizado empleando sustratos convencionales, fluorogénicos y cromogénicos, destinado a la identificación de



bacterias aerobias Gram-Positivas. Este kit se compone por tapas del panel de identificación Gram-Positivo BBL Crystal, bases BBL Crystal y tubos de fluido inóculo de identificación Gram-Postivo; la tapa contiene 30 sustratos deshidratados y un control de fluorescencia en la punta de dientes plásticos, la base cuenta con 30 pocillos. Cuando se alinea la tapa con la base y se cierra en su lugar, el inóculo del análisis rehidrata los sustratos secos e inician las reacciones del análisis.

Para cada distinto tipo de morfología de colonia, con técnicas asépticas se tomó una colonia utilizando un palillo estéril de madera suspendiéndola en un tubo de fluido inóculo de identificación Gram-Positivo BBL Crystal y se agitó, se vació todo el contenido del tubo de fluido inóculo dentro del área de la base BBL Crystal de manera que los 30 pocillos en el canal de la base se llenaran, se alineó la base con la tapa del panel y se cerró; se incubaron por 24 horas a 37 °C. Finalmente con ayuda del visor para paneles (fotografía 2) se examinaron los pocillos para observar cambios de color o presencia de fluorescencia como resultado de las actividades metabólicas de los microorganismos; el patrón resultante de las 30 reacciones se convierte en un número de perfil de diez dígitos el cual se utiliza para la identificación microbiana mediante el software libro de códigos BBL Crystal E/NF ID.



**Fotografía 2.** Visor para paneles BBL Crystal.



### 7.3. Pruebas ecotoxicológicas

Para las pruebas ecotoxicológicas ensayadas se utilizaron cuatro dosis de lixiviado con las siguientes concentraciones: 75, 50, 25 y 12.5 % de lixiviado; además se utilizó como solución control agua potable.

Con los resultados de cada prueba ecotoxicológica se llevó a cabo un análisis estadístico de los datos con ayuda del software estadístico MINITAB Release 14.

#### 7.3.1. Prueba ecotoxicológica de germinación de semillas

Análisis de la germinación de semillas estandarizadas y no estandarizadas utilizando lixiviados a diferentes dosis y una solución control.

Con los resultados obtenidos en las pruebas de germinación de semillas estandarizadas y no estandarizadas se llevó a cabo un análisis estadístico de los datos arrojados en cada caso, conjuntamente para un mejor análisis de resultados se recurrió a las ecuaciones 1-6.

$$TPG = \frac{NSG}{\text{No. total de semillas}} \times 100 \% \dots \text{Ecuación 1}$$

$$IG = \frac{TPG_{\text{control}} - TPG_{\text{dilución}_i}}{TPG_{\text{control}}} \times 100 \% \dots \text{Ecuación 2}$$

Para semillas estandarizadas:

$$InG = \frac{NSG_{\text{dilución}_i}}{NSG_{\text{control}}} \times \frac{EPR_{\text{dilución}_i}}{EPR_{\text{control}}} \times 100 \% \dots \text{Ecuación 4}$$

$$IC = \frac{EPR_{\text{control}} - EPR_{\text{dilución}_i}}{EPR_{\text{control}}} \times 100 \% \dots \text{Ecuación 5}$$

Para semillas no estandarizadas:

$$InG = \frac{NSG_{\text{dilución}_i}}{NSG_{\text{control}}} \times \frac{PPP_{\text{dilución}_i}}{PPP_{\text{control}}} \times 100 \% \dots \text{Ecuación 6}$$

$$IC = \frac{PPP_{\text{control}} - PPP_{\text{dilución}_i}}{PPP_{\text{control}}} \times 100 \% \dots \text{Ecuación 7}$$



Donde:

TPG.- Tasa promedio de germinación.

NSG.-Número de semillas germinadas.

IG.- Inhibición de la germinación.

InG.- Índice de germinación.

EPR.- Elongación promedio de la radícula.

IC.- Inhibición del crecimiento.

PPP.- Peso promedio de la planta.

### 7.3.1.1. Ensayo ecotoxicológico con semillas estandarizadas de lechuga (*Lactuca sativa*)

La técnica consistió en colocar un disco de papel filtro como soporte de humedad en cajas Petri, en donde se colocaron seis semillas por caja y se adicionaron 2mL de las diferentes diluciones de la muestra problema y un control hasta saturar el papel filtro evitando la formación de burbujas de aire. Las semillas se dejaron germinar en una incubadora a una temperatura de 26 °C, por un periodo de siete días (fotografía 3). Concluido el tiempo de exposición se contaron las semillas germinadas y la longitud de la radícula. Se realizaron tres repeticiones por cada dilución ensayada.



**Fotografía 3.** Preparación de cajas Petri con semillas de lechuga y su incubación

### 7.3.1.2. Ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de frijol

Se pesó cada semilla de frijol por separado, se colocó algodón y cuatro semillas en cada frasco, se saturó el algodón con las soluciones correspondientes para cada uno durante la prueba, con condiciones de iluminación directa y temperatura de 20 °C, se realizaron cuatro réplicas por solución ensayada; al término de siete días de exposición se registraron los signos de fitotoxicidad y el efecto en la germinación, finalmente se pesó cada semilla de frijol para determinar el peso ganado.



### 7.3.1.3. Ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de calabaza

Se pesó cada semilla de calabaza individualmente, en cada frasco se colocó algodón y cuatro semillas, se saturó el algodón con las soluciones correspondientes para cada uno durante la prueba, se mantuvieron con iluminación directa y temperatura de 20 °C, se efectuaron cuatro réplicas por solución ensayada; al término de siete días se registraron los signos de fitotoxicidad y se cuantificó el efecto en la germinación, así como el peso de cada semilla de calabaza para determinar el peso ganado.

### 7.3.2. Ensayo ecotoxicológico con cebolla (*Allium cepa*)

Se utilizaron bulbos de cebolla limpios y pelados, con doce réplicas para cada dilución de lixiviado ensayada y solución control, se cortaron las raíces de las cebollas y se midió su longitud así como la del tallo, los bulbos se colocaron en tubos para exposición llenos de la solución respectiva, se logró la hidratación de las raíces de cebolla, se expusieron a iluminación directa y temperatura de 20 °C, al término de siete días se midió la longitud de raíces y tallos con el fin de cuantificar la elongación en cada caso. Durante la prueba se adicionaron las respectivas soluciones ensayadas a cada tubo para tener la hidratación completa de la raíces de la cebolla. Con los datos arrojados se efectuó un análisis estadístico y se utilizó la ecuación 8 para calcular la inhibición de la elongación.

$$IE = \frac{EP_{control} - EP_{dilución_i}}{EP_{control}} \times 100 \% \dots \text{Ecuación 8}$$

Donde:

EP.- Elongación promedio.

IE.- Inhibición de la elongación.

### 7.3.3. Ensayo ecotoxicológico con rábano (*Rhapanus sativus*)

Se utilizaron rábanos frescos recién cosechados, se realizaron tres réplicas para cada dilución de lixiviado y solución control, se limpiaron y pesaron por separado, los rábanos se colocaron en tubos para exposición llenos de la solución respectiva, logrando la hidratación de sus raíces, se expusieron a iluminación directa y temperatura de 20 °C, al término de siete días se registraron los signos de toxicidad y se pesaron nuevamente con el fin de cuantificar el peso ganado. Durante la prueba se adicionaron las respectivas soluciones ensayadas a cada tubo para tener la hidratación completa de la raíces del rábano (fotografía 4). Se realizó un análisis estadístico de los datos resultantes.



**Fotografía 4.** Prueba ecotoxicológica con rábano.

#### 7.4. Cultivo de vegetales y hortalizas irrigados con lixiviados

Se cultivaron plantas que comúnmente son sembradas en zonas de cultivo cercanas a sitios de disposición final de residuos sólidos, además de ser de importancia comercial y rápido crecimiento, tales como frijol, cebollín y calabaza.

Para el cultivo de cebollín se transplantaron plántulas y para el frijol y calabaza primero se logró la germinación completa de las semillas utilizando agua potable; después estas fueron irrigadas con las cuatro respectivas diluciones de lixiviado así como con la solución control durante tres meses. Se efectuaron cuatro réplicas para cada solución ensayada.

##### 7.4.1. Análisis fisicoquímico y microbiológico del suelo empleado en los cultivos

Se efectuó un análisis fisicoquímico y microbiológico del suelo inicial y del suelo con tratamiento (aquel irrigado con solución 75 % lixiviado al término del cultivo de vegetales y hortalizas).

Con el análisis fisicoquímico para ambos suelos se determinó: metales pesados (Cd, Ni, Pb), conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico (CIC), permeabilidad. Todos estos análisis se basaron en la normatividad mexicana con la asistencia de un laboratorio certificado.

Con el análisis microbiológico se determinaron para ambos suelos: coliformes totales, coliformes fecales y bacterias heterotróficas. Estos análisis se basaron en la normatividad mexicana.



### 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 8.1. Resultados del estudio de gabinete

Se revisaron varias notas periodísticas, informes de investigación previos y artículos de divulgación científica relacionados con la problemática de infiltraciones de lixiviados, así como la normatividad mexicana correspondiente al manejo de los lixiviados en los sitios de disposición final. Los más trascendentes son los siguientes:

- En la nota informativa “Los basureros y comunidades contaminadas” del periódico La Jornada, se comunicó que en la República Mexicana las ciudades de Zapopan y El Salto, Jalisco; Tultitlán, Ecatepec y Chiconautla, Edo. de México; Ayala, Cuautla y Cuernavaca, Morelos; León, Guanajuato; Huejotzingo, Puebla; San Luis de la Paz, Guanajuato son algunos de los lugares en los que se han reportado fugas e infiltraciones de lixiviados hacia cuerpos de agua, casas-habitación y tierras de cultivo en los últimos cinco años (Bernache, 2009).
- En el artículo “Infiltración de lixiviados producidos en el basurero municipal de la ciudad de Oaxaca de Juárez, en suelos adyacentes a un cuerpo de agua” se reportó el impacto de la infiltración de lixiviados en muestras de suelo contaminado, determinando una acumulación y una carga potencialmente contaminante en los terrenos adyacentes a la laguna de captación y el escurrimiento de los mismos a un cuerpo de agua (Navarro, Belmonte y Aragón, 2006).
- En el artículo “Evaluation of the site in San Cristóbal de las Casas, Chiapas, for the final disposal of solid residues, based on official Mexican standards” (Nájera *et al.*, 2009), se reportó cómo este sitio opera como un tiradero a cielo abierto, distando mucho de las especificaciones que establece la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, destacando la inexistencia de un sistema para la conducción, almacenamiento y tratamiento de lixiviados además de un sistema de impermeabilización.
- En el artículo “Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez Chiapas” se detalla que el 95 % de los sitios de disposición final de residuos sólidos en el Estado de Chiapas, operan como tiraderos a cielo abierto sin control alguno y con afectaciones al entorno. El nulo manejo de los lixiviados constituye una práctica común en este Estado (Nájera *et al.*, 2010).
- En la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la única información acerca de los lixiviados fue la encontrada en su Artículo 97. El cual



decreta que las normas oficiales mexicanas especificarán las condiciones que deben reunir las instalaciones y los tipos de residuos que puedan disponerse en ellas, para prevenir la formación de lixiviados y la migración de éstos fuera de las celdas de confinamiento. Asimismo, plantearán en qué casos se puede permitir la formación de biogas para su aprovechamiento.

Los municipios regularán los usos del suelo de conformidad con los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano, en los cuales se considerarán las áreas en las que se establecerán los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

- En la Norma Oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, se especifica que para la operación de un sitio de disposición final de residuos sólidos debe construirse un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado en el sitio de disposición final. El lixiviado debe ser recirculado en las celdas de residuos confinados en función de los requerimientos de humedad para la descomposición de los residuos, o bien tratarlo, o una combinación de ambas. Se debe contar con un sistema específico de monitoreo ambiental de lixiviados.

Como resultado del estudio de gabinete se comprobó la gran relevancia de la problemática de la infiltración de lixiviados hacia áreas próximas al sitio de disposición final, se tuvo conocimiento de varios sucesos relacionados con el tema gracias a notas periodísticas, además de que en artículos se ha reportado y estudiado acerca de esta temática dentro de la República Mexicana, como fue el caso de San Cristóbal de las Casas, Chiapas.

La problemática más importante de la fuga de los lixiviados es la contaminación de cuerpos de agua, suelos y áreas de cultivo, además de los posibles daños en la salud de animales y trabajadores de los sitios de disposición final que entran en contacto con dichos líquidos peligrosos (fotografía 5).

Esta problemática se originó principalmente por el mal manejo de los residuos sólidos y por la falta de rellenos sanitarios eficientes que cumplan con la normatividad mexicana acerca de la captación, manejo y tratamiento de los lixiviados generados en el mismo.



**Fotografía 5.** Sitio de disposición final, San Cristóbal de las Casas, México.

## 8.2. Resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico de los lixiviados

Los resultados promedio para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las diferentes diluciones de lixiviado son los expresados en la tabla 8.

**Tabla 8.** Resultados promedio de las diferentes diluciones de lixiviado.

Parámetro	Método de información	100 %	75 %	50 %	25 %	12.5 %
<b>Fisicoquímicos</b>						
pH		8,5	8,2	8,1	8,0	8,0
Conductividad (µs/cm)	NMX-AA-093-SCFI-2000	1240	930	620	310	155
RAS (mg/L)	CÁLCULO	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3
SST (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2001	360	270	180	90	45
DQO (mg/L)	NMX-AA-030-SCFI-2001	807	605	403	201	101
DBO (mg/L)	NMX-AA-028-SCFI-2001	57	43	29	14	7
Dureza total (mg/L)	NMX-AA-072-SCFI-2001	982	736	491	245	123
Cadmio (mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2001	<0,005	<0,005	<0,003	<0,002	<0,001
Níquel (mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,26	0,19	0,13	0,07	0,03
Plomo (mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,14	0,11	0,07	0,03	0,02
<b>Microbiológicos</b>						
Coliformes totales (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006	1.5x10 <sup>4</sup>	1.2x10 <sup>4</sup>	7.8x10 <sup>3</sup>	3.8x10 <sup>3</sup>	1.9x10 <sup>3</sup>
Coliformes fecales (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006	2.0x10 <sup>3</sup>	1.6x10 <sup>3</sup>	1.0x10 <sup>3</sup>	5.0x10 <sup>2</sup>	3.0x10 <sup>2</sup>
Bacterias heterotróficas (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006	1.3x10 <sup>8</sup>	1.0x10 <sup>8</sup>	6.8x10 <sup>7</sup>	3.4x10 <sup>7</sup>	1.7x10 <sup>7</sup>
Huevos de helminto (HH /L)	NMX-AA-113-SCFI-1999	ND	ND	ND	ND	ND

N.D. No detectado



Los valores de pH, DBO, DQO, dureza total y plomo de la muestra de lixiviado (100 %) se encontraron dentro del intervalo de valores mostrados en la tabla 3.

La relación DBO/DQO establece el contenido de materia orgánica (biodegradable y recalcitrante) y el grado de estabilización del lixiviado. Se obtuvo la relación  $\frac{DBO}{DQO} = 0.07$ , al ser menor 0.1 indicó un lixiviado estabilizado con contenido de compuestos recalcitrantes, además de que se define como un lixiviado pobre en biodegradabilidad. A este tipo de lixiviado se le conoce como viejo o estabilizado.

La cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) contenidos en el lixiviado (100 %) rebasó de manera considerable el límite máximo permisible sobre la calidad de agua que se pone en contacto con cultivos agrícolas (NOM-001-ECOL-1996), esto perjudica de manera considerable a la actividad agrícola ya que los SST impiden la germinación de semillas al provocar condiciones anaeróbicas en los suelos y ocasionar un taponamiento físico del mismo, además de que ya en cultivos desarrollados altera el crecimiento normal de las plantas.

Al comparar los valores de la conductividad y de la relación de absorción de sodio (RAS) en el diagrama para la clasificación de las aguas de riego de Baudoin *et al.* (2002), (se tomó al lixiviado como supuesto agua de riego ya que con el mismo se irrigaron las plantas cultivadas), se observó que con una conductividad de 1240  $\mu\text{s}/\text{cm}$  se le atribuye una clasificación como agua de alta salinidad, la cual se describe como aquella que no puede utilizarse en suelos de escaso drenaje y debe emplearse sólo en cultivos tolerantes. De acuerdo al valor arrojado de RAS se clasificó como un agua con bajo contenido de sodio.

Al comparar los valores de conductividad del lixiviado con las normas para la interpretación de la calidad del agua de riego (Moya, 2009), se observó que la salinidad del lixiviado afectó de una manera creciente la disponibilidad de agua para las plantas; con respecto al valor de RAS no se representaría algún problema en la afectación a cultivos sensibles. En cambio con respecto al valor de pH se considera un problema agudo la afectación a cultivos susceptibles.

Los valores de metales pesados cadmio, níquel y plomo se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles para metales pesados en agua que se pone en contacto con los suelos destinados a la actividad agrícola (NOM-001-ECOL-1996).

Dentro de los análisis microbiológicos, con respecto a los huevos de helminto en lixiviado se determinó una ausencia de huevos de helminto en la muestra.



8.2.1. Resultados de la identificación de microorganismos en lixiviados

Al emplear el kit BBL Crystal sistema de identificación de bacterias Gram-Positivas, se obtuvo el número de perfil de diez dígitos para cada tipo de microorganismo aislado y al utilizar el software libro de códigos BBL Crystal E/NF ID se identificó a las bacterias presentes en la muestra de lixiviado. Las bacterias detectadas fueron *Staphylococcus equorum*, *Staphylococcus vitulus*, *Staphylococcus xylosus* y *Bacillus subtilis*, de las cuales se muestra su descripción en la figura 4.



*Staphylococcus equorum*

Hábitat natural: caballos, ganado.  
Rara especie equina de importancia patógena indeterminada.



*Staphylococcus vitulus*

Hábitat natural: derivados de la carne, mamíferos domésticos.  
Se encuentra como parte de la flora de los caballos, los ratones campestres y las ballenas piloto. También ha sido aislado a partir de productos cárneos, entre ellos cordero, pollo, carne vacuna molida y carne de ternera.



*Staphylococcus xylosus*

Hábitat natural: humanos, mamíferos, pájaros.  
Microorganismo implicado como causa de infecciones de las vías urinarias superior e inferior y de endocarditis asociada con la adicción a drogas intravenosas.



*Bacillus subtilis*

Hábitat natural: suelo, agua.  
Microorganismo que tiene la habilidad para formar una resistente endospora protectora, permitiendo al organismo tolerar condiciones ambientalmente extremas. No es considerado patógeno humano; sin embargo puede contaminar los alimentos y provocar intoxicación alimentaria en animales.

**Figura 4.** Microorganismos identificados en la muestra de lixiviados.

Fuente: Koneman *et al.*, 2001.



### 8.3. Resultados de las pruebas ecotoxicológicas

#### 8.3.1. Resultados de la prueba ecotoxicológica de germinación de semillas

Una de las etapas más importantes del desarrollo de una planta es la germinación de las semillas al emerger el primer cotiledón.

La medición de la germinación de semillas es un método muy usado para determinar la toxicidad de un compuesto ya que la presencia de sustancias tóxicas inhibe la activación de la semilla afectando así su germinación.

El ensayo con semillas permitió evaluar la fitotoxicidad de muestras con elevada turbiedad (lixiviado) de manera directa sin necesidad de filtración previa, reduciéndose así las interferencias ocasionadas por el pretratamiento y simplificando el procedimiento de prueba.

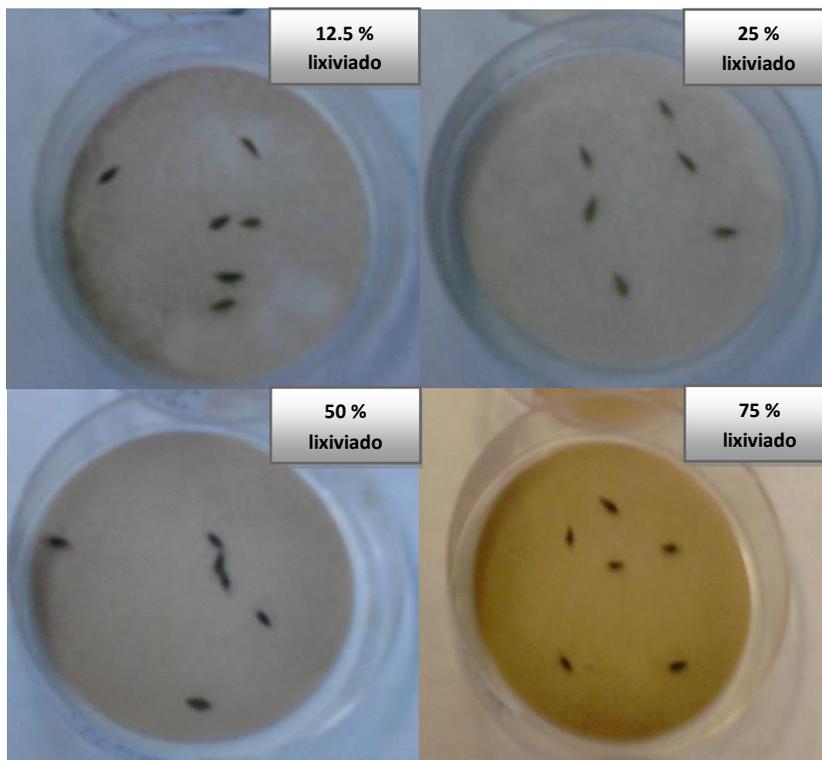
Con los resultados experimentales de las tres pruebas de germinación de semillas desarrolladas en este trabajo, la elongación promedio de la radícula para las semillas estandarizadas y el peso promedio de la planta para las semillas no estandarizadas obtenidos al término del tiempo de prueba para las cinco réplicas correspondientes a las concentraciones de lixiviado, se consiguió calcular la tasa promedio de germinación, el índice de germinación y el porcentaje de inhibición tanto de la germinación como del crecimiento de la planta, ya sea el caso.

##### 8.3.1.1. Resultados del ensayo ecotoxicológico con semillas estandarizadas de lechuga (*Lactuca sativa*)

En este ensayo se observó que las semillas expuestas a la solución control (fotografía 6) no presentaron indicios anormales de fitotoxicidad mientras que las expuestas a las cuatro distintas diluciones de lixiviado se tornaron a un color marrón oscuro (fotografía 7).



**Fotografía 6.** Muestra control al término de la prueba y medición de la radícula de la plántula



**Fotografía 7.** Cajas Petri correspondientes a las soluciones 12.5, 25, 50 y 75 % de lixiviado, al término de la prueba.

En la tabla 9 se muestra que las únicas semillas que lograron germinar fueron aquellas expuestas a la solución control, aunque sólo germinó el 50 % de semillas utilizadas en la prueba para este caso, a diferencia de las demás que fueron expuestas a soluciones de lixiviado a diferentes concentraciones, las cuales presentan un 0 % de germinación y por consecuencia, un 100 % de inhibición de la germinación así como de inhibición de la elongación de radícula.

**Tabla 9.** Resultados de la prueba de germinación de semillas estandarizadas de lechuga.

MUESTRA	RÉPLICAS (Longitud en mm)																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
CONTROL	25	2	7	NG	NG	NG	38	30	15	NG	NG	NG	29	29	13	NG	NG	NG
12.5%	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
25%	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
50%	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
75%	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG

NG.- No germinó



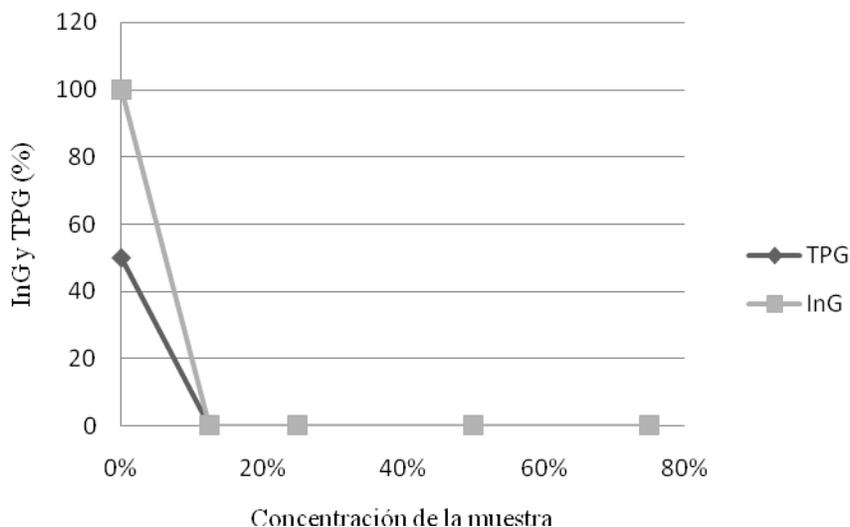
**Tabla 9.** Resultados de la prueba de germinación de semillas estandarizadas de lechuga. Continuación.

MUESTRA	EPR (mm)	TPG (%)	InG (%)	IG (%)	IC (%)
CONTROL	20.8	50	100	0	0
12.5 %	0	0	0	100	100
25 %	0	0	0	100	100
50 %	0	0	0	100	100
75 %	0	0	0	100	100

EPR.- Elongación promedio de la radícula  
TPG.- Tasa promedio de germinación  
InG.- Índice de germinación  
IG.- Inhibición de la germinación  
IC.- Inhibición del crecimiento

En la figura 5 se representa cómo la tasa promedio de germinación baja drásticamente a partir de la muestra más diluida de lixiviado (12.5 %), lo mismo pasa con el índice de germinación. Con estos resultados se puede deducir que esta prueba ecotoxicológica es muy sensible para evaluar la toxicidad de los lixiviados o muestras de agua que contengan cierta concentración de los mismos.

El efecto de los lixiviados en la germinación y elongación de raíces en semillas de lechuga, se puede atribuir a la cantidad de sales en los mismos.



**Figura 5.** Tasa promedio de germinación (TPG) e índice de germinación (InG) en la prueba con semillas estandarizadas de lechuga.



### 8.3.1.1.1. Resultados del análisis estadístico

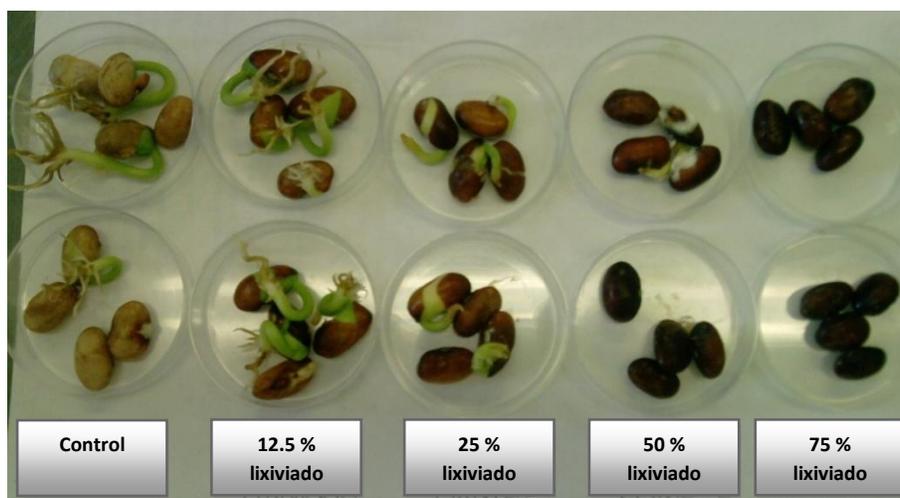
Para esta prueba ecotoxicológica no se es posible comparar estadísticamente las cinco muestras ya que sólo hubo resultados para la muestra control, la cual reporta una media muestral de 20.88 mm, con una desviación estándar de 12.09 mm y una varianza de 146.36 mm.

### 8.3.1.1.2. Resultados del ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de frijol

No se presentaron anomalías fitotoxicológicas en las semillas de frijol que se expusieron a la solución control, en cambio, las que fueron regadas con las diferentes diluciones de lixiviado mostraron cambios interesantes; las semillas de frijol expuestas a la solución 12.5 % de lixiviado, presentaron un cambio de coloración a un tono café oscuro, a las de 25 % presentaron manchas localizadas de color negro y marrón, las de 50 % y 75 % cambiaron su coloración a un tono negro y se observó desarrollo de hongos, así mismo, en dos réplicas de la solución más concentrada de lixiviado hubo formación de gusanos blancos pequeños (fotografía 8).

Como se puede observar en la tabla 10, hubo germinación con todas las soluciones aunque en diferente porcentaje, el rango del peso promedio de la planta (PPP) se encuentra de 0.6017 g a 1.0339 g.

Con respecto al PPP, se obtuvo un valor superior en el caso de la solución control comparado con las otras soluciones, sin embargo, se registra una mayor tasa promedio de germinación (TPG) para la dilución 12.5 % de lixiviado. El índice de germinación (InG) se calculó tomando como base el peso promedio de la planta y la tasa promedio de germinación en la solución control, es por ello que para la misma se obtuvo un 100 % y se observó que a medida que aumentó la concentración de lixiviado, el índice de germinación disminuyó, lo cual indica una relación dosis-respuesta (figura 6).



Fotografía 8. Semillas de frijol al término de la prueba

Tabla 10. Resultados de la prueba de germinación de semillas no estandarizadas de frijol.

MUESTRA	RÉPLICAS (Peso en g)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CONTROL	NG	1.192	NG	NG	NG	1.219	1.067	0.760	NG	1.122	0.748	NG	1.207	NG	0.845	0.966	1.077	0.646	1.250	1.336
12.5%	0.877	0.526	1.088	1.018	0.763	0.947	0.458	0.885	NG	0.934	0.653	0.747	0.924	0.646	NG	0.739	NG	1.071	NG	0.876
25%	NG	1.602	1.959	NG	0.652	0.932	NG	0.746	0.608	NG	NG	0.743	NG	NG	0.728	NG	0.520	NG	0.635	NG
50%	NG	NG	NG	NG	0.522	NG	0.747	0.597	0.684	0.478	0.547	NG	NG	0.678	NG	NG	NG	0.638	NG	0.522
75%	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	0.662	NG	0.786	NG	NG	NG						

NG.- No germinó

Tabla 10. Resultados de la prueba de germinación de semillas no estandarizadas de frijol. Continuación.

MUESTRA	PPP (g)	TPG (%)	InG (%)	IG (%)	IC (%)
CONTROL	1.0339	65	100	0	0
12.5%	0.8223	80	97.89	-23.07	20.46
25%	0.9130	50	67.92	23.07	11.69
50%	0.6017	45	40.29	30.76	41.79
75%	0.7240	10	10.77	84.61	29.97

PPP. Peso promedio de la planta  
 TPG.- Tasa promedio de germinación  
 InG.- Índice de germinación  
 IG.- Inhibición de la germinación  
 IC.- Inhibición del crecimiento

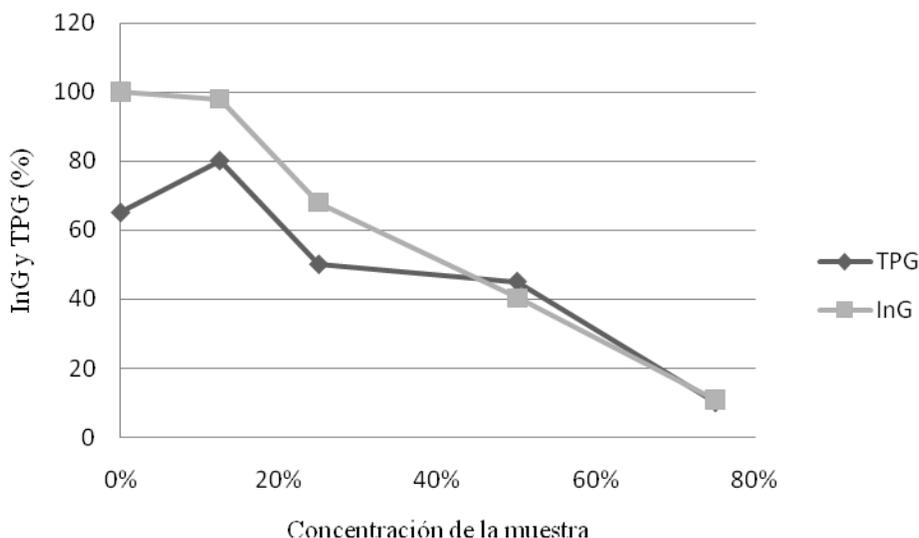


Figura 6. Tasa promedio de germinación (TPG) e índice de germinación (InG) en la prueba con semillas no estandarizadas de frijol.

8.3.1.2.1. Resultados del análisis estadístico

Para esta prueba ecotoxicológica, los valores de la media fueron muy diversos en las cinco muestras, aquella correspondiente a la solución control fue la más elevada con un resultado de 1.0339 g, se obtuvo una menor desviación estándar en las muestras de alta concentración de lixiviado (50 y 75 %).

Se presentó una superior variabilidad relativa en los datos correspondientes a la muestra 25 % de lixiviado; al comparar el coeficiente de variación de la muestras control y 75 % de lixiviado, se observó que los datos de la primera presentaron mayor variabilidad que los de la segunda, es decir, fueron más heterogéneos (tabla 11).

Tabla 11. Resultados estadísticos de la prueba con semillas no estandarizadas de frijol.

MUESTRA	MAX (g)	MIN (g)	$\bar{x}$ (g)	s (g)	$s^2$ (g)	CV (%)
CONTROL	1.336	0.646	1.0339	0.2208	0.0487	21.35
12.5%	1.088	0.458	0.8223	0.1852	0.0343	22.52
25%	1.959	0.520	0.9130	0.4776	0.2281	52.31
50%	0.747	0.478	0.6017	0.0906	0.0082	15.05
75%	0.786	0.662	0.7240	0.0876	0.0076	12.09

MAX.- Máximo, MIN.- Mínimo, CV.- Coeficiente de variación



Al tener una gran variedad de valores en todas las muestras, es factible la aplicación de un análisis de varianza (ANOVA), con el fin de comparar los diversos valores medios y determinar si alguno de ellos difiere significativamente del resto. Con los resultados obtenidos en el ANOVA (tabla 12), se calculó un valor de F ( $F_{cal}$ ), el cual se comparó con la F tabulada ( $F_{tab}$ ) con un 95 % de confianza recomendado para los análisis con bioensayos (Serrano, 2003).

**Tabla 12.** Tabla del ANOVA para la prueba con semillas no estandarizadas de frijol

FUENTE DE VARIANZA	SS	gl	MS	F
Entre muestras	1.078	4	0.269	3.76
Dentro de las muestras	3.226	45	0.072	
Total	4.304	49		

$$F_{cal} = 3.76$$

$$F_{tab} = 2.59$$

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$H_1$ : al menos dos medias poblacionales son diferentes

Se obtuvo que  $F_{cal} > F_{tab}$ , por lo que se rechazó  $H_0$  y se concluyó que existe diferencia significativa entre las medias poblacionales estudiadas, esto se afirma con el 95 % de confianza, es decir, que las medias del peso ganado de las semillas de frijol en su germinación con las cinco soluciones manejadas son distintas.

### 8.3.1.3. Resultados del ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de calabaza

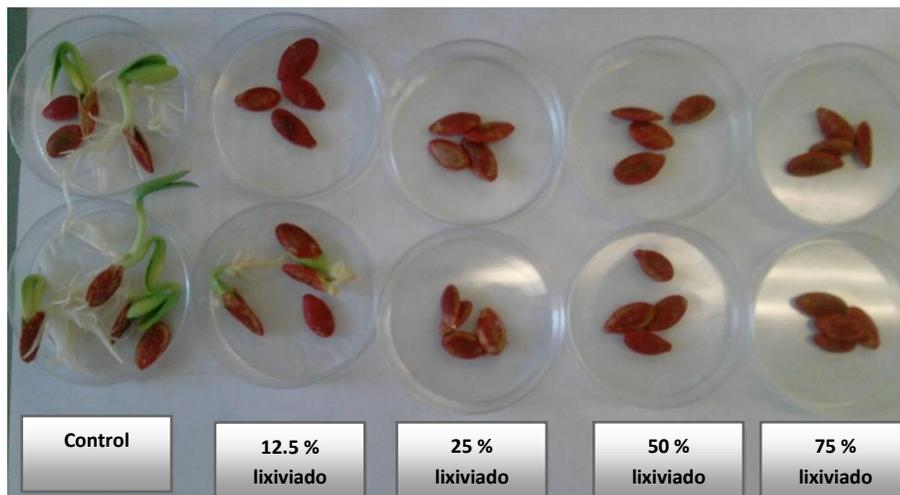
Las semillas de calabaza que fueron expuestas a la solución control no presentaron irregularidades en cuanto a fitotoxicidad; las semillas expuestas a las cuatro diferentes diluciones de lixiviado presentaron manchas localizadas color marrón (fotografía 9).

En la tabla 13 se muestra que al exponer las semillas de calabaza a concentraciones mayores a 25 % de lixiviado se obtuvo un porcentaje de germinación casi nulo. Lo que indica el grado de sensibilidad que tiene la calabaza a los agentes tóxicos presentes en el lixiviado.

El peso promedio es mayor en la dilución 12.5 % de lixiviado, pero la tasa promedio de germinación es mucho mayor en la solución control.



Tanto los valores de tasa promedio de germinación como de índice de germinación presentaron un comportamiento muy similar, ya que se muestra un decremento de sus valores al ir incrementando la concentración de lixiviado, observándose una drástica disminución a partir de la solución 25 % (figura 7).



Fotografía 9. Semillas de calabaza al término de la prueba

Tabla 13. Resultados de la prueba de germinación de semillas no estandarizadas de calabaza.

MUESTRA	RÉPLICAS (Peso en g)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CONTROL	0.242	NG	0.198	NG	1.016	0.889	0.508	0.127	NG	0.451	NG	0.369	0.289	NG	0.202	0.231	0.329	0.412	0.527	0.379
12.5%	1.493	1.0451	NG	1.194	NG	0.112	NG	NG	0.103	NG	NG	NG	0.117	0.143	NG	NG	0.161	NG	0.131	NG
25%	NG	NG	0.057	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG						
50%	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
75%	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG

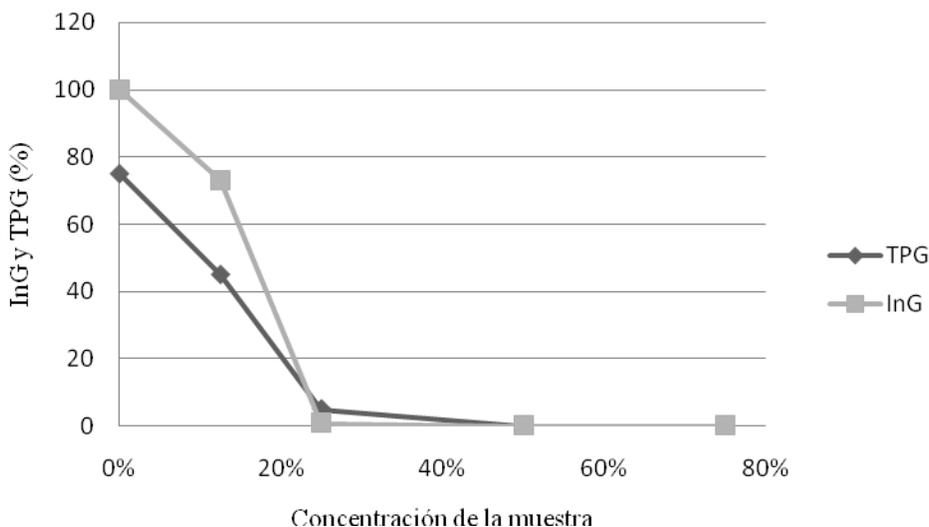
NG.- No germinó



**Tabla 13.** Resultados de la prueba de germinación de semillas no estandarizadas de calabaza. Continuación.

MUESTRA	PPP (g)	TPG (%)	InG (%)	IG (%)	IC (%)
CONTROL	0.4115	75	100	0	0
12.5%	0.5002	45	72.93	40	-21.56
25%	0.0575	5	0.93	93.33	86
50%	-	0	-	100	-
75%	-	0	-	100	-

PPP. Peso promedio de la planta, TPG.- Tasa promedio de germinación  
InG.- Índice de germinación, IG.- Inhibición de la germinación  
IC.- Inhibición del crecimiento.



**Figura 7.** Tasa promedio de germinación (TPG) e índice de germinación (InG) en la prueba con semillas no estandarizadas de calabaza.

### 8.3.1.3.1. Resultados del análisis estadístico

En la tabla 14, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de germinación de semillas de calabaza, sólo pudieron analizarse los correspondientes a la muestra control y a la dilución 12.5% de lixiviado; en la primera se muestra una media, desviación estándar y varianza mucho menor que en la segunda (tabla 14).



**Tabla 14.** Resultados estadísticos de la prueba con semillas no estandarizadas de calabaza.

MUESTRA	MAX (g)	MIN (g)	$\bar{x}$ (g)	s (g)	$s^2$ (g)	CV (%)
CONTROL	1.0164	0.1270	0.4115	0.2499	0.0624	60.72
12.5%	1.4930	0.1035	0.5002	0.5697	0.3246	113.89
25%	0.0575	0.0575	0.0575	-	-	-
50%	0	0	-	-	-	-
75%	0	0	-	-	-	-

MAX.- Máximo, MIN.- Mínimo, CV.- Coeficiente de variación

El coeficiente de variación de la muestra 12.5 % fue mucho mayor que el de la muestra control, esto indica que existió una variabilidad superior en los datos obtenidos de la germinación de semillas con la solución 12.5 %. Para esta prueba no se pudo llevar a cabo el ANOVA ya que las varianzas de las cinco poblaciones difieren significativamente.

La variabilidad de los datos de la prueba de germinación de semillas no estandarizadas en la muestra control y 12.5 % de lixiviado se comparó utilizando el coeficiente de variación, se obtuvo que:

En la muestra control, para la semilla de frijol hubo una menor variabilidad relativa de sus datos y para la semilla de calabaza se obtuvo una variabilidad mayor aun cuando su desviación estándar fue baja.

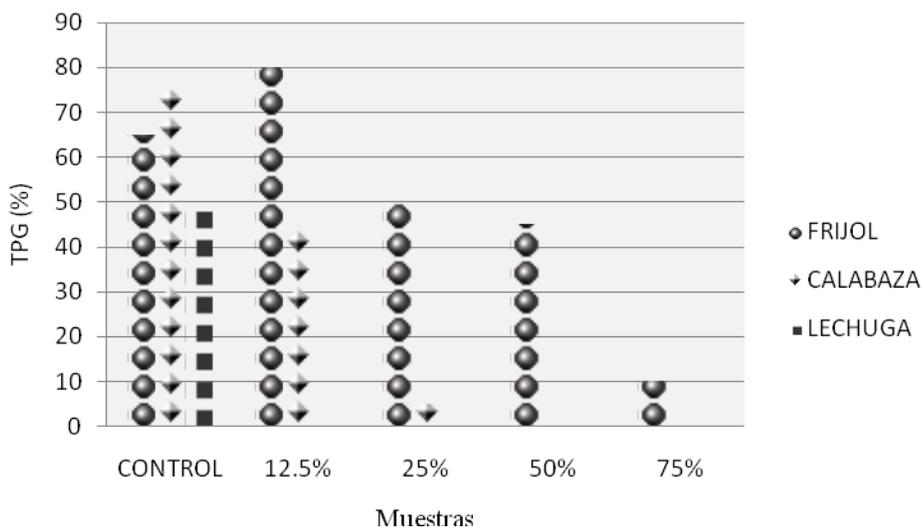
En la muestra 12.5 % de lixiviado, se observó que la semilla de calabaza se vio afectada por el lixiviado ya que su peso ganado en la germinación varió demasiado. Al tener un CV de 113.89 % se le atribuyó una alta variación de los datos, en cambio para el frijol con un CV de 22.52 % indicó una mediana variación.

Con las tres pruebas de germinación de semillas se obtuvieron resultados distintos, atribuidos a la sensibilidad del tipo de cultivo, no obstante se presentó una tendencia muy similar en los valores arrojados.

Al comparar las tasas promedio de germinación (TPG) de los tres tipos de semillas (frijol, calabaza y lechuga), se observó que existe una sensibilidad diferente para cada tipo de cultivo a los tóxicos presentes los lixiviados, por ejemplo la lechuga se podría considerar muy sensible ya que sólo presentó germinación en la solución control, siguiendo la calabaza, la cual su germinación baja considerablemente a partir de la dilución 25 % de lixiviado, en cambio el frijol se consideraría un cultivo con mayor resistencia ya que



presentó germinación en todos los casos pero a diferentes porcentajes. Para este caso, las semillas de frijol se vieron estimuladas por las propiedades del lixiviado en la dilución 12.5 % ya que presentaron una mayor germinación en esta muestra, a diferencia de los otros dos tipos de semillas en los que sus valores más altos de TPG fueron con la solución control (figura 8).



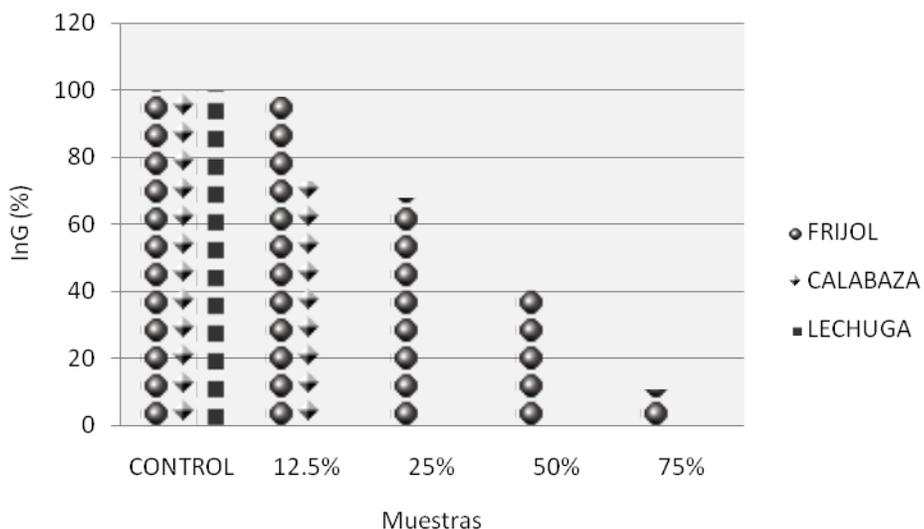
**Figura 8.** Comparación de la tasa promedio de germinación (TPG) de semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación.

Con respecto al índice de germinación (InG) se notó que con los tres tipos de semillas empleadas ya sean estandarizadas o no, se tuvo una tendencia muy marcada, ya que al incrementar la concentración de lixiviado, el InG para cada tipo de cultivo presentó un decremento considerable (figura 9); llegando a tener valores nulos para calabaza y lechuga a partir de la dilución 25 % de lixiviado.

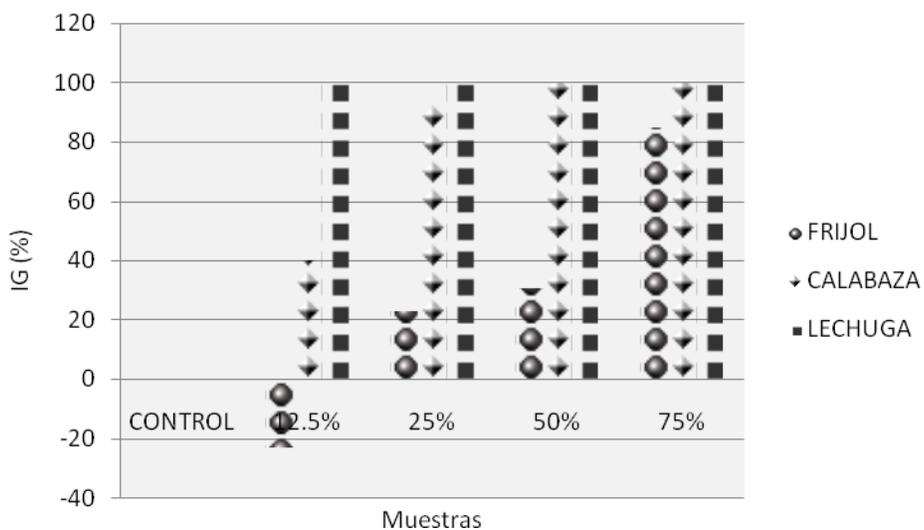
Al comparar los valores de la inhibición de la germinación (IG) en las tres pruebas de germinación de semillas se obtuvo un valor de 0 % para las muestras control ya que se tomaron los resultados obtenidos en estas muestras para obtener este índice.

Para el frijol en la dilución 12.5 %, el porcentaje de IG fue un valor negativo, esto se debió a que para esta muestra no se presentó inhibición sino una estimulación de la semilla para que lograra germinar, pero a concentraciones mayores que esta ya se presentó un aumento gradual de la inhibición de germinación (figura 10).

El lixiviado a concentraciones mayores de 12.5 % se consideraría tóxico para la germinación de los cultivos de calabaza y lechuga.



**Figura 9.** Comparación del índice de germinación (InG) de semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación.



**Figura 10.** Comparación de la inhibición de la germinación (IG) de semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación.

### 8.3.2. Resultados del ensayo ecotoxicológico con cebolla (*Allium cepa*)

Con esta prueba se observó la inhibición del crecimiento promedio de raíces así como la elongación del tallo, al ser expuesta la especie *Allium cepa* a un proceso de hidratación utilizando lixiviados a diferentes dosis y una solución control.

#### 8.3.2.1. Resultados del ensayo de elongación de las raíces

Surgieron raíces nuevas en las cebollas expuestas a la solución control y también en las correspondientes a la solución 12.5 % de lixiviado aunque este efecto fue casi nulo en este caso (fotografía 10). En la tabla 15 se exponen los resultados obtenidos en esta prueba, la elongación de las raíces fue muy notable en la solución control llegando a registrarse una EP de 7.8 cm, pero no es el caso de las otras cuatro muestras. Para las cebollas hidratadas con soluciones de lixiviado mayores a 25 %, se obtuvo un porcentaje de inhibición del 100 % (figura 11); indicando con esto una fuerte sensibilidad de la cebolla para el crecimiento de raíces al ser expuesta a los agentes tóxicos presentes en el lixiviado.



**Fotografía 10.** Elongación de las raíces de cebolla al término de la prueba.

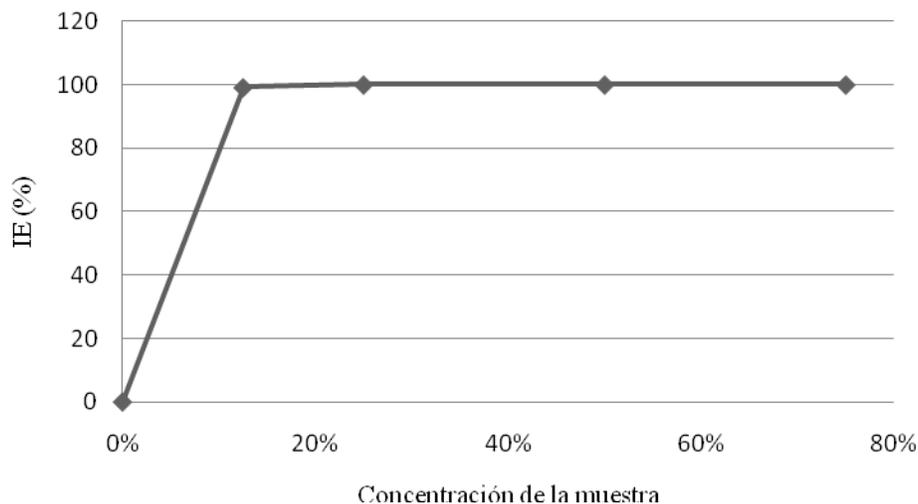


**Tabla 15.** Resultados de la prueba de inhibición del crecimiento promedio de raíces de *Allium cepa*.

MUESTRA	RÉPLICAS (Longitud en cm)												EP (cm)	IE (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
CONTROL	3.2	3.5	4.0	17	16.5	16.4	6.5	4.2	5.1	8.4	4.7	4.1	7.8	0
12.5 %	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0.2	0	0	0.2	0	0.1	0.06	99.14
25 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
50 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
75 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

EP.- Elongación promedio

IE.- Inhibición de la elongación



**Figura 11.** Inhibición de la elongación (IE) de las raíces de cebolla.

#### 8.3.2.1.1. Resultados del análisis estadístico

Los resultados estadísticos de esta prueba se reportan en la tabla 16, donde se observa que las únicas muestras que arrojaron valores fueron la control y la correspondiente a la dilución 12.5 % de lixiviado. Mostrando una media notablemente diferente entre ambas. Evidentemente la muestra con mejores resultados fue la correspondiente a la control con una media de 7.80 cm y una mediana variación de sus valores por su coeficiente de variación de 70.64 %.



Al poseer tan escasos datos y valores de varianza que difieren significativamente entre los mismos, no se encuentra necesario la aplicación de un análisis de varianza para las cinco muestras.

**Tabla 16.** Resultados estadísticos de la prueba de elongación de las raíces de cebolla.

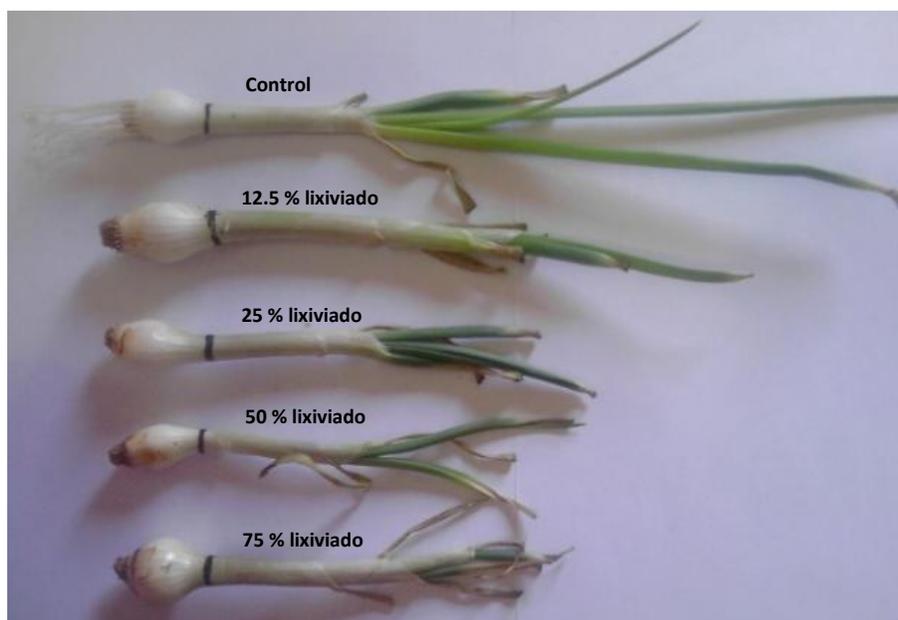
MUESTRA	MAX (cm)	MIN (cm)	$\bar{x}$ (cm)	s (cm)	$s^2$ (cm)	CV (%)
CONTROL	17.0	3.2	7.80	5.5101	30.3618	70.64
12.5%	0.2	0	0.06	0.0778	0.0060	129.66
25%	0	0	0	0	0	-
50%	0	0	0	0	0	-
75%	0	0	0	0	0	-

MAX.- Máximo, MIN.- Mínimo, CV.- Coeficiente de variación.

### 8.3.2.2. Resultados del ensayo de elongación del tallo

En esta prueba se observó que hubo un alargamiento muy evidente del tallo de las cebollas expuestas a la solución control, mientras que este efecto fue notoriamente menor en aquellas expuestas a las soluciones de lixiviado, además de que se presentó necrosis en los extremos de los tallos de las mismas (fotografía 11). Estas observaciones se ven plasmadas en la tabla 17 donde se muestra la longitud alcanzada de los tallos por cada réplica expuesta a las soluciones control y de lixiviado. Además se notó que la elongación promedio del tallo para cada muestra no sigue una tendencia con respecto a la cantidad de lixiviado contenido.

La inhibición de la elongación para cada muestra fue calculada tomando como base la elongación promedio del tallo de la muestra control. En la figura 12 observamos que en las cuatro muestras con diferentes concentraciones de lixiviado presentaron un porcentaje de inhibición de la elongación del tallo mayor del 60 %, pero no siguieron una tendencia con respecto a la concentración de las muestras, ya que el valor de inhibición de la elongación varió en cada una de ellas.



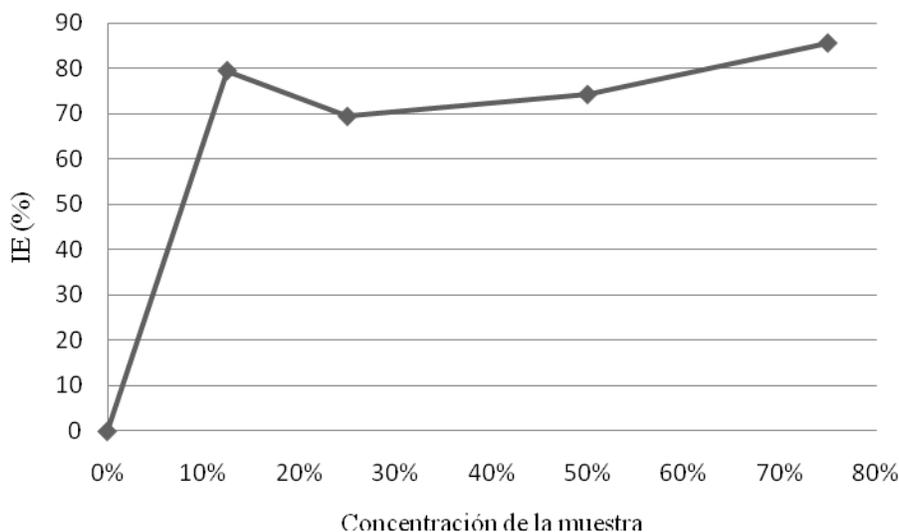
**Fotografía 11.** Cebollas al termino del tiempo de exposición a las soluciones de ensayo.

**Tabla 17.** Resultados de la prueba de elongación del tallo de *Allium cepa*.

MUESTRA	RÉPLICAS (Longitud en cm)												EP (cm)	IE (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
CONTROL	6.8	5	8.6	9.8	9.5	14	17.4	16.3	18.8	18.1	9.8	9.1	11.93	0
12.5 %	0.1	0.5	1	0	2.5	4.1	2.4	1.6	2.9	2.9	8.5	3	2.45	79.39
25 %	1	2.9	0.5	7.5	4.1	11.3	1.6	3.2	2	1.4	5.5	2.9	3.65	69.34
50 %	3.4	4.1	0.5	13	1.4	2.7	0	2.2	1.4	3.4	2.2	2.7	3.08	74.16
75 %	1.1	2.6	1	0	2.7	0.3	3.3	1.1	0.9	2.1	2.5	3.2	1.73	85.47

EP.- Elongación promedio

IE.- Inhibición de la elongación



**Figura 12.** Inhibición de la elongación (IE) del tallo de cebolla.

8.3.2.2.1. Resultados del análisis estadístico

A diferencia de la prueba de elongación de raíces, la prueba de elongación del tallo de cebolla arrojó gran cantidad de valores para las cinco muestras, es decir que hubo elongación del tallo de la cebolla al ser expuestas a las cinco soluciones.

En la tabla 18, se expresa que la muestra control es la que tuvo una media mucho mayor con un valor de 11.9 cm, mientras que las demás medias se encontraron en el rango de 1.7 a 3.6 cm. Se observó una mayor variabilidad en los datos de la muestra 12.5 % de lixiviado aun cuando su desviación estándar es menor. Las desviaciones estándar fueron relativamente grandes para las cuatro primeras muestras.

**Tabla 18.** Resultados estadísticos de la prueba de elongación del tallo de cebolla.

MUESTRA	MAX (cm)	MIN (cm)	$\bar{x}$ (cm)	s (cm)	$s^2$ (cm)	CV (%)
CONTROL	18.8	5.0	11.9333	4.7384	22.4533	39.70
12.5 %	8.5	0	2.4583	2.2999	5.2899	93.55
25 %	11.3	0.5	3.6583	3.1221	9.7481	85.34
50 %	13	0	3.0833	3.3476	11.2069	108.57
75 %	3.3	0	1.7333	1.1324	1.2824	65.33

MAX.- Máximo, MIN.- Mínimo, CV.- Coeficiente de variación



Con respecto al análisis de varianza (tabla 19) se obtuvo que  $F_{cal} > F_{tab}$ , por lo que se rechazó  $H_0$ , esto indicó que al menos dos medias son distintas, es decir, los valores de las medias de la elongación del tallo de cebolla difiere significativamente con respecto a las soluciones de lixiviado estudiadas.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$H_1$ : al menos dos medias poblacionales son diferentes

**Tabla 19.** Tabla del ANOVA de la prueba de elongación del tallo de cebolla.

FUENTE DE VARIANZA	SS	gl	MS	F
Entre muestras	837.189	4	209.297	20.93
Dentro de las muestras	549.788	55	9.996	
Total	1386.977	59		

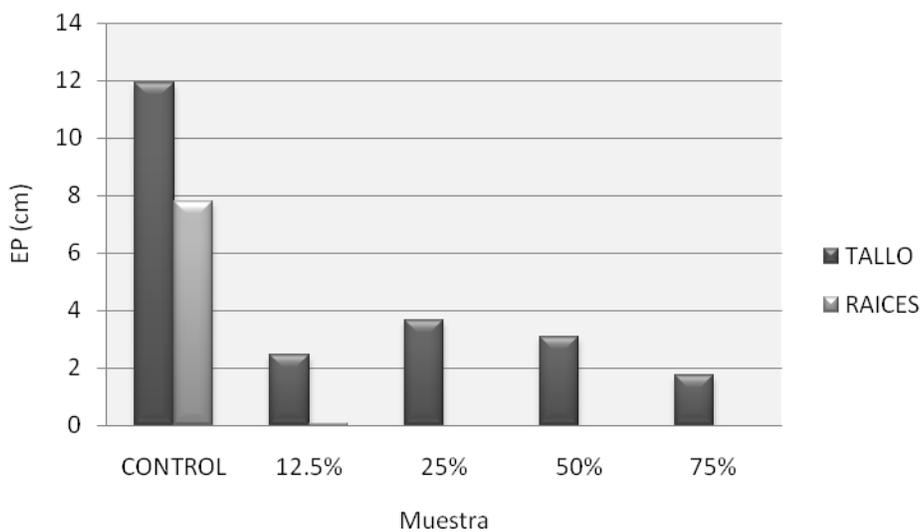
$$F_{cal} = 20.93$$

$$F_{tab} = F_{5\% (4,55)} = 2.55$$

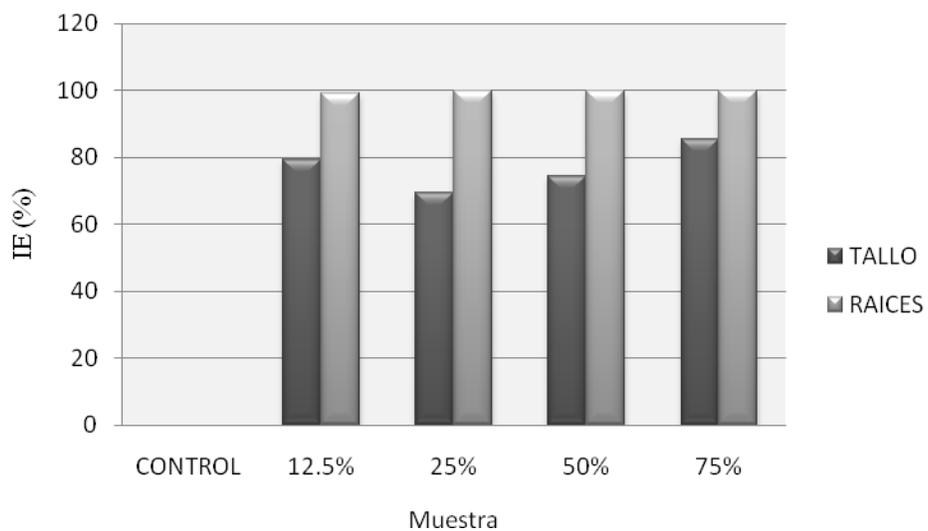
Con respecto a la medición de la elongación promedio de tallo y raíces de cebolla, se obtuvieron mejores resultados en el crecimiento del tallo ya que en todas las soluciones se presentó elongación; a partir de la solución 25 %, a medida que aumentó la concentración de lixiviado en la muestra, disminuyó la elongación del tallo (figura 13).

Al comparar los resultados de la inhibición de elongación (IE) del tallo y de las raíces de cebolla (figura 14) se observó que las raíces fueron demasiado sensibles a la exposición de las concentraciones manejadas en esta prueba. Los tallos por otro lado, para las muestras con lixiviado mostraron una IE en el rango de 60 a 90 %, teniendo como al menor porcentaje el correspondiente a la dilución 25 % de lixiviado.

Se observó mediante la comparación del coeficiente de variación de la prueba con la especie *Allium cepa* que para la elongación del tallo se presentó una mayor homogeneidad de sus datos que para la elongación de las raíces.



**Figura 13.** Comparación de la elongación promedio (EP) de raíces y tallo de cebolla.

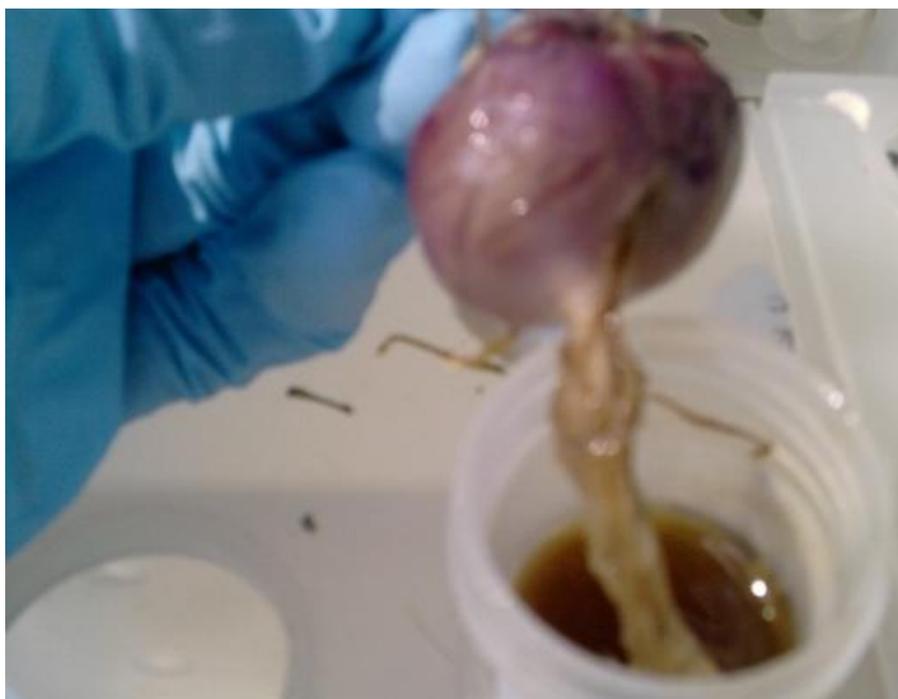


**Figura 14.** Comparación de la inhibición de la elongación (IE) de raíces y tallo de cebolla.



### 8.3.3. Resultados del ensayo ecotoxicológico con rábano (*Rhapanus sativus*)

Al finalizar la prueba, los rábanos expuestos a la solución control y 12.5 % lixiviado aparentemente conservaron su tamaño inicial, mientras que los expuestos a las demás soluciones, se mostraron de menor tamaño, con una consistencia blanda y con presencia de rugosidades (fotografías 12 y 13).



**Fotografía 12.** Daño del rábano en la zona con contacto directo de la solución 50 % lixiviado



**Fotografía 13.** Rábanos al final del tiempo de exposición a las diferentes soluciones

En la tabla 20 se observan los resultados obtenidos en esta prueba, se nota la significativa disminución en el peso promedio de la planta en las cinco muestras; donde la muestra correspondiente a la dilución 12.5 % tiene una menor disminución del peso promedio.

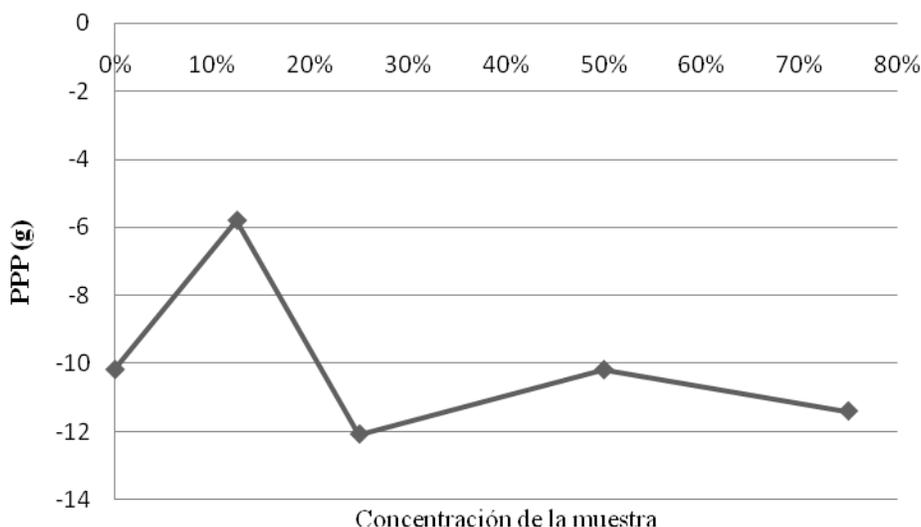
Al graficar el peso promedio de la planta vs la concentración de la muestra, se observó que no existe una tendencia definida en cuanto al comportamiento del gráfico (figura 15).



**Tabla 20.** Resultados de la prueba de ecotoxicológica con rábano.

MUESTRA	RÉPLICAS (Peso en g)			PPP (g)
	1	2	3	
CONTROL	-15.4376	-9.6706	-5.4395	-10.1825
12.5 %	-7.1144	-7.6909	-2.5592	-5.7881
25 %	-18.1928	-8.1723	-9.8846	-12.0832
50 %	-5.4859	-12.0549	-13.0181	-10.1863
75 %	-13.4992	-13.837	-6.8716	-11.4026

PPP.- Peso promedio de la planta



**Figura 15.** Peso promedio de la planta (PPP) en la prueba ecotoxicológica con rábano.

Con esta prueba se esperaba la ganancia de peso en los rábanos, pero se obtuvo totalmente lo opuesto, quizás por una deficiencia en las raíces de los rábanos lo cual impidió la hidratación completa de los mismos o la falta de sustrato (tal vez necesario para este caso). Al analizar los resultados en esta prueba se concluyó que no es un buen ensayo para evaluar la ecotoxicidad en muestras ambientales.

### 8.3.3.1. Resultados del análisis estadístico

En este ensayo se obtuvieron valores negativos en la media ya que se reportaron valores correspondientes a la pérdida de peso en los rábanos, se observa una menor media en la



muestra correspondiente a la dilución 12.5 %, teniendo en la misma una menor desviación estándar aunque además el valor más elevado de varianza (tabla 21).

**Tabla 21.** Resultados estadísticos de la prueba ecotoxicológica con rábano.

MUESTRA	MAX (g)	MIN (g)	$\bar{x}$ (g)	s (g)	$s^2$ (g)
CONTROL	-5.4395	-15.4376	-10.1825	5.0186	25.1870
12.5%	-2.5592	-7.6909	-5.7881	2.8111	7.9027
25%	-8.1723	-18.1928	-12.0832	5.3598	28.7280
50%	-5.4859	-13.0181	-10.1863	4.0990	16.8022
75%	-6.8716	-13.8370	-11.4026	3.9275	15.4259

MAX.- Máximo, MIN.- Mínimo.

#### 8.4. Resultados del cultivo de vegetales y hortalizas irrigados con lixiviados

Como resultado de la exposición de las plantas a los lixiviados y sus diluciones se obtuvo lo siguiente:

- Cultivo de Cebollín

Las observaciones acerca del cultivo de cebollín son las descritas en la figura 16.

##### Control

- Buen crecimiento del tallo de la cebollas, surgimiento de nuevos tallos. Manteniéndose verdes en su totalidad (fotografía 14)

##### 12.5% Lixiviado

- Crecimiento regular del tallo de la cebollas, surgimiento de nuevos tallos. Manteniéndose verdes en su totalidad (fotografía 15)

##### 25% Lixiviado

- Escaso crecimiento del tallo de la cebollas, surgimiento de nuevos tallos, aunque se presento marchitamiento de las extremidades de los mismos (fotografía 15).

##### 50% Lixiviado

- Crecimiento mínimo del tallo y marchitamiento del mismo (fotografía 16).

##### 75% Lixiviado

- Crecimiento mínimo del tallo y marchitamiento del mismo (fotografía 16).

**Figura 16.** Observaciones acerca del cultivo de cebollín.



Se desenterraron los cebollines para poder observar las modificaciones en el crecimiento de sus bulbos y raíces. En la fotografía 17 se observa claramente cómo a medida que aumentó la concentración de lixiviado, la longitud de los tallos y raíces disminuyeron significativamente. Se observó una grave afectación en el desarrollo de los cebollines que se irrigaron con las soluciones 50 y 75 % de lixiviado.



**Fotografía 14.** Cebollines regados con la solución control.



**Fotografía 15.** Cebollines regados con las soluciones 12.5 y 25 % lixiviado.



**Fotografía 16.** Cebollines regados con las soluciones 50 y 75% lixiviado.



**Fotografía 17.** Cebollines regados con diferentes diluciones de muestra y control.



- Cultivo de Frijol

Conforme aumentó la concentración de lixiviado, el crecimiento de las plantas irrigadas respectivamente con dichas soluciones, fue en decremento (fotografía 18). Sólo presentaron floración y desarrollo de la vaina de frijol aquellas plantas regadas con la solución control y la solución 12.5 % lixiviado (fotografía 19). Mientras que aquellas expuestas a las soluciones 50 % y 75 % lixiviado se marchitaron (fotografía 20).



**Fotografía 18.** Matas de frijol regadas con diferentes diluciones de muestra y control.





**Fotografía 19.** Vaina de frijol de las plantas regadas con solución control y 12.5 % lixiviado respectivamente.



**Fotografía 20.** Plantas de frijol regadas con soluciones 75, 50, 25 % lixiviado.

- Cultivo de Calabaza

Se presentó necrosis en las hojas que estuvieron en contacto con las soluciones 25, 50 y 75 % lixiviado (fotografía 21). Sólo presentó floración aquella regada con la solución control (fotografía 22), mientras que las plantas irrigadas con las soluciones 50 y 75 % lixiviado se marchitaron rápidamente (fotografía 23).



**Fotografía 21.** Daño en hojas de calabaza regada con solución 50 y 75 % lixiviado.



**Fotografía 22.** Mata de calabaza regada con solución control.



**Fotografía 23.** Mata de calabaza regada con solución 75 % lixiviado.

#### 8.4.1. Resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico del suelo empleado en los cultivos

Los resultados promedio para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los dos suelos, el suelo inicial y el suelo con tratamiento (aquel regado con lixiviado al 75 %) son los expresados en la tabla 22.

**Tabla 22.** Resultados promedio de los suelos.

Parámetro	Método de información	Suelo inicial	Suelo con tratamiento
<b>Fisicoquímicos:</b>			
Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	AS-02-NOM-021	1320	1810
CIC ( $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ )	AS-12-NOM-021	99	33
Permeabilidad ( $\text{cm}/\text{h}$ )	AS-03 y 04-NOM-021	18,5	12,0
Cadmio ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	AS-14-NOM-021	<0,010	<0,010
Níquel ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	AS-14-NOM-021	<0,05	<0,05
Plomo ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	AS-14-NOM-021	18,30	42,00
<b>Microbiológicos:</b>			
Coliformes totales (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^3$
Coliformes fecales (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006	$3 \times 10^4$	ND
Bacterias heterotróficas (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006	$2.01 \times 10^{10}$	$1.6 \times 10^{10}$

N.D. No detectado



De acuerdo con los resultados de capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede clasificar la fertilidad de cada suelo (Fernández *et al.*, 2006). Al suelo inicial con un CIC de 99 cmol (+)/kg le corresponde una fertilidad “muy alta”, mientras que al suelo con tratamiento con un CIC de 33 cmol se clasifica como de fertilidad “alta”. Observando así que la fertilidad del suelo disminuyó en cierto grado al ser invadido con lixiviados.

Con respecto a permeabilidad, para ambos suelos el coeficiente de permeabilidad corresponde a un grado de permeabilidad “medio” (Graux, 1975), aunque el coeficiente de permeabilidad para el suelo con tratamiento aumentó, a esto se le atribuye el contenido de SST en los lixiviados, los cuales provocaron un taponamiento físico del suelo.

De acuerdo con Moya (2009) en su cuadro sobre los efectos sobre el cultivo de la presencia de sales en el suelo; para el suelo inicial con una conductividad de 1320  $\mu\text{s}/\text{cm}$  no existe problema alguno con respecto a los cultivos, al igual que el suelo con tratamiento con una conductividad de 1810  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , aunque este valor se acercó demasiado al rango en el cual representa una reducción en la cosecha a plantas sensibles.

La lechuga, la cebolla, el frijol (plantas utilizadas en la experimentación) se consideraron como cultivos sensibles a la salinidad del suelo (Barioglio, 2006), la salinidad reduce el crecimiento y la fotosíntesis de las especies sensibles.

Al utilizar la figura de Arnon (1980) donde se representan las relaciones generales entre la producción de cultivos y la salinidad del suelo, se observó que para el cultivo de plantas sensibles, tomando en cuenta la salinidad del suelo, al suelo inicial le correspondería un 75 % de la producción del cultivo, mientras que al suelo con tratamiento un 68 %.

Con respecto a la determinación de metales pesados (Cd, Ni y Pb) se observó que de acuerdo a los elementos cadmio y níquel se encontraron en concentraciones por debajo de los límites permisibles, además de que se mantuvo constante su valor en suelo inicial y después de haber sido irrigado con lixiviado. A diferencia que con el plomo el cual aumentó su valor, al reportarse una cantidad de 18,30 mg/kg en el suelo inicial y 42,00 mg/kg en el suelo con tratamiento. La concentración de plomo en el suelo con tratamiento, según los estándares de evaluación para suelos contaminados por metales pesados, se encontró dentro del límite superior de concentración frecuente de metales pesados en suelos (Prieto-Méndez *et al.*, 2009).

Se atribuye que no hubo aumento en la concentración de níquel a que el tiempo de irrigación con lixiviado sólo fueron tres meses; ya que se han reportado (Prieto-Méndez *et al.*, 2009) sólo tendencias crecientes en las concentraciones de metales en suelo por efecto en el tiempo (años) de uso de agua contaminada, donde las cantidades de metal que se extraen y se miden en estos suelos, se han asociado positivamente con el tiempo de uso de agua residual; mostrando una mayor tasa de acumulación al Ni y Pb.



### 9. CONCLUSIONES

Del análisis de la información de gabinete se concluye que la afectación de la infiltración de lixiviados que llega a los cultivos es superior a lo que se consideraba inicialmente, además de que se justificó la relevancia de la problemática en México ocasionada por la infiltración de lixiviados en áreas agrícolas próximas a sitios de disposición final.

La caracterización de los lixiviados permitió clasificar al lixiviado como estabilizado con contenido de compuestos recalcitrantes y pobre en biodegradabilidad; su concentración de sólidos suspendidos totales tal como se observó en esta investigación provoca condiciones anaeróbicas en los suelos y por consecuencia la inhibición de la germinación de semillas y la alteración del crecimiento normal en las plantas. Con las pruebas microbiológicas se logró identificar las bacterias presentes en los lixiviados.

Los ensayos ecotoxicológicos estudiados mostraron que, a partir de las soluciones de 25 % lixiviado entre más se incrementó la concentración de lixiviados mayores efectos negativos se observaron en los bioindicadores utilizados. En las pruebas de germinación de semillas, *Lactuca sativa* fue la especie más sensible a la presencia del lixiviado, mientras que con las semillas no estandarizadas (frijol y calabaza) se presentó inhibición en su germinación con soluciones superiores a 25 % de lixiviado.

Con respecto al ensayo con cebolla (*Allium cepa*), sólo se presentó elongación en las raíces expuestas a la solución control. Para la elongación del tallo, se notó una considerable elongación promedio en la muestra control a partir de la solución al 25 % a medida que aumentó la concentración de lixiviado en la muestra, disminuyó su elongación.

El rábano (*Rhapanus sativus*) no respondió como un buen indicador para poder evaluar la ecotoxicidad del lixiviado, ya que con todas las soluciones se observó pérdida de peso sin alguna tendencia definida.

El crecimiento de las plantas (frijol, calabaza y cebollín) se vio afectado por la presencia de concentraciones mayores a 25 % lixiviado, su desarrollo se inhibió conforme aumentó el contenido de lixiviado en las muestras. El cebollín fue un excelente indicador de toxicidad y por ello se recomienda utilizar como planta estandarizada para ser empleada en este tipo de pruebas.

Referente a las pruebas fisicoquímicas del suelo inicial y con tratamiento, se observó que las propiedades del suelo se perdieron al ser invadido con los lixiviados, su fertilidad disminuyó, su porcentaje de producción del cultivo bajó, su salinidad se elevó, la permeabilidad del suelo se vio afectada por los sólidos suspendidos totales contenidos en los lixiviados ya que ocasionaron un taponamiento físico al mismo.



### 10. RECOMENDACIONES

Algunas recomendaciones para trabajos posteriores a realizarse a partir de este estudio son:

Para validar las técnicas ecotoxicológicas propuestas, evaluar otros tipos de lixiviado ya sea de un relleno sanitario distinto al estudiado y diferentes concentraciones del mismo.

Incorporar nuevas pruebas ecotoxicológicas utilizando diferentes bioindicadores que permitan comprobar las respuestas de los organismos a los agentes contaminantes presentes en lixiviados, aunando también estudios fisicoquímicos para lograr la adopción de políticas adecuadas para la captación y manejo de los lixiviados generados a sitios de disposición final de residuos sólidos y así evitar afectaciones en el medio ambiente.

**11. BIBLIOGRAFÍA**

- Alfaro G. (2009). *El relleno sanitario de Huejotzingo ya contaminó mantos freáticos: Montemayor*<http://www1.lajornadadeoriente.com.mx/2009/10/08/puebla/ec1109.php> (27 Agosto 2010)
- APHA, AWWA. (1995). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., WPCF, New York.
- Archambault D.J., Slaski J.J., Li X., Winterhalder K. (2004). *Una prueba biológica rápida, sensible, basada en semillero para la determinación de la toxicidad de substratos sólidos y líquidos y de la tolerancia de la planta*. Canadá. *Soil&SedimentContamination*, 13: 53-63 (versión traducida).
- Arnon I. (1980) *Factores agrícolas en planificación y desarrollo regional*. Editorial IICA. San José, Costa Rica. Pág. 135-138.
- Barioglio C. F. (2006). *Diccionario de las ciencias agropecuarias*. Encuentro Grupo Editor. Córdoba Argentina. Pág. 446.
- Baudoin W., Grafiadellis M., Jiménez R., La Malfa G., Martínez García P.F., Monteiro A.A., Nisen A., Verlodt H., de Villele O., Von Zabeltitz Ch., Garnaud J.C. (2000). *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Estudio FAO producción y protección vegetal 90. Roma. Pág. 167-169.
- Bernache Pérez G. (2009). “*Los basureros y comunidades contaminadas*”, La Jornada Ecológica. 1 de Junio 2009, Número Especial. 27 de Septiembre 2010.
- Bohórquez-Echeverry P., Campos-Pinilla C. *Evaluación de Lactuca sativa y Selenastrum capricornutum como indicadores de toxicidad en aguas*. Universitas Scientiarum Revista de la Facultad de Ciencias, vol. 12 No 2, Pág. 83-98. Bogotá, Colombia.
- Cantú Martínez P. C. “*Toxicología Nociones generales*”. Revista Salud Pública y Nutrición. <http://www.respyn.uanl.mx> Vol1 No.2, Abril-Junio 2000. (04 de Octubre 2010).
- Capó Martí M. A. (2007). *Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. Editorial Tébar, S.L. Madrid
- Castillo Morales G. (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones*. México.



- Connell D., Lam P., Richardson B. and Wu R. (1999). *Introduction to Ecotoxicology*. Blackwell Science Ltd.
- Fernández L. C., Rojas N. G., Roldán T. G., Ramírez M. E., Zegarra H. G., Uribe R., Reyes Romeo Jesús, Flores David, Arce Juan Manuel (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. México D.F.
- Ferreira J. A., Mannarino C. F., Bila D. M., Ritter E. (2009). *Ecotoxicological test for assessment of combined treatment of urban solid waste leachate in a sewage treatment plant*. Proceedings Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5-6
- Gómez Ramos J. M., Nájera Aguilar H., Rojas Valencia M. N., Gracia Lara C., Gutiérrez Hernández R. (2010). *Manejo de biogas y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general*. LACANDONIA Revista de Ciencias de la Universidad de Ciencia y Artes de Chiapas. Año 4, vol.4, núm.2 diciembre 2010.
- Graux D. (1975). *Fundamentos de mecánica de suelo, proyecto de muros y cimentaciones*. Segunda edición. Editores técnicos asociados S. A. Barcelona.
- INEGI, 2010. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Relleno sanitario por entidad federativa.
- Jiménez Cisneros B. E. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C. Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA.
- Konema E. W., Allen S. D., Janda W. M., Schreckenberger P. C., Winn W. C. (2001). *Diagnóstico microbiológico, texto y atlas color*. 5ta. Edición. Editorial médica panamericana.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Última reforma publicada DOF 19-06-2007.
- Lopes, J., y Peralta, P. (2005). *Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates*. Journal of Hazardous Materials. B123.
- Luna, Y., Otal, E., Vilches, L., Vale, J., Querol, X., Fernández, C. (2007). *Use of zeolitised fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study*. Waste Management. 27. 1877-1883.
- Manahan S. *Introducción a la química ambiental* (2007). Reverté ediciones, S. A. de C.V. México D.F., Pág. 295-297, 644-648



- Maya (2010) *Denuncian emergencia en Loma de Mejía por contaminación de lixiviados* <http://www.lajornadamorelos.com/noticias/sociedad-y-justicia/88353-denuncian-emergencia-en-loma-de-mejia-por-contaminacion-de-lixiviados>(18 Agosto 2010)
- Mendenhall W. (1982). *Introducción a la probabilidad y la estadística*. Quinta edición. Wadsworth Inc. E.E.U.U.
- Moya Talens J. A. (2009). *Riego localizado y fertirrigación*. Cuarta edición. Ediciones Mundi-Prensa. Pág. 55-57
- Nájera Aguilar H., Castañón H., Figueroa A., Rojas Valencia M. N. (2010). *Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. 3er Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos. UAM Azcapotzalco, México D.F. 11º Foro de Ingeniería Ambiental.
- Nájera, H., Vera P., Rojas Valencia M. (2009). *Evaluation of the site in SanCristóbal de las Casas, Chiapas, for the final disposal of solid residues, based on officialmexican standards*. Sardinia Symposium.XII International Waste Management and Landfill Symposium.Sardinia Italy.
- Navarro (2010). *Pobladores afectados por lixiviados de Picachos exigen audiencia con Vielma*<http://www.informador.com.mx/jalisco/2010/216458/6/pobladoresafectados-por-lixiviados-de-picachos-exigen-audiencia-con-vielma.htm>(18 Agosto 2010)
- Navarro Mendoza S., Belmonte Jiménez S. y Aragón Sulik M. (2006). *Infiltración de lixiviados producidos en el basurero municipal de Oaxaca de Juárez, en suelos adyacentes a un cuerpo de agua*. Oaxaca, México.
- Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO) y residuales tratadas - método de prueba.
- Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
- Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
- Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba.



- Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
- Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba
- Norma Mexicana NMX-AA-102-SCFI-2006. Calidad del agua – detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichiacoli* presuntiva – método de filtración en membrana.
- Norma Mexicana NMX-AA-113-SCFI-1999. Análisis de agua - determinación de huevos de helminto - método de prueba.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis
- Norma Oficial mexicana 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.
- Orozco Barrenetxea C., Pérez Serrano A., González Delgado M. N., Rodríguez Vidal F. J. y Alfayate Blanco J. M. (2003). *Contaminación Ambiental: Una visión desde la química*. International Thomson Editores Spain Paraninfo, S. A. Madrid, España.
- Orta Ledesma M. T., Dávila Villareal A. y Rojas Valencia M. N. (2006). *Manejo de lixiviados y biogas generados en un relleno sanitario (generación, control, tratamiento y aprovechamiento)*. Capítulo 1 y 2. México.
- Penido Monteiro J... [et al] (2006). *Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe*. Río de Janeiro. IBAM
- Prieto Méndez J., González Ramírez C., Román Gutiérrez A., Prieto García F. (2009). *Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua*. Tropical and subtropical agroecosystems, Vol. 10, Num1. Pág. 29-44
- Ribé V., Nehrenheim E., Odlare M., Waara S., Gustavsson L. y Forsber Á. *Using ecotoxicological tests in the development of a low-cost filtering system for landfill*



- leachate* (2009). Proceedings Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5-6.
- Sánchez Gómez J. (2004). *Bio-rellenos metanogénicos opción sustentable para la disposición final de los residuos sólidos*. Sistemas de ingeniería y control ambiental, S.A. de C.V.
- Santos Márquez M. (2010). *Análisis microbiológico del agua de pozos, residual, tratada y de riego utilizada en ciudad universitaria*. Tesis Facultad de química UNAM. México D.F.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2008). *La vida útil del relleno sanitario de Bordo Poniente ha concluido*. Comunicado de prensa Núm. 155/08.
- Seoanez Calvo M. *Aguas residuales urbanas: Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. Bajo costo de instalación, producción agraria y rentabilidad de su uso, depuración* (1999). Colección: Ingeniería medioambiental, 2da. Edición revisada. España. Ediciones Mundi-Prensa.
- Serrano Gallego R. (2003). *Introducción al análisis de datos experimentales. Tratamiento de datos en bioensayos*. Castelló de la Plana: publicaciones de la Univ. Jaume I, D.L.
- The International Development Research Centre. Experiencias de la Red Internacional WaterTox. [http://www.idrc.ca/en/ev-84473-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/en/ev-84473-201-1-DO_TOPIC.html) (23 Abril 2011)
- Torres Rodríguez M. (2003). *Empleo de los ensayos con plantas en el control de contaminantes tóxicos ambientales*. Revista cubana HigEpidemiol; 41(2-3)
- Velasco J. A., de la Rosa A., Rosas A., Solórzano G. y Volke T. (2003) *Caracterización de peligrosidad en lixiviados y biogas generados en un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales*. México.
- Weimer R. C. (1999). *Estadística*. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México.
- Wiszniewski, J., Robert, D., Gorska, J., Miksch, K., Weber, J. (2006). *Landfill leachate treatment methods: A review*. *Environ Chem*.
- Zagorc-Koňčan J., Žgajnar Gotvajn A., Černila Zajc N. (2009). *Reduction of municipal landfill leachate toxicity due to different treatment methods*. Proceedings Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5-6 October 2009

## **12. ANEXO**

ARTÍCULO ACEPTADO PARA SER PRESENTADO EN EL II CONGRESO  
INTERNACIONAL DE DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA 2011

## TEMÁTICA: QUÍMICA AMBIENTAL

### TÍTULO DEL TRABAJO:

**PRUEBAS ECOTOXICOLÓGICAS PARA DETERMINAR LA AFECTACIÓN DE LOS LIXIVIADOS QUE SE INFILTRAN A ÁREAS DE CULTIVO PRÓXIMAS A LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL**

AUTORES: Sahagún Aragón Carla, Rojas Valencia María Neftalí

MODALIDAD: Presentación oral

TIPO DE TRABAJO: Resultado de una investigación

sahagun88@hotmail.com, nrov@pumas.iingen.unam.mx

### Currículum vitae del ponente:

**Carla Sahagún Aragón.** Es Ingeniero Químico de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM, durante el 2010 realizó su servicio social y su trabajo de tesis titulada “Análisis de pruebas ecotoxicológicas para determinar la afectación de los lixiviados que se infiltran a áreas de cultivo próximas a los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos”, dentro del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Actualmente participa en diferentes proyectos de investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM. E-mail: sahaqun88@hotmail.com

**Ma. Neftalí Rojas Valencia.** Realizó sus estudios de Licenciatura en Biología y de Maestría en Ciencias (especialidad en recursos acuáticos) en la Facultad de Ciencias, en la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM). Obtuvo el título de Doctor en Ciencias e Ingeniería Ambiental en la Universidad Autónoma Metropolitana en el 2004. Desde 1993 ha trabajado en el área de Ingeniería Ambiental, en el Instituto de Ingeniería, UNAM. Desde el 2005 a la fecha es Investigadora Nacional (SNI), Nivel I. Sus líneas de investigación son: microbiología ambiental, manejo y tratamiento de agua y residuos sólidos. E-mail: nrov@pumas.iingen.unam.mx

## PRUEBAS ECOTOXICOLÓGICAS PARA DETERMINAR LA AFECTACIÓN DE LOS LIXIVIADOS QUE SE INFILTRAN A ÁREAS DE CULTIVO PRÓXIMAS A LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

Sahagún Aragón Carla\*, Rojas Valencia María Neftalí\*\*

### RESUMEN

La inadecuada captación y tratamiento de los lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos ocasiona la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, suelos y tierras de cultivo, en esta última se ve altamente perjudicada la producción agrícola. Con el fin de evaluar la afectación de dicho líquido en cultivos agrícolas, se llevaron a cabo pruebas ecotoxicológicas rápidas, sencillas y baratas dentro de las cuales se analizó la germinación de semillas estandarizadas de lechuga y semillas no estandarizadas de frijol y calabaza, la elongación de tallo y raíces de cebolla así como el cultivo de hortalizas. Aunado a los ensayos ecotoxicológicos se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos tanto a los lixiviados como al suelo. Los resultados proporcionaron datos acerca del efecto del contaminante en las comunidades vegetales o cultivos agrícolas cercanos a los sitios de disposición final, las especies utilizadas aquí como bioindicadores son especies importantes desde el punto de vista hortícola, alta tasa de crecimiento, fácil germinación y manejo en laboratorio.

### ABSTRACT

The inappropriate leachates catchment system integrated in a final disposal site of urban solid wastes generates surface and underground water contamination, as well as land and crop soil contamination, damaging agricultural production. In order to evaluate the impact of said liquid on crops, fast, simple and economical ecotoxicological tests were conducted in which the germination of lettuce standardized seeds and the germination of non standardized bean and squash seeds were analyzed, as well as stem and roots elongation of onion and vegetables crops. Besides the ecotoxicological assays, physico-chemical and microbiological analyses were conducted both on the leachates and on the soils. The results generated data about the effect of the contaminant on the vegetable communities or crops next to the final disposal sites. The species used here as bioindicators are important from a horticultural, high growth rate, easy germination and laboratory handling perspectives.

### INTRODUCCIÓN

Los lixiviados son líquidos formados por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que componen los residuos, contienen en forma disuelta o en suspensión contaminantes orgánicos e inorgánicos en elevadas concentraciones, metales pesados, sales y microorganismos.

El peligro potencial de los lixiviados, es la contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas, que pueden darse por escurrimientos no controlados o por infiltraciones a través de formaciones permeables. Con estas escorrentías las personas que viven cerca de los sitios de disposición final se ven altamente afectadas ya que puede iniciarse un foco de infección. Asimismo las tierras de cultivo se contaminan fácilmente, teniendo como consecuencia un efecto negativo en la calidad del suelo, pérdidas de cosecha para los agricultores, la contaminación de sus siembras y de los animales que están en contacto con el sitio contaminado.

En México, en los últimos cinco años algunos lugares en los que han ocurrido este tipo de acontecimientos son: Zapopan y El Salto, Jalisco; Tultitlán, Ecatepec y Chiconautla, Edo de México; Ayala, Cuautla y Cuernavaca, Morelos; León, Guanajuato; Huejotzingo, Puebla; San Luis de la Paz, Guanajuato; etc. (Orta *et al.*, 2006; Bernache, 2009).

Para evaluar la afectación de los lixiviados en cultivos agrícolas se realizaron pruebas ecotoxicológicas en lixiviados utilizando cebolla y semillas estandarizadas de lechuga y no estandarizadas de frijol y calabaza. Además del cultivo de vegetales.

Los ensayos ecotoxicológicos han sido utilizados para la evaluación de toxicidad en lixiviados de rellenos sanitarios. Principalmente en los países de Brasil, Colombia y EUA se utilizan pruebas ecotoxicológicas como un complemento de los análisis químicos utilizados en la caracterización de lixiviados o en la evaluación del tratamiento que se les da a los mismos. Estas pruebas han sido en su mayoría bioensayos utilizando organismos acuáticos como lo son peces, algas o cretáceos.

Aunque los estudios ecotoxicológicos de lixiviados o agua contaminada empleando plantas son menos utilizados, los mayoritariamente reportados son aquellos en los que utilizaron como bioindicadores a las especies: *Allium cepa* L, *Lactuca sativa* L (Torres, 2003), *Agrostis scabra*, *Triticum aestivum* (Archambault *et. al*, 2004), entre otros.

El objetivo de este estudio fue evaluar y analizar pruebas ecotoxicológicas utilizando semillas (estandarizadas y no estandarizadas) y plantas, para determinar la afectación de los lixiviados que se infiltran a áreas de cultivo próximas a los sitios de disposición final.

## METODOLOGÍA

El lixiviado se tomó a la entrada de la laguna de lixiviados del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Las muestras fueron refrigeradas a 4 °C hasta su análisis y pruebas en laboratorio y campo.

### 1. Análisis fisicoquímico y microbiológico de los lixiviados

Se realizaron análisis fisicoquímicos de las soluciones de lixiviado empleadas, en los cuales se determinó: pH, salinidad (por conductividad eléctrica), sólidos suspendidos totales (SST), relación de absorción de sodio (RAS), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), dureza, metales pesados (Cd, Pb, Ni), coliformes totales (CT) y fecales (CF), huevos de helminto. Estos procedimientos se basaron en las normas mexicanas vigentes para aguas residuales, adaptadas al comportamiento de lixiviados. Con ayuda del kit BBL Crystal sistema de identificación de bacterias Gram-Positivas se determinaron las bacterias presentes en el lixiviado.

### 2. Pruebas ecotoxicológicas

Para las pruebas ecotoxicológicas ensayadas se utilizaron cuatro dosis de lixiviado con las siguientes concentraciones: 75, 50, 25 y 12.5 % lixiviado; además se manejó como solución control agua potable. Se usaron semillas y plantas como organismos de prueba.

#### 2.1. Germinación de semillas

- Ensayo ecotoxicológico con semillas estandarizadas de lechuga (*Lactuca sativa*)

En cajas Petri se ubicó un disco de papel filtro como soporte de humedad y seis semillas por caja, se adicionaron las respectivas soluciones ensayadas hasta saturar el papel filtro; se efectuaron tres repeticiones por solución. Las semillas se dejaron germinar en una incubadora a una temperatura de 26 °C, por siete días. Al término del tiempo de incubación se contaron las semillas germinadas y se midió la longitud de la radícula.

- Ensayo ecotoxicológico con semillas no estandarizadas de frijol y calabaza

Para ambas semillas: se pesó cada semilla por separado, se colocó algodón y cuatro semillas en cada frasco, se saturó el algodón con las soluciones correspondientes para cada uno durante la

prueba, con condiciones de iluminación directa y temperatura de 20 °C, se realizaron cuatro réplicas por solución ensayada; al término de siete días de exposición se registraron los signos de fitotoxicidad y el efecto en la germinación, finalmente se pesó cada semilla para determinar el peso ganado.

Con los resultados experimentales de las tres pruebas de germinación, la elongación promedio de la radícula para las semillas estandarizadas y el peso promedio de la planta para las semillas no estandarizadas, se consiguió calcular la tasa promedio de germinación, el índice de germinación y el porcentaje de inhibición tanto de la germinación como de la elongación de la radícula o crecimiento de la planta, ya sea el caso.

Se emplearon las ecuaciones 1 a 6.

$$TPG = \frac{SG}{\text{No. total de semillas}} \times 100 \% \dots (1)$$

$$IG = \frac{TPG_{\text{control}} - TPG_{\text{dilución}_i}}{TPG_{\text{control}}} \times 100 \% \dots (2)$$

Para semillas estandarizadas:

$$\text{InG} = \frac{SG_{\text{dilución}_i}}{SG_{\text{control}}} \times \frac{EPR_{\text{dilución}_i}}{EPR_{\text{control}}} \times 100 \% \dots (3)$$

$$\text{IE} = \frac{EPR_{\text{control}} - EPR_{\text{dilución}_i}}{EPR_{\text{control}}} \times 100 \% \dots (4)$$

Para semillas no estandarizadas:

$$\text{InG} = \frac{SG_{\text{dilución}_i}}{SG_{\text{control}}} \times \frac{PPP_{\text{dilución}_i}}{PPP_{\text{control}}} \times 100 \% \dots (5)$$

$$\text{IC} = \frac{PPP_{\text{control}} - PPP_{\text{dilución}_i}}{PPP_{\text{control}}} \times 100 \% \dots (6)$$

Donde:

TPG.- tasa promedio de germinación, SG.-semillas germinadas, EPR.- elongación promedio de la radícula, PPP.- peso promedio de la planta, InG.- índice de germinación, IG.- inhibición de la germinación, IE.- inhibición de la elongación, IC.- inhibición del crecimiento.

## 2.2. Prueba ecotoxicológica con cebolla (*Allium cepa*)

Se utilizaron bulbos de cebolla limpios y pelados, doce réplicas para cada dilución de lixiviado ensayada y solución control, se cortaron las raíces de las cebollas y se midió su longitud así como la del tallo, los bulbos se colocaron en tubos para exposición llenos de la solución respectiva para hidratar las raíces de cebolla, se expusieron a iluminación directa y temperatura de 20 °C, al término de siete días se midió la longitud de las raíces y los tallos con el fin de cuantificar la elongación en cada caso. Se calculó la elongación promedio así como la inhibición de la elongación (ecuación 7).

$$\text{IE} = \frac{EP_{\text{control}} - EP_{\text{dilución}_i}}{EP_{\text{control}}} \times 100 \% \dots (7)$$

Donde:

EP.- elongación promedio, IE.- inhibición de la elongación.

### 3. Cultivo de hortalizas

Se cultivaron plantas que comúnmente son sembradas en zonas agrarias cercanas a sitios de disposición final de residuos sólidos, además de ser de importancia comercial y rápido crecimiento, frijol, cebollín y calabaza para este caso.

Para el cultivo de cebollín se transplantaron plántulas y para el frijol y calabaza primero se obtuvo la germinación completa de las semillas con agua potable, después éstas fueron irrigadas con las cuatro respectivas diluciones de lixiviado así como con la solución control durante tres meses. Se efectuaron cuatro réplicas para cada solución ensayada.

Se determinó conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico (CIC), permeabilidad, metales pesados (Cd, Pb, Ni), coliformes totales y fecales en el suelo antes (suelo inicial) y después del cultivo de hortalizas (suelo con tratamiento).

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 1. Análisis fisicoquímico y microbiológico de los lixiviados

Los resultados promedio para los análisis fisicoquímico y microbiológico de las diferentes diluciones de lixiviado se los expresaron en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados promedio de las diferentes diluciones de lixiviado.

Parámetro	Método analítico	100 %	75 %	50 %	25 %	12.5 %
<b>Fisicoquímicos</b>						
pH		8,5	8,2	8,1	8,0	8,0
Conductividad (µs/cm)	NMX-AA-093-SCFI-2000	1240	930	620	310	155
RAS (mg/L)	CÁLCULO	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3
SST (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2001	360	270	180	90	45
DQO (mg/L)	NMX-AA-030-SCFI-2001	807	605	403	201	101
DBO (mg/L)	NMX-AA-028-SCFI-2001	57	43	29	14	7
Dureza total (mg/L)	NMX-AA-072-SCFI-2001	982	736	491	245	123
Cadmio (mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2001	<0,005	<0,005	<0,003	<0,002	<0,001
Níquel (mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,26	0,19	0,13	0,07	0,03
Plomo (mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,14	0,11	0,07	0,03	0,02
<b>Microbiológicos</b>						
Coliformes totales (UFC/100ml)	NMX-AA-102-SCFI-2006	1.5x10 <sup>4</sup>	1.2x10 <sup>4</sup>	7.8x10 <sup>3</sup>	3.8x10 <sup>3</sup>	1.9x10 <sup>3</sup>
Coliformes fecales (UFC/100ml)	NMX-AA-102-SCFI-2006	2.0x10 <sup>3</sup>	1.6x10 <sup>3</sup>	1.0x10 <sup>3</sup>	5.0x10 <sup>2</sup>	3.0x10 <sup>2</sup>
Bacterias heterotróficas (UFC/100ml)	NMX-AA-102-SCFI-2006	1.36x10 <sup>8</sup>	1.02x10 <sup>8</sup>	6.80x10 <sup>7</sup>	3.40x10 <sup>7</sup>	1.70x10 <sup>7</sup>
Huevos de helminto (Huevos /L)	NMX-AA-113-SCFI-1999	ND	ND	ND	ND	ND
N.D. No detectado						

Los valores de pH, DBO, DQO, dureza total y plomo de la muestra de lixiviado (100%) se encuentran dentro del intervalo de valores reportados (Orta *et al.*, 2006). Se obtiene la relación DBO/DQO = 0.07, correspondiente a un lixiviado estabilizado con contenido de compuestos

recalcitrantes y pobre en biodegradabilidad; a este tipo de lixiviado se le conoce como viejo o estabilizado.

Se determinó un valor de pH de 8.5 y una concentración de 360 mg/L de sólidos suspendidos totales lo cual provocaría condiciones anaeróbicas en los suelos y por consecuencia la inhibición de la germinación de semillas y la alteración del crecimiento normal en las plantas. La conductividad (1240  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) le confiere una propiedad de salinidad elevada como para entrar en contacto con cultivos sensibles. De acuerdo al valor arrojado de RAS se clasificaría como un agua con bajo contenido de sodio.

Los valores de metales pesados cadmio, níquel y plomo se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles para metales pesados en agua que se pone en contacto con los suelos destinados a la actividad agrícola (NOM-001-ECOL-1996).

Dentro de los análisis microbiológicos, se determinó una ausencia de huevos de helminto en la muestra de lixiviados. Los microorganismos detectados en los lixiviados fueron *Staphylococcus equorum*, *Staphylococcus vitulus*, *Staphylococcus xylosus* y *Bacillus subtilis*.

## 2. Pruebas ecotoxicológicas

### 2.1. Germinación de semillas.

En la tabla 2, se muestran los resultados de las pruebas de germinación de semillas. La comparación de valores de tasa promedio de germinación así como inhibición de la germinación en los tres tipos de semillas utilizadas, se expresa en las figuras 1 y 2.

Tabla 2. Resultados en las pruebas de germinación de semillas

MUESTRA	LECHUGA					FRIJOL					CALABAZA				
	EPR	TPG	InG	IG	IE	PPP	TPG	InG	IG	IC	PPP	TPG	InG	IG	IC
Control	20.8	50	100	0	0	1.0339	65	100	0	0	0.4115	75	100	0	0
12.50 %	0	0	0	100	100	0.8223	80	97.89	-23.07	20.46	0.5002	45	72.93	40	-21.56
25 %	0	0	0	100	100	0.913	50	67.92	23.07	11.69	0.0575	5	0.93	93.33	86
50 %	0	0	0	100	100	0.6017	45	40.29	30.76	41.79	-	0	-	100	-
75 %	0	0	0	100	100	0.724	10	10.77	84.61	29.97	-	0	-	100	-

EPR.- Elongación promedio de la radícula (mm), IE.- Inhibición de la elongación (%), TPR.- Tasa promedio de germinación (%), InG.- Índice de germinación (%), IG.- Inhibición de la germinación (%), PPP.- Peso promedio de la planta (g), IC.- Inhibición del crecimiento (%).

Al comparar las tasas promedio de germinación se observó que la lechuga es una especie muy sensible a los componentes de los lixiviados ya que sólo presentó germinación en la solución control; la germinación de las semillas de calabaza baja considerablemente a partir de la dilución 25 % lixiviado, en cambio el frijol fue un cultivo con mayor resistencia ya que presentó germinación en todos los casos pero a diferentes porcentajes.

Las semillas de frijol se vieron estimuladas por las propiedades del lixiviado en la dilución 12.5 % ya que germinaron un mayor número de semillas en esta muestra, a diferencia de los otros dos tipos de semillas en las que sus valores más altos de TPG fueron con la solución control (ver figura 1).

Para el frijol en la dilución 12.5 %, el porcentaje de IG fue valor negativo, esto se debió a que para esta muestra no se presentó una inhibición sino una estimulación de la semilla para que lograra germinar, pero a concentraciones mayores que esta se observó un aumento gradual en la inhibición de la germinación (ver figura 2). El lixiviado a concentraciones mayores de 12.5 % se consideraría tóxico para la germinación de las semillas de calabaza y lechuga.

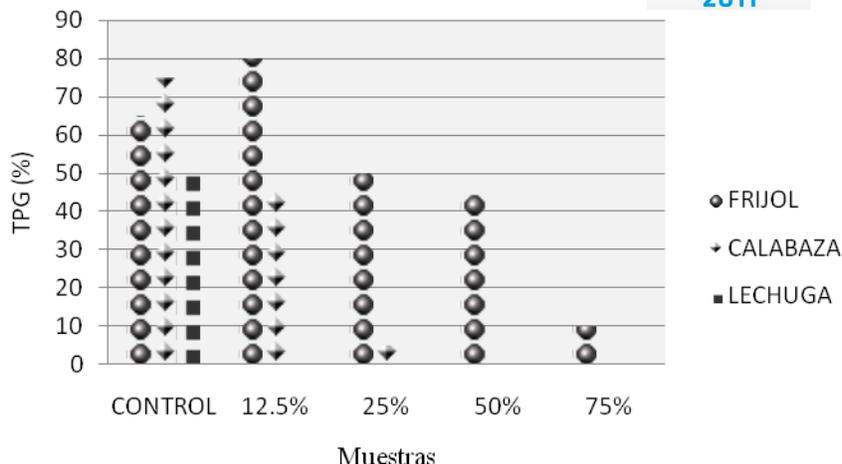


Figura 1. Comparación de la tasa promedio de germinación (%) en semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación.

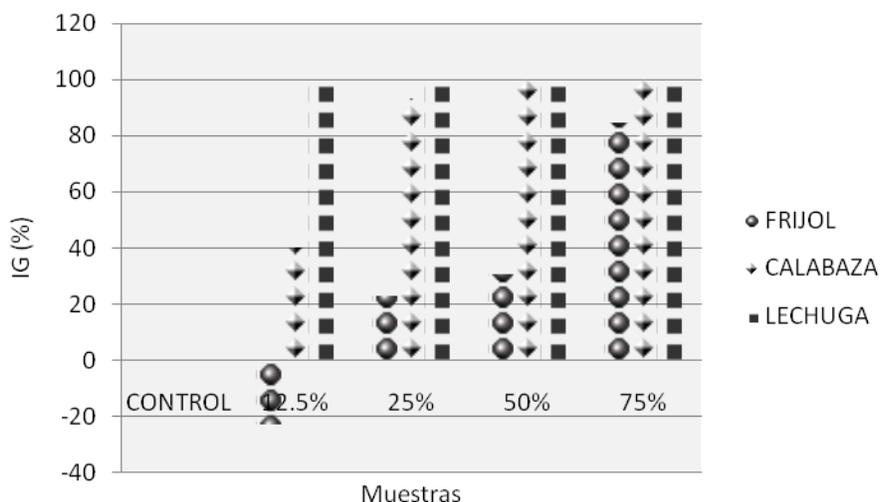


Figura 2. Comparación de la inhibición de la germinación (%) en semillas de frijol, calabaza y lechuga, en sus respectivas pruebas de germinación.

Las semillas de calabaza expuestas a las cuatro diferentes diluciones de lixiviado presentaron manchas localizadas color marrón. Las semillas de frijol expuestas a la solución 12.5 % lixiviado, presentaron un cambio de coloración a un tono café oscuro, a las de 25 % presentaron manchas localizadas de color negro y marrón, a las de 50 % y 75 % cambió su coloración a un tono negro y hubo desarrollo de hongos, además de que en dos réplicas de la solución más concentrada de lixiviado hubo formación de gusanos blancos pequeños (ver figura 3).

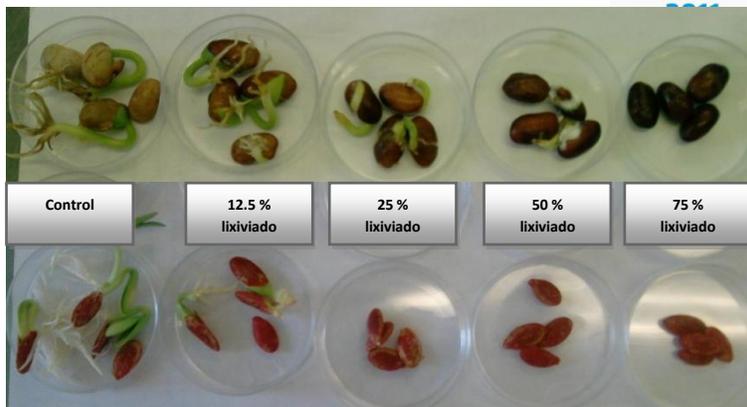


Figura 3. Semillas no estandarizadas al término de la prueba de germinación.

## 2.2. Prueba ecotoxicológica con cebolla (*Allium cepa*)

Al exponer la especie *Allium cepa* a las distintas soluciones se observó que sólo se presentó elongación de las raíces expuestas a la muestra control, a la solución 12.5 % fue casi nula y a las altas concentraciones de lixiviado hubo una inhibición completa de la elongación de raíces.

Para la elongación del tallo, se notó una considerable elongación promedio en la muestra control pero a partir de la solución 25 %, a medida que aumentó la concentración de lixiviado en la muestra, disminuyó su elongación (ver tabla 3 y figuras 4 y 5).

Tabla 3. Resultados del porcentaje de inhibición de elongación en raíces y tallo de cebolla

MUESTRA	RAÍCES		TALLO	
	IE (%)	EP (cm)	IE (%)	EP (cm)
CONTROL	0	7.8	0	11.93
12.50 %	99.14	0.06	79.39	2.45
25 %	100	0	69.34	3.65
50 %	100	0	74.16	3.08
75 %	100	0	85.47	1.73

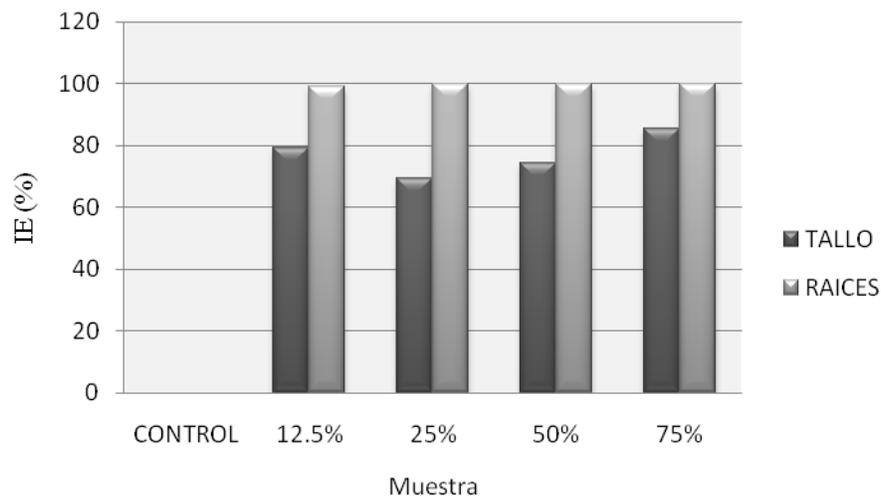


Figura 4. Resultados de la Inhibición de la Elongación (%) en raíces y tallo de cebolla.

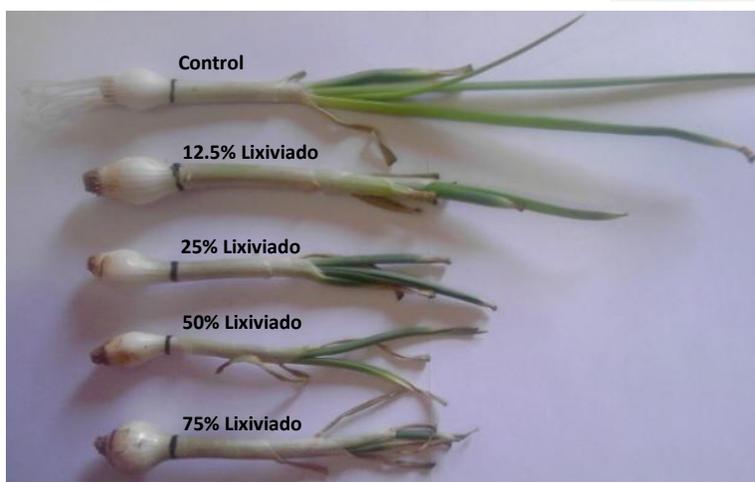


Figura 5. Cebollas al término de la prueba de elongación de raíces y tallo

### 3. Cultivo de hortalizas

El cultivo de vegetales irrigados con las cinco soluciones manejadas, arrojaron resultados meramente cualitativos, para los tres cultivos (calabaza, frijol y cebollín) se observó que al aumentar la concentración de lixiviado en las muestras, el desarrollo y crecimiento de la planta disminuyó proporcionalmente dentro de las primeras semanas, posteriormente se marchitaron casi por completo las irrigadas con 50 y 75 % (ver tabla 4).

Tabla 4. Resultados cualitativos del cultivo de hortalizas.

MUESTRA	CEBOLLIN	FRIJOL	CALABAZA
<b>CONTROL</b>	Buen crecimiento del tallo, surgimiento de nuevos tallos, manteniéndose verdes totalmente.	Floración y desarrollo de la vaina.	Floración.
<b>12.5 %</b>	Crecimiento regular del tallo, surgimiento de nuevos tallos, manteniéndose verdes totalmente.	Floración y desarrollo de la vaina.	Necrosis parcial en hojas.
<b>25 %</b>	Escaso crecimiento del tallo, surgimiento de nuevos tallos, se presento marchitamiento en las extremidades de los mismos.	Enanismo y necrosis parcial en hojas.	Necrosis parcial en hojas.
<b>50 %</b>	Crecimiento mínimo del tallo y marchitamiento del mismo.	Enanismo y marchitamiento total del 75% de las réplicas.	Marchitamiento total.
<b>75 %</b>	Crecimiento mínimo del tallo y marchitamiento del mismo.	Enanismo y marchitamiento total del 75% de las réplicas.	Marchitamiento total.

Las observaciones en el cultivo de cebollín hacen notar que fue un excelente indicador de toxicidad, por tanto se recomendaría utilizar como planta estandarizada para ser aplicada en este tipo de pruebas.

Los resultados promedio para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los dos suelos, el suelo inicial y el suelo con tratamiento (aquel regado con lixiviado al 75 %), son los expresados en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados promedio de los suelos.

Parámetro	Método analítico	Suelo inicial	Suelo con tratamiento
<b>Fisicoquímicos:</b>			
Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	AS-02-NOM-021	1320	1810
CIC ( $\text{cmol}(+)/\text{Kg}$ )	AS-12-NOM-021	99	33
Permeabilidad ( $\text{cm}/\text{h}$ )	AS-03 y 04-NOM-021	18,5	12,0
Cadmio ( $\text{mg}/\text{Kg}$ )	AS-14-NOM-021	<0,010	<0,010
Níquel ( $\text{mg}/\text{Kg}$ )	AS-14-NOM-021	<0,05	<0,05
Plomo ( $\text{mg}/\text{Kg}$ )	AS-14-NOM-021	18,30	42,00
<b>Microbiológicos:</b>			
Coliformes totales (UFC/100ml)	NMX-AA-102-SCFI-2006	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^3$
Coliformes fecales (UFC/100ml)	NMX-AA-102-SCFI-2006	$3 \times 10^4$	ND
Bacterias heterotróficas (UFC/100ml)	NMX-AA-102-SCFI-2006	$2.01 \times 10^{10}$	$1.6 \times 10^{10}$

N.D. No detectado

Con la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de ambos suelos, se observó que la fertilidad del suelo disminuyó al ser invadido con lixiviados, ya que se obtuvo para el suelo inicial un CIC de  $99 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$  y para el suelo con tratamiento  $33 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$ ; conjuntamente la permeabilidad del suelo se vio afectada por los sólidos suspendidos totales contenidos en los lixiviados (pasando de una permeabilidad de  $18.5 \text{ cm}/\text{h}$  a  $12.0 \text{ cm}/\text{h}$ ) y que ocasionaron un taponamiento físico al mismo.

El suelo con tratamiento presentó una salinidad más elevada con una conductividad de  $1810 \mu\text{s}/\text{cm}$  que el inicial con  $1320 \mu\text{s}/\text{cm}$ , y de acuerdo con la relación entre la producción de cultivos y la salinidad del suelo (Arnon, 1980), al inicial le correspondería un 75 % de la producción del cultivo, mientras que al suelo con tratamiento un 68 %. Cabe señalar que las plantas que fueron utilizadas se consideraron como cultivos sensibles a la salinidad del suelo y esta reduce el crecimiento y la fotosíntesis de las especies sensibles.

La concentración de Cadmio y Níquel se encontró por debajo de los límites permisibles, además de que se mantuvo constante su valor en suelo inicial y después de haber sido irrigado con lixiviado. A diferencia que con el Plomo el cual aumentó su valor, al reportarse una cantidad de  $18,30 \text{ mg}/\text{kg}$  en el suelo inicial y  $42,00 \text{ mg}/\text{kg}$  en el suelo con tratamiento.

La concentración reportada de plomo en el suelo con tratamiento, según los estándares de evaluación para suelos contaminados por metales pesados, se encontró dentro del límite superior de concentración frecuente de metales pesados en suelos (Prieto-Méndez *et al.*, 2009).

## CONCLUSIONES

La aplicación de pruebas ecotoxicológicas al lixiviado permitió reflexionar sobre los daños que la mala o nula captación de los mismos llega a ocasionar al infiltrarse a suelos de cultivo aledaños a sitios de disposición final de residuos sólidos.

Las especies utilizadas como bioindicadores u organismo de prueba fueron especies interesantes de considerar por su importancia desde el punto de vista hortícola, alta tasa de crecimiento, importancia ecológica, fácil manejo en laboratorio. Por otra parte fueron de fácil y rápida germinación por lo que fue posible desarrollar las pruebas en siete días.

La información generada a partir de estas pruebas ecotoxicológicas proporcionaron datos no estudiados acerca del efecto del contaminante (lixiviado) en las comunidades vegetales o cultivos agrícolas cercanos a los sitios de disposición final, por lo que fue posible analizar y evaluar la afectación de los agentes tóxicos presentes en los lixiviados utilizando semillas estandarizadas y no estandarizadas, así como directamente en plantas como la cebolla o mediante el cultivo de frijol, calabaza y cebollín, se observó así que el lixiviado a concentraciones mayores a 12.5 % provocó efectos dañinos inmediatos en semillas y plantas, además de que contaminó el suelo fértil utilizado para cultivo.

## BIBLIOGRAFÍA

Archambault D.J., Slaski J.J., Li X., Winterhalder K. (2004). Una prueba biológica rápida, sensible, basada en semillero para la determinación de la toxicidad de substratos sólidos y líquidos y de la tolerancia de la planta. Canadá. *Soil & Sediment Contamination*, 13: 53-63 (versión traducida).

Arnon Isaac (1980) Factores agrícolas en planificación y desarrollo regional. Editorial IICA. San José, Costa Rica. Pág. 135-138.

Bernache Pérez Gerardo (2009). "Los basureros y comunidades contaminadas", La Jornada Ecológica. 1 de Junio 2009, Número Especial. 27 de Septiembre 2010. <[www.jornada.unam.mx](http://www.jornada.unam.mx)>

Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1993. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales.

Orta Ledesma Ma. Teresa, Dávila Villareal Arturo y Rojas Valencia Ma. Neftalí (2006). Manejo de lixiviados y biogás generados en un relleno sanitario (generación, control, tratamiento y aprovechamiento). Capítulo 1 y 2. México. Pág. 12-20, 102-109.

Prieto Méndez J., González Ramírez C. A., Román Gutiérrez A. D., Prieto García Francisco (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical agroecosystems*, Vol. 10, Num.1 Pág. 29-44.

Torres Rodríguez M. T. (2003). Empleo de los ensayos con plantas en el control de contaminantes tóxicos ambientales. *Revista cubana Hig Epidemiol*; 41(2-3).

\*Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM. [sahagun88@hotmail.com](mailto:sahagun88@hotmail.com)

\*\*Instituto de Ingeniería UNAM. [nrov@pumas.iingen.unam.mx](mailto:nrov@pumas.iingen.unam.mx)