



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

---

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN LETAL MEDIA ( CL<sub>50</sub> ) DEL  
LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO DE BACALAR QUINTANA ROO  
UTILIZANDO *Laenoneis culveri* COMO BIOINDICADOR.**

---

**TESIS**

Para obtener el grado de  
**Ingeniero Ambiental**

**PRESENTA**

PATRICIA COLL CRUZ

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. VICTOR HUGO DELGADO BLAS

**ASESORES**

DRA. MARTHA ANGÉLICA GUTIÉRREZ AGUIRRE

M.C. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO

M.C. RUSSELL GIOVANNI UC PERAZA

DR. JOSÉ MANUEL CARRIÓN JIMÉNEZ



UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
**SERVICIOS ESCOLARES**  
TITULACIONES

CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, **NOVIEMBRE**, DE 2017



# UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS ELABORADO BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE TESIS DEL  
PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL  
GRADO DE:

**INGENIERO AMBIENTAL**

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:   
DR. VICTOR HUGO DELGADO BLAS

ASESOR:   
DRA. MARTHA ANGÉLICA GUTIÉRREZ AGUIRRE

ASESOR:   
M.C. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, **NOVIEMBRE**, DE 2017

---

## **Dedicatoria**

**A Dios:** Por darme fortaleza, y una familia extraordinaria.

**A mis padres:**

**José Coll Hernández y Yolanda Cruz Hernández.**

Porque sin ellos no hubiera sido capaz de llegar hasta donde me encuentro ahora, por su ejemplo, por su confianza, y sus consejos, gracias por llevarme de la mano siempre y por su cariño que es mi motor para seguir avanzando, así como también agradezco su apoyo en mis proyectos y metas. MUCHAS GRACIAS LOS AMO.

**A mi única hermana y familia:**

**Yadira Coll Cruz**

Que para mí significa, una amiga incondicional, por comprenderme soportarme, amarme y ser parte de los mejores momentos de mi vida.

**Mis compañeros de la carrera:**

A cada uno de mis compañeros y los que se fueron uniendo durante el tiempo de estudio; Ginnel, Romel, Andrea, Dahyn, Claudia, Sarita, Raúl, Rafael, Diana, Abel, Julio, Martha, María Eliza, Jair, Víctor, Omar, Ulises, Leysi, Misael, Irving, Enrique, Andrés, por esos momentos que pasamos juntos, en trabajos, practicas, salidas, y más, en especial a mi estimado amigo Andrés Adrián Puga.

---

**A los futuros ingenieros:**

**Irma Ciau Pat, Cinthia Kasandra Rangel Méndez y Abraham Alejandro Quintero Chin:**

Por compartir ideas, y apoyo durante las prácticas y por esos momentos que compartimos como “*Team Víctor Hugo*”.

**A mis amigas:**

**Sayreli Aguilar Maldonado y Lourdes Yamily Canto Cuxim**

De corazón por la familia que no es de sangre, pero considero como mis hermanas, cómplices en mis aventuras y excelente compañía.

---

## **Agradecimientos**

### **Dr. Víctor Hugo Delgado Blas**

Le agradezco especialmente, por compartirme sus conocimientos y apoyarme durante este camino profesional sin titubear, cada momento de aprendizaje, cada momento de risa, cada regaño tiene una dirección y un sentido que culmina en el cumplimiento de esta meta  
MUCHAS GRACIAS POR SER MI TUTOR Y DIRECTOR DE TESIS.

### **Dra. Martha Angelica Gutiérrez Aguirre y M.C. José Luis González Bucio**

A mis asesores, por haber dedicado su tiempo, conocimiento y valiosa colaboración. Es cierto no ha sido fácil, ni mucho menos, sin embargo, gracias a su ayuda la realización de esta tesis fue una tarea menos complicada.

### **Profesores de la Universidad de Quintana Roo**

M.I.A. **Juan Carlos Ávila Reveles**, Dr. **José Manuel Carrión Jiménez**, Biól. **Laura Patricia Flores Castillo**, M. C. **José Luis Guevara Franco**, Dra. **Norma Angelica Oropeza García**, M. C. **José Martín Rivero Rodríguez**, Dr. **José Alfonzo Canche Uuh**; Por haber tomado el arduo trabajo de transmitirme sus diversos conocimientos especiales del campo y los temas que corresponden a mi profesión. Pero además de eso han sido quienes han sabido orientarme por el camino correcto, y quienes se han esforzado a ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro.

### **Universidad de Quintana Roo**

Por apoyarme con facilidad estos años de estudio, para la realización de los diversos proyectos, información y sobre todo atención oportuna en todos los departamentos que la componen proporcionándome conocimientos útiles a la sociedad.



**Cuando el último árbol sea cortado, el último  
río envenenado, el último pez pescado, solo  
entonces el hombre descubrirá que el dinero no  
se come.**

Proverbio

---

## Resumen

En el presente trabajo se determinó experimentalmente la toxicidad del lixiviado del relleno sanitario de Bacalar, empleando como organismo de prueba a *Laeonereis culveri* especie colectada en la Bahía de Chetumal y aclimatados en condiciones de laboratorio. Para ello, se realizaron bioensayos de toxicidad estáticos a 48 horas utilizando 5 concentraciones distribuidas a escala, 3 réplicas y un control por cada una de las cámaras de ensayo exploratorias y definitiva; cada una de las concentraciones, se expusieron con 10 organismos en diversos recipientes de plástico con capacidad de 500 ml con una capa de sedimento en el fondo, solución salina y su respectivo porcentaje de lixiviado. Posteriormente, se realizaron lecturas de mortalidad y se determinaron las concentraciones letales medias (CL<sub>50</sub>) mediante el método Probit con un intervalo de confianza de 95 %. Así, la CL<sub>50</sub> obtenida fue de 41.31 % de concentración, y de acuerdo con la clasificación de valores en unidades de toxicidad (U.T. = 2.4201894) este valor resultó entre los considerados tóxicos para *Laeonereis culveri*. Los cálculos estimados estadísticamente indican que si esta especie llegará a tener contacto con lixiviados por medio de algún derrame directa o indirectamente a nuestro ecosistema tendríamos lamentables afectaciones ecológicas.

**Palabras clave:** *bioensayos, toxicidad, lixiviados, Laeonereis culveri.*

---

## ÍNDICE

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Dedicatoria .....</b>                           | <b>iii</b>  |
| <b>Agradecimientos .....</b>                       | <b>v</b>    |
| <b>Resumen .....</b>                               | <b>vii</b>  |
| <b>Índice de figuras .....</b>                     | <b>xi</b>   |
| <b>Índice de tablas .....</b>                      | <b>xii</b>  |
| <b>Índice de anexos .....</b>                      | <b>xiii</b> |
| <b>I. Introducción .....</b>                       | <b>2</b>    |
| 1.1. Antecedente .....                             | 5           |
| 1.2. Planteamiento del problema.....               | 7           |
| 1.3. Justificación .....                           | 8           |
| 1.4. Objetivo General.....                         | 8           |
| 1.4.1. Objetivos Específicos.....                  | 8           |
| 1.5. Pregunta de investigación .....               | 9           |
| 1.6. Hipótesis .....                               | 9           |
| <b>II. Marco Teórico.....</b>                      | <b>11</b>   |
| 2.1. Lixiviados .....                              | 11          |
| 2.1.1. Composición de los lixiviados .....         | 12          |
| 2.1.2. Tipos de lixiviados .....                   | 13          |
| 2.1.3. Caracterización del lixiviado.....          | 14          |
| 2.2. Ecotoxicología .....                          | 15          |
| 2.3. Bioensayos .....                              | 16          |
| 2.3.1. Bioensayo de toxicidad aguda.....           | 17          |
| 2.4. Organismo de prueba .....                     | 18          |
| 2.4.1. <i>Laeonereis culveri</i> (POLYCHAETA)..... | 18          |



---

|  |           |
|--|-----------|
| 2. 4. 2. Importancia de <i>Laeonereis culveri</i> .....  | 18        |
| 2. 5. Concentración Letal Media (CL <sub>50</sub> ) .....  | 19        |
| <b>III. Métodos y materiales .....</b>   | <b>21</b> |
| 3. 1. Método de Campo.....   | 21        |
| 3. 2. Laboratorio (Selección, identificación y aclimatación de los organismos) .....   | 22        |
| 3. 2. 1. Preparación de sedimento .....  | 23        |
| 3. 2. 2. Preparación de agua salina .....  | 24        |
| 3. 3. Recolección del lixiviado.....   | 25        |
| 3. 4. Preparación de bioensayos.....   | 28        |
| 3. 4. 1. Disoluciones de prueba .....  | 29        |
| 3. 4. 2. Realización de bioensayo.....   | 30        |
| 3. 4. 3. Registro de mortalidad .....  | 31        |
| 3. 5. Calculo de la concentración letal media (CL <sub>50</sub> ).....   | 31        |
| 3. 5. 1. Análisis estadístico.....   | 31        |
| 3. 5. 2. Estimación del grado de Toxicidad.....  | 32        |
| <b>IV. Resultados .....</b>  | <b>34</b> |
| 4. 1. Bioensayos exploratorios .....   | 34        |
| 4. 2. Resultados de la mortandad de organismos en la cámara de bioensayos de lixiviados .....  | 35        |
| 4. 3. Valor probit empírico asociado a los porcentajes de mortalidad y log concentración de las concentraciones de la cámara de bioensayos de lixiviados. .... | 36        |
| 4. 4. Concentración Letal media ( CL <sub>50</sub> ) de Lixiviados en <i>Laeonereis culveri</i> .....  | 37        |
| 4. 5. Análisis estadístico de la cámara de bioensayo de lixiviado .....  | 40        |
| 4. 6. Clasificación de la Toxicidad del Lixiviado .....  | 43        |
| <b>V. Discusión.....</b>   | <b>45</b> |

---

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>VI. Conclusiones .....</b>    | <b>50</b> |
| <b>VII. Recomendaciones.....</b> | <b>51</b> |
| <b>VIII. Referencias.....</b>    | <b>52</b> |
| <b>IX. Anexos .....</b>          | <b>59</b> |

---

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Generación de lixiviados y ciclo de agua en un relleno sanitario. adaptado de Renou <i>et al.</i> , (2007).....          | 11 |
| <b>Figura 2.</b> Recolección de organismos de <i>Laeonereis culveri</i> en la bahía de Chetumal. ....                                     | 22 |
| <b>Figura 3.</b> Selección e identificación de organismos de <i>Laeonereis culveri</i> . ....   | 22 |
| <b>Figura 4.</b> Introducción de 10 g de sedimento tratado en los recipientes. ....   | 24 |
| <b>Figura 5.</b> Mapa de ubicación del relleno sanitario de Bacalar municipio del estado de Quintana Roo visto en google earth. ....      | 25 |
| <b>Figura 6:</b> Dimensiones de la laguna de lixiviados del relleno sanitario de Bacalar. Vista con Google Earth.....                     | 26 |
| <b>Figura 7.</b> Recolección de lixiviado del relleno sanitario de la laguna de Bacalar. ....   | 27 |
| <b>Figura 8.</b> Agregación de lixiviado a cada uno de los recipientes. ....  | 28 |
| <b>Figura 9.</b> Cámara de bioensayos del lixiviado al inicio de la prueba definitiva.....  | 30 |
| <b>Figura 10.</b> Grafica del log de la concentración de lixiviado contra el valor Probit.....  | 37 |
| <b>Figura 11.</b> Recta resultante del ajuste por mínimos cuadrados de log de la concentración de lixiviados contra el valor probit. .... | 38 |
| <b>Figura 12.</b> Representación gráfica de log de la CL <sub>50</sub> a 48 horas del lixiviado en <i>L. culveri</i> . ....               | 39 |
| <b>Figura 13.</b> Normalidad y elipse de confianza del 95 % de la variable dependiente de la cámara de bioensayo del lixiviado. ....      | 41 |
| <b>Figura 14.</b> Promedio y errores estándar de organismos muertos por concentración de lixiviados. ....                                 | 42 |
| <b>Figura 15.</b> Promedios y errores estándar de organismos muertos por réplica de la cámara de bioensayo de lixiviado.....              | 42 |

---

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Características fisicoquímicas de los lixiviados del relleno sanitario de Bacalar, (Ríos Palacios., 2016).....                    | 15 |
| <b>Tabla 2.</b> Cantidad de lixiviado y agua destilada utilizada en bioensayos.....   | 29 |
| <b>Tabla 3.</b> Clasificación de toxicidad basada en unidades de toxicidad. Fuente Saldaña <i>et al.</i> , 2002.....                              | 32 |
| <b>Tabla 4.</b> Parámetros fisicoquímicos registrados in situ. ....   | 34 |
| <b>Tabla 5.</b> Resultados de mortandad de <i>Laeonereis culveri</i> en la cámara de bioensayos de lixiviado.....                                 | 35 |
| <b>Tabla 6.</b> Probit empírico asociado a los porcentajes de mortandad y log de las concentraciones de la cámara de bioensayo del lixiviado..... | 36 |
| <b>Tabla 7.</b> Estadística descriptiva de la variable dependiente número de muertos de la cámara de bioensayo de lixiviado.....                  | 40 |
| <b>Tabla 8.</b> Clasificación de toxicidad del lixiviado en <i>L. culveri</i> . ....  | 43 |

---

## Índice de anexos

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Anexo 1. Tablas de datos.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>Tabla 1. Anexo 1:</b> Compuestos orgánicos reportados en lixiviados de rellenos sanitarios (Scopiu y Gravilescu., 2010).....   | 59        |
| <b>Tabla 2. Anexo 1:</b> Indicadores y componentes inorgánicos de lixiviados de relleno sanitario. Fuente: Schiopu y Gavrilescu (2010).....   | 60        |
| <b>Tabla 3. Anexo 1:</b> Clasificación de los lixiviados de relleno sanitario de acuerdo a su edad, según Abbas <i>et al.</i> , (2009), Deng (2009) y Li <i>et al.</i> , (2010). .... | 60        |
| <b>Tabla 4. Anexo 1:</b> clasificación de los lixiviados de relleno sanitario vs edad, según renou <i>et al.</i> , (2007). ....   | 61        |
| <b>Tabla 5. Anexo 1:</b> Parámetros medidos de los lixiviados y métodos utilizados en su medición según (Ríos Palacios., 2016). ....  | 61        |
| <b>Tabla 6. Anexo 1:</b> Datos típicos de la composición de los lixiviados procedentes de los rellenos sanitarios nuevos y antiguos (Vázquez Godina., 2001).....                      | 62        |
| <b>Tabla 7. Anexo 1:</b> Características promedio de los lixiviados en las estaciones de muestreo (Espinosa Lloréns <i>et al.</i> , 2010).....  | 63        |
| <b>Anexo 2: Figuras de las baterías de la preparación de los bioensayos exploratorios y definitivos. ....</b>   | <b>64</b> |
| <b>Figura 1. Anexo 2:</b> Representación de la batería de bioensayo para las pruebas exploratorias A y B. ....  | 64        |
| <b>Figura 2. Anexo 2:</b> Representación de la batería de bioensayo para las pruebas definitivas. ....  | 65        |
| <b>Figura 3. Anexo 2:</b> Pila de bioensayo exploratorio de 100, 75, 50, 25, 12.5% y un blanco de concentración de lixiviado en 500 ml.....   | 66        |
| <b>Figura 4. Anexo 2:</b> Segunda pila de bioensayo exploratorio de 100, 75, 50, 25, 12.5% y un blanco de concentración de lixiviado en 250 ml. ....                                  | 66        |
| <b>Figura 5. Anexo 2:</b> Tercera pila de bioensayo exploratorio de 48, 43, 38, 33, 28% y un blanco de concentración de lixiviado en 250 ml. ....                                     | 67        |

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 6. Anexo 2:</b> Cuarta pila de bioensayo definitiva de 48, 43, 38, 33, 28% y un blanco de concentración de lixiviado en 250 ml..... | 67        |
| <b>Anexo 3: Figuras de la laguna de lixiviado evaluado (A), (B) y la técnica de extracción (C)(D).....</b>                                    | <b>68</b> |
| Material (E), aclimatación (F) y extracción del organismo de prueba (G) y (H). .....  | 69        |
| <b>Anexo 4: Tablas de mortandad obtenidas de los bioensayos exploratorios y definitivos. ....</b>   | <b>70</b> |
| <b>Tabla 8. Anexo 4:</b> Prueba exploratoria 1 .....  | 70        |
| <b>Tabla 9. Anexo 4:</b> Prueba exploratoria 2 .....  | 70        |
| <b>Tabla 10. Anexo 4:</b> Primera réplica de la prueba definitiva.....  | 71        |
| <b>Tabla 11. Anexo 4:</b> Segunda réplica de la prueba definitiva .....   | 71        |
| <b>Tabla 12. Anexo 4:</b> Tercera réplica de la prueba definitiva .....   | 72        |
| <b>Anexo 5: Organismo de prueba utilizado.....</b>  | <b>73</b> |



## Capítulo I

### INTRODUCCIÓN

---

## **I. Introducción**

En la actualidad existe una problemática en la generación de residuos sólidos debido al acelerado crecimiento demográfico de la población, lo cual incrementa la demanda de servicios de limpieza, así como la generación de residuos sólidos y sus problemas derivados como, por ejemplo, la disposición final adecuada, así como las afectaciones a los ecosistemas aledaños. Los residuos se definen, según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, como aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso y que se almacena en recipientes o depósitos. De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, la disposición final de los residuos sólidos son los rellenos sanitarios, el cual se define como obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial con el fin de controlar a través de la compactación e infraestructura adicional los impactos ambientales.

Los residuos sólidos urbanos presentan una composición que varía de acuerdo con los elementos orgánicos e inorgánicos generados. Estos dependen de las características de la población del lugar donde se generen los mismos. Dado que los rellenos sanitarios se construyen a un bajo costo y son fáciles de implementar, han sido una práctica común a nivel mundial, sin embargo, son los causantes de impactos ambientales y sanitarios negativos. Uno de los problemas más grandes causados por los rellenos sanitarios es la producción y manejos de los lixiviados.

La NOM-083- SEMARNAT-2003 define los lixiviados como el líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositaron los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.



---

Los lixiviados contienen contaminantes que causan daño a los ríos y aguas subterráneas; por ejemplo, el amoníaco, el cual, en concentraciones bajas, elimina los peces; compuestos orgánicos disueltos (compuestos húmicos, fúlvicos, compuestos con anillo bencénico, entre otros) medidos como demanda química de oxígeno (DQO) que reduce los niveles de oxígeno disuelto del agua y destruyen todos los organismos acuáticos. Otros contaminantes encontrados en el lixiviado son plaguicidas, metales, sólidos suspendidos y metano disuelto (Angarita Santos *et al.*, 2013).

Distintas investigaciones hidro-geoquímicas de rellenos sanitarios, mostraron que los rellenos sanitarios y tiraderos no controlados contienen desechos sólidos que contaminan las aguas superficiales y subterráneas.

En los últimos años se ha determinado que los lixiviados se correlaciona con la edad de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario debido a que la degradación microbiana de los componentes orgánicos e inorgánicos de los residuos depende de la fase de degradación del relleno, por lo que se predomina la existencia de mayor cantidad de residuos y partículas suspendidas contenida en el lixiviado (Lee *et al.*, 2010).

El parámetro toxicológico más empleado para evaluar el impacto ambiental de una sustancia es la toxicidad aguda. Mediante estos bioensayos eco-toxicológicos se determina la concentración de un contaminante, efluentes o aguas receptoras que producen un efecto desfavorable en un organismo de prueba, la respuesta es la mortalidad. Los resultados se expresan en valores de Concentración Letal Media (CL<sub>50</sub>) que es la concentración tóxica que causa la muerte al 50 % de organismos de prueba (Sánchez-Rivas y Vera-Diego, 2001).

Una manera más confiable de evaluar el potencial tóxico de un contaminante es mediante la aplicación de ensayos o test de toxicidad, utilizando organismos estandarizados para tal fin. Para evaluar la toxicidad de mezclas de elementos químicos en aguas superficiales, normalmente se utilizan organismos acuáticos. Estos organismos se utilizan por su alta tasa de reproducción, fácil manipulación y sensibilidad a los contaminantes (Silva *et al.*, 2003).

---

En el estado de Quintana Roo se produce aproximadamente 1752 Ton/día de residuos sólidos, siendo Benito Juárez, Solidaridad y Othón P. Blanco los principales generadores. En el Estado se carece de instalaciones adecuadas y de técnicas apropiadas para su gestión integral, contribuyendo al uso indiscriminado de basureros a cielo abierto y tiraderos clandestinos. De esta forma a través de escorrentías subterráneas los lixiviados pueden afectar directamente a los cuerpos acuáticos cercanos a la laguna.

En la actualidad se carece de estudios en relación con la toxicidad de los lixiviados de los rellenos sanitarios de los municipios de Bacalar y Othón P. Blanco en Quintana Roo.

---

## 1.1. Antecedente

El Instituto Nacional de Higiene y Microbiología (INHEM, 2006); realizó una investigación, sobre los lixiviados de materiales empleados en el sellado de depósito de agua potable de cuatro fabricantes diferentes, y utilizaron 25 semillas de *Lactuca sativa* L. (lechuga) variedad BSS (Black Seed Simpson, variedad de invierno), con cuatro diluciones de 20 ml cada una. De los cuatro lixiviados analizados solo uno resultó tóxico ya que hubo un 87 % de inhibición en el crecimiento de la raíz vegetal, con el segundo lixiviado el 50 % de la inhibición, el tercer lixiviado produjo el 24 % y el último fue del 6 % sin causar efecto.

Reinel Muñoz (2009), realizó la determinación de la característica de toxicidad por lixiviación (TCLP) del ingrediente activo malatión en un plaguicida organofosforado empleando el procedimiento de TCLP. Para ello realizó 10 bioensayos determinando que la aplicación del plaguicida al suelo sin ninguna dosificación genera un impacto moderado y una aplicación menor del 50 % del plaguicida puede lixiviar. Las concentraciones obtenidas a partir de la inyección de 2 $\mu$  de cada muestra de extracto TCLP en el cromatógrafo se encuentra en un rango de 90,60 ppm y 112,74 ppm las cuales teniendo en cuenta el porcentaje de recuperación determinado por el método de extracción 3510C EPA, corresponde a una concentración real de 113250,42 ppm y 140929,39 ppm de ingrediente activo presente en la muestra que se puede lixiviar y por lo tanto contaminar el agua subterránea. El nivel de toxicidad del plaguicida supera las normas establecidas para vertimientos (concentración máxima 0.1 ppm) y en usos del agua para flora y fauna acuática (máximo 0,05 ppm).

Flores Tena *et al.*, (2010), estudiaron los efectos que producen los lixiviados de los biosólidos y drenajes agrícolas con pruebas de toxicidad empleando las especies *Nannochloris oculata*, *Oreochromis niloticus*, *Lecane quadridentata* y *Limnodrilus hoffmeisteri*; Observando en *N. oculata*, un efecto sobre su crecimiento en concentraciones mayores a 500 ppm de lixiviados. Asimismo, la CL<sub>50</sub> para *O. niloticus*, *L. quadridentata* y *L. hoffmeisteri* fue de 8.6, 42.4 y < 80 % respectivamente. Los drenajes adicionados con biosólidos también afectaron a *N. oculata* mientras que las CL<sub>50</sub>, para la fauna acuática fueron de 90 t/ha y 432 t/ha respectivamente a 48h.

---

Rivera Laguna *et al.*, (2013), determinó la toxicidad de lixiviados provenientes de residuos sólidos, permitiendo evaluar la influencia de la edad del lixiviado sobre sus características fisicoquímicas y toxicidad. Realizó pruebas estáticas y agudas a 48 horas con *Daphnia pulex*, sobre los lixiviados de diferentes períodos de operación (Lixiviado Joven, Intermedio y Maduro), obteniéndose como resultado que la edad de los lixiviados y su toxicidad guardan una relación inversamente proporcional. La CL<sub>50</sub> para el Lixiviado Joven es de 1.21 %, con 82.6 Unidades de Toxicidad (UT), de 2.12 % y 47.2 UT para el intermedio, y de 3.61 % y 27.7 UT para el maduro.

---

## 1. 2. Planteamiento del problema

En la actualidad, el deterioro progresivo del ambiente ha despertado la preocupación del hombre debido a las incidencias directas que ha tenido sobre su salud y sobre su calidad de vida. Por tal motivo, el ser humano se ha encargado de crear y promocionar acciones que contrarresten el daño que se causa al ambiente producto del incesante desarrollo industrial y la rutina diaria.

El relleno sanitario que se utilizó para el desarrollo de la presente tesis se encuentra cercano a un cuerpo de agua llamado Laguna Azul de Bacalar.

Esto puede representar una problemática de afectación importante para el cuerpo de agua receptor dado a través de escorrentías superficiales y subterráneos.

El lixiviado puede desembocar en el mismo causando un impacto, afectando a los organismos presentes y de esta manera se pudiera generar un desequilibrio ecológico.

Para determinar la toxicidad de lixiviados se utilizan los bioensayos, los cuales, representan una herramienta para determinar la toxicidad presente del lixiviado por las diversas sustancias que contiene, el cual se lleva a cabo con ayuda de organismos de prueba. De acuerdo con la literatura los poliquetos *Laeonereis culveri* se pueden utilizar como organismos de prueba ya que son sensibles, endémicos, representativos y con una amplia distribución en la Bahía de Chetumal (Nah Song., 2016).

Se ha considerado la utilización de *Laeonereis culveri* porque ha sido utilizada en diversos trabajos de toxicidad y presenta ventajas como organismo de prueba de fácil manejo, económico y viable, apta para llevar a cabo este tipo de estudios.

Es importante considerar la edad del lixiviado debido a que este cambia de acuerdo a su longevidad, características y estos se clasifican por periodos ( 0 – 5 años lixiviado Joven, 5 – 10 años lixiviado Intermedio y mayor a 10 años lixiviado viejo ), son significativos de acuerdo a la edad de los residuos ya que el lixiviado más joven es considerado el más toxico de acuerdo a la literatura y el más viejo es de menor toxicidad, por las diferentes condiciones climáticas, diseño y operación del sitio de disposición final, y los tipos de residuos.

Actualmente el lixiviado estudiado se clasifico a mediados del año 2016, como lixiviado Intermedio.

---

### 1. 3. Justificación

Othón P Blanco ocupa el segundo lugar a la par con Solidaridad en la generación de basura per cápita, y el municipio de Benito Juárez ubicándose en el primer lugar. A lo largo del estado se carece de un buen manejo en la disposición final de los residuos sólidos lo cual lleva a que los pocos rellenos sanitarios que existen se encuentran en mal estado y que existen tiraderos a cielo abierto de manera clandestina. De esta forma a través de los escurrimientos superficiales y subterráneos los lixiviados producto del relleno podría llegar a la laguna Bacalar dañando el ecosistema acuático y generar un desequilibrio ecológico, por esta razón se debe realizar pruebas de toxicidad del lixiviado del relleno sanitario por la cercanía a diversos cuerpos de agua, con la finalidad de tener una alerta temprana de algún daño. Para determinar la toxicidad de los efluentes se utilizan los bioensayos, los cuales, representa una herramienta para determinar la toxicidad de sustancias, el cual, se lleva a cabo con ayuda de organismos de prueba, en este caso se utilizó una especie de poliqueto, que se encuentra en la base de la cadena alimenticia, por lo que las afecciones en sus población tienen una repercusión en el ecosistema, en este caso se utilizará *Laeonereis culveri*, los cuales se han utilizado por ser sensibles para este tipo de pruebas y ser una especie abundante en la Bahía de Chetumal Quintana Roo.

### 1. 4. Objetivo General

Evaluar la toxicidad del lixiviado del relleno sanitario de la comunidad de Bacalar en la especie *Laeonereis culveri* mediante la realización de bioensayos de toxicidad aguda para contribuir al conocimiento eco toxicológico.

#### 1. 4. 1. Objetivos Específicos

- Determinar la concentración letal media (  $CL_{50}$  ) del lixiviado del relleno sanitario de Bacalar utilizando *Laeonereis culveri* como organismos de prueba.
- Determinar el grado de toxicidad del lixiviado de Bacalar.

---

### **1. 5. Pregunta de investigación**

¿Cuál será la  $CL_{50}$  del lixiviado del relleno sanitario del municipio de Bacalar Quintana Roo a 48 horas?

### **1. 6. Hipótesis**

Se estima que la  $CL_{50}$  del lixiviado del relleno sanitario de Bacalar en *Laenoneis culveri*, afectará al 50 %, de los organismos de prueba, dada la antigüedad del lixiviado.



## Capítulo II

### MARCO TEÓRICO



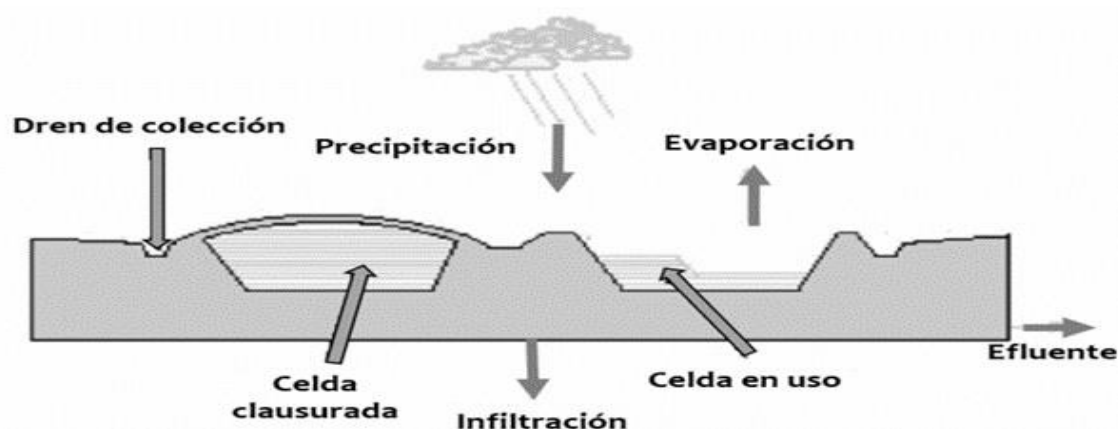
## II. Marco Teórico

### 2. 1. Lixiviados

A grandes rasgos se puede definir la lixiviación; como el proceso el cual se lava un medio produciendo, el desplazamiento de diversas sustancias solubles. Debido al significativo aumento en la cantidad de residuos sólidos urbanos cada vez va en aumento debido al desarrollo comercial e industrial por el incremento de la adquisición de bienes. La disposición final de este tipo de residuos tendrá siempre como consecuencia la generación de lixiviados, sea en rellenos sanitarios o en tiraderos a cielo abierto.

Definido generalmente por Renou *et al.*, (2007) como un efluente acuoso generado como consecuencia de la percolación del agua de lluvia a través de los residuos sólidos, procesos bioquímicos en los vertederos y el inherente contenido de agua de los mismos residuos.

En la **Figura 1**, se puede apreciar como el ciclo del agua interviene en la formación de los lixiviados, la cantidad y como se genera en los diversos rellenos sanitarios es variable, influyendo el clima en su producción porque la precipitación y las pérdidas mediante evaporación varían su volumen y, por ende, la concentración de sus diversos componentes.



**Figura 1.** Generación de lixiviados y ciclo de agua en un relleno sanitario. Adaptado de Renou *et al.*, (2007).

---

Es el líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que construyen los residuos y que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden filtrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo, de cuerpos de agua, y provocar su deterioro representando de esta forma un riesgo potencial a la salud humana y demás organismos vivos (NOM-083-SEMARNAT-2003).

### **2. 1. 1. Composición de los lixiviados**

Existen factores que afectan la composición de los lixiviados como la edad de los residuos, las condiciones climáticas, el diseño y operación del sitio de disposición final, el tipo de residuos. Pueden identificarse tres principales clases de contaminantes de los lixiviados que representan un riesgo.

- Contaminantes inorgánicos: (iones de amonio, calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, sulfatos, cloruros, sales metálicas; metales pesados como cobre, cadmio, cromo, plomo, níquel, zinc, etc.).
- Contaminantes orgánicos fácilmente biodegradables: (materia orgánica disuelta, ácidos grasos volátiles); y compuestos orgánicos xenobióticos.
- Microorganismos y patógenos: (bacterias de los géneros *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Streptococcus*, *Acinerobacter*, *Aeromonas*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Micrococuss*, *Pseudomonas*; hongos y levaduras; coliformes y virus).

Se presentan las concentraciones máximas y mínimas reportadas de indicadores encontrados en los lixiviados, de componentes inorgánicos y los compuestos orgánicos (**Anexo 1; Tabla 1 y 2**).

---

### 2. 1. 2. Tipos de lixiviados

La cantidad de los lixiviados de los rellenos sanitarios varía enormemente con su tiempo de residencia (Wu *et al.* 2015), por lo tanto, éstos se pueden clasificar en función de su edad como biodegradables jóvenes, maduros o intermedios, y estabilizados o viejos (**Anexo 1; Tablas 3 y 4**).

Los lixiviados de tipo joven contienen grandes cantidades de materia orgánica de bajo peso biodegradable, y concentraciones altas de ácidos grasos volátiles que son producto de la fermentación anaerobia que ocurre en el relleno sanitario. La alta cantidad de humedad y agua de los residuos sólidos promueve la fermentación ácida (Wang *et al.*, 2013). La fase de formación de este tipo de lixiviados es la fase ácido génica en la cual se da la formación de ácidos grasos volátiles que pueden llegar a presentar hasta el 95 % del contenido orgánico.

Los lixiviados intermedios se caracterizan por la presencia de cargas sustanciales de DQO (4,00-10,000 mg O<sub>2</sub>/L), una biodegradabilidad media (DBO<sub>5</sub>/DQO de 0.1 a 0.3), ácidos grasos volátiles y pH cercano a 7.

Los lixiviados viejos son resultado de la fase metano génica que se desarrollan en los desechos (Renou *et al.*, 2007). Los lixiviados viejos o estabilizados poseen contaminantes de alto peso molecular, que no son fácilmente biodegradables, moderadas cantidades de DQO (<3,000 mg O<sub>2</sub>/L), una relación DBO<sub>5</sub>/DQO menor a 0.1 y un pH mayor a 7.5 unidades.

---

### 2. 1. 3. Caracterización del lixiviado

Tomando en cuenta los estudios realizados por Ríos Palacios, (2016) muestran la caracterización del lixiviado del relleno sanitario de Bacalar.

Concluyendo con los datos reportados en la (**Tabla 1**) los valores mínimos y máximos obtenidos en los lixiviados de los diferentes muestreos realizados para sus pruebas de biosorción.

En base a los datos presentados se puede observar que el pH de los lixiviados del relleno sanitario de Bacalar es ligeramente alcalino pues se encuentra entre las 7.25 y 8.50 unidades.

De acuerdo con Renou *et al.* (2007) los lixiviados de tipo intermedio tienen un pH de entre 6.5 y 7.5 unidades y los lixiviados estabilizados poseen un pH mayor a 7.5 unidades, entonces, tomando en cuenta únicamente el pH, los lixiviados utilizados en el presente trabajo es un lixiviado intermedio, características de un lixiviado de entre 5 a 10 años.

**Tabla 1. Características fisicoquímicas de los lixiviados del relleno sanitario de Bacalar, (Ríos Palacios., 2016).**

| <b>Parametro</b>       | <b>Rango</b>  |
|------------------------|---------------|
| pH                     | 7.25 - 8.50   |
| DBO5 (mg/L)            | 37 - 85.2     |
| DQO (mg/L)             | 1407 - 1843   |
| COT (mg/L)             | 196 - 221     |
| Relación DBO5/DQO      | 0.025 - 0.060 |
| Conductividad mS/cm    | 5.01 - 6.70   |
| Turbiedad (NTU)        | 11.9 - 17.4   |
| Metales pesados (mg/L) |               |
| Hg                     | 0.0035533     |
| As                     | 0.002873      |
| Pb                     | < LD          |
| Cd                     | < LD          |
| Cu                     | 0.2107        |
| Cr                     | < LD          |
| Ni                     | 0.269         |

## **2. 2. Ecotoxicología**

La eco-toxicología estudia y analiza los efectos de agentes químicos y físicos sobre organismos vivos, con particular atención a poblaciones y comunidades de ecosistemas definidos. La eco-toxicología aplicada tiene como objeto el desarrollo de protocolos de ensayo para ser utilizados como herramientas de predicción tempranas que permitan definir umbrales permisibles, con niveles de incertidumbre aceptables, y sirvan de guía a las entidades reguladores para la toma de decisiones (Day *et al.*, 1988).

La eco-toxicología tiene como objetivo el desarrollo de protocolos de ensayo para ser utilizados como herramientas de predicción tempranas que permitan definir umbrales permisibles. La evaluación de riesgo ecológico es un proceso de asignación de magnitudes y probabilidades a los efectos adversos de actividades antrópicas y catástrofes naturales;

---

recurre tanto a métodos predictivos para la evaluación de la exposición. Como de los efectos de sustancias tóxicas a distintos niveles de organización y escala trófica. Los ensayos de toxicidad son los ensayos empleados para reconocer y evaluar los efectos de los contaminantes sobre la biota. En los bioensayos se usa un tejido vivo, organismo, o grupo de organismos, como reactivo para evaluar los efectos de cualquier sustancia fisiológicamente activa, bajo condiciones experimentales específicas y controladas estos efectos pueden ser tanto de inhibición como de magnificación, evaluados por la relación de los organismos, tales como la muerte, crecimiento, proliferación, multiplicación, cambios morfológicos, fisiológicos o histológicos (López Martínez, 2009).

### **2. 3. Bioensayos**

Durante los últimos años se han desarrollado numerosos bioensayos, estandarizados para estudiar los efectos de diversos contaminantes en el agua o en sedimentos utilizando adultos, larvas o embriones de numerosas especies marinas, pelágicas y bentónicas, como son: anfípodos, poliquetos, copépodos, anélidos, moluscos, peces, etc.

La selección de los organismos indicadores en la prueba es determinada por su relevancia, prevalencia, accesibilidad, simplicidad de mantenimiento y cultivo, bajo costo, efectos de cuantificaciones y observaciones fáciles (Angulo Poot., 2013).

En forma general, según el objetivo de los bioensayos, se distinguen los siguientes tipos según Angulo (2013):

- De toxicidad (eco toxicidad). Se estudian los efectos de una sustancia o una mezcla compleja sobre el comportamiento, reproducción, crecimiento y la sobrevivencia de los organismos indicadores.
- De bioacumulación. Se evalúa el potencial de bioacumulación de xenobióticos en los tejidos orgánicos.
- De estimación. Se evalúa el efecto de una sustancia sobre el crecimiento poblacional en productores primarios.
- Crecimiento corporal. Se evalúa el efecto sobre la tasa de crecimiento individual
- Respuesta de la comunidad (in situ). Se evalúa el efecto sobre la estructura y composición de las comunidades.

---

Los bioensayos, son definidos como el método utilizado para evaluar la potencia relativa de un agente tóxico (químico o no) sobre un organismo vivo, a través de la comparación de ese agente con el efecto de una solución patrón o estándar. La prueba de toxicidad corresponde al método utilizado para detectar y evaluar la capacidad de un agente dado para producir efectos tóxicos sobre los sistemas biológicos, es caracterizar la relación dosis-respuesta del agente (Escobar Malaver., 2009).

La determinación de la concentración letal media ( $CL_{50}$ ) indica el nivel de toxicidad aguda de diferentes contaminantes y eso se puede realizar con ayuda de organismos de prueba (bioensayos), los cuales por sus características (ser sensible, de gran abundancia, tener información de su comportamiento) pueden ser bioindicadores de contaminación. Un organismo de prueba son los poliquetos, que, por su gran abundancia y su distribución geográfica; es considerado un organismo capaz de ayudar a evaluar la contaminación que existe en la bahía de Chetumal Quintana Roo.

### **2. 3. 1. Bioensayo de toxicidad aguda**

Las pruebas de toxicidad aguda y crónica se diferencian básicamente en el nivel y duración de la exposición. En los ensayos de toxicidad aguda, se expone al organismo prueba a concentraciones de la sustancia tóxica que garanticen una respuesta en un corto tiempo en relación con el ciclo de vida. Dado que la duración del ciclo de vida varía según la especie, la extensión de la prueba difiere entre 48 y 96 horas o incluso se puede prolongar por dos o tres semanas. A pesar de que una de las mayores críticas a los ensayos de toxicidad aguda es que altas concentraciones de contaminantes no se presentan frecuentemente en los ambientes acuáticos, esta técnica permite inferir las fuentes principales de contaminación, establecer el valor antibiótico de efluentes industriales y domésticos y usar factores de aplicación para estimar niveles de seguridad. Además, este tipo de ensayos constituyen una herramienta adecuada para establecer la sensibilidad relativa de los organismos (Sierra Ramírez., 2011).

---

## **2. 4. Organismo de prueba**

De acuerdo con el estudio de la distribución espacial y temporal de poliquetos (Polychaeta: Annelida) de la Bahía de Chetumal Quintana Roo (Nah Song., 2016), nos señala cuales son los sitios con mayor abundancia de *Laeonereis culveri* para utilizarlos como organismos de prueba, por lo que se estableció que el mejor lugar para coleccionar los organismos de prueba, de acuerdo a las siguientes coordenadas: 18°31'39.07" N y 88°15'57.52" O, debido a que es una zona libre de descargas residuales u otro tipo de contaminante en la Bahía de Chetumal Quintana Roo.

### **2. 4. 1. *Laeonereis culveri* (POLYCHAETA)**

Los poliquetos anélidos son un componente importante, a menudo predominante de la biota marina y estuarina. En ambientes bénticos, comprenden entre el 30 y el 75 % de todas las especies de macro invertebrados (APHA, 1992). Estos organismos son importantes no solo para determinar si una zona está contaminada, sino también el grado de contaminación. Los poliquetos se han convertido en organismos indicadores experimentales útiles en la medición de efectos agudos, crónicos y sub-letales, de diversos contaminantes (Salazar Vallejo *et al.*, 2008).

### **2. 4. 2. Importancia de *Laeonereis culveri***

Los poliquetos que son objeto de estudio en el presente trabajo, por su importancia ecológica, ya que estos organismos son vitales para la estructura, producción, dinámica y salud de los bentos y del ambiente marino. Además, ayudan a la deposición, descomposición, incorporación y recambio de materia orgánica en el lecho marino, contribuyendo al reciclaje de nutrientes en la columna de agua. Desde el punto de vista de balance energético, constituyen una fuente de alimento valiosa para muchos organismos marinos pues participan significativamente de la cadena alimentaria de poblaciones bentónicas, y constituyen con un 80 % del alimento ingerido por algunas especies de peces de importancia económica (Amaral *et al.*, 1980). Aun cuando la importancia ecológica de estos organismos sea grande, en México es escaso el conocimiento en el uso de pruebas eco-toxicológicas, ya que esta área del conocimiento es relativamente reciente en nuestro país.



---

En el presente trabajo se utilizó *Laeonereis culveri* de la familia Nereididae que es una de las más importantes de la clase Polychaeta, debido a su gran diversidad y abundancia en prácticamente todos los fondos marinos de poca profundidad y debido a sus características morfológicas son los más usados como indicadores. De igual manera, el motivo de su elección como organismo de prueba es dado por su importancia ecológica, su alta sensibilidad, su tipo de alimentación, abundancia y su distribución geográfica en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo. Así mismo, forman parte de la dieta de peces de importancia económica, macro invertebrados bentófilos de la región, los cuales son relativamente fáciles de muestrear. (Nah Song., 2016)

## **2. 5. Concentración Letal Media (CL<sub>50</sub>)**

Se refiere a la concentración de la sustancia en agua, suelo o sedimento que se estima letal para el 50 % de los organismos de ensayo. La CL<sub>50</sub> y sus límites de confianza (95 %) son usualmente derivados de análisis estadísticos (Catillo Morales *et al.* 2004).

Los resultados de las pruebas de toxicidad aguda generalmente se caracterizan por la concentración letal media, cuando la mortalidad es el punto final. La CL<sub>50</sub> es una estimación de la verdadera concentración letal del material del ensayo para todas las especies utilizadas. Por lo tanto, también proporciona una medida de confianza estadística en la estimación puntual, con un intervalo de confianza del 95 %.

Los procedimientos paramétricos transforman los datos de dosis-respuesta de una forma funcional conocida o que se espera antes de la determinación de la CL<sub>50</sub>. El método probit probablemente es el procedimiento más ampliamente utilizado de cálculo de CL<sub>50</sub> y usa la transformación probit de los datos de mortalidad en combinación con una técnica de ajuste de curvas estándar. Un segundo procedimiento paramétrico utiliza una transformación logit de los datos de mortalidad. Las desventajas comunes de los métodos computacionales paramétricos es que las propiedades de los datos de distribución deben cumplir los modelos de hipótesis o la CL<sub>50</sub> producida no se considera apropiada. Los métodos probit y logit producen curvas dosis-respuesta simétricas, y no son válidas si la verdadera curva es asimétrica (APHA *et al.*, 1999).



## Capítulo III

### MÉTODOS Y MATERIALES

---

### III. Métodos y materiales

#### 3. 1. Método de Campo

Se recolectaron especímenes vivos de *Laeonereis culveri*, del sedimento entre 5 y 10 metros de distancia de la línea de costa, así como también, sedimento y agua de la bahía para aclimatarlos, también se colectó varias muestras del lixiviado del relleno sanitario para evaluar su toxicidad.

Los organismos de prueba *Laeonereis culveri*, se colectaron en una zona libre de descargas directas de agua residuales (18°29'38.18" N y 88°17'16.37" O) como lo sugieren Uc Peraza y Delgado Blas (2015).

Estos organismos se colectaron con ayuda de un nucleador de PVC de 11 cm de diámetro y 25 cm de largo, (**Figura 2**); la muestra se tamizó con dos aberturas de mallas de 1 y 0.5 mm. Para poder manipular fácilmente y evitar fragmentación de los organismos se utilizaron pipetas de plástico de 3 ml de capacidad de succión y cada organismo se colocó en un vial con agua del sitio de muestreo, con la finalidad de que no se contraigan los organismos y evitar el estrés de los mismos, los sedimentos se colectaron con un nucleador y se transportaron en una bolsa de plástico sellada. Se obtuvo del mismo sitio, agua y se transportó en un garrafón de plástico con capacidad de 20 Litros, esta agua solamente fue utilizada en la etapa de aclimatación. De igual forma se midieron los parámetros fisicoquímicos, como la salinidad (refractómetro), temperatura (termómetro de mercurio), oxígeno disuelto (oxímetro marca HANNA modelo HI 9142) y pH (potenciómetro HANNA modelo HI 991001), con el fin de mantenerlos en condiciones más semejantes a su hábitat durante los bioensayos.



*Figura 2. Recolección de organismos de *Laeonereis culveri* en la Bahía de Chetumal.*

### **3. 2. Laboratorio (Selección, identificación y aclimatación de los organismos)**

Posteriormente se seleccionaron en el laboratorio los organismos adultos de *Laeonereis culveri* de aproximadamente 10 a 15 mm de longitud, descartando aquellos que presentaban una coloración pálida, tuvieran poco movimiento o se encontraban fragmentados (Uc Peraza y Delgado Blas, 2015). La especie de estudio se identificó mediante observación en un microscopio óptico y un estereoscopio (**Figura 3**), utilizando las claves de García Garza (2009).

El material biológico que no pertenecía a la familia Nereididae fue regresado al medio.



*Figura 3. Selección e identificación de organismos de *Laeonereis culveri*.*

---

Los organismos seleccionados se colocaron en peceras de 3 litros de capacidad con agua y sedimento tratado del sitio de muestreo, con aplicación de aireación constante, conservándolos a temperatura de laboratorio ( $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ) y con un ciclo de luz-oscuridad natural, donde se llevó a cabo la aclimatación durante 2 días completos antes de la realización de los bioensayos. No se les proporciono alimento, ya que, por naturaleza, estos organismos se alimentan de la materia orgánica presente en el sedimento.

Durante la aclimatación se midieron los parámetros temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad con el mismo equipo empleado para realizar las mediciones en el sitio de muestreo.

### **3. 2. 1. Preparación de sedimento**

Se tamizo la muestra de sedimento recolectada en la bahía con un tamiz de abertura de malla de 0.5 mm para su uso en las pruebas eco-toxicológicas y en la aclimatación, eliminando así cualquier otro organismo presente en la muestra que pudiera depredar a los organismos de prueba. Una vez tamizado el sedimento, se esperaron aproximadamente 30 minutos para permitir la precipitación, después, se retiró el agua sobrante del recipiente. Posteriormente se procedió a refrigerar el sedimento durante 48 horas a  $2^\circ \text{C}$ , con el objetivo de reducir la posibilidad de acciones de óxido-reducción y eliminar otros organismos no deseados.

---

Finalmente, 10 g de sedimento tratado fue introducido en los recipientes de plástico de cada bioensayo y sus respectivas réplicas (**Figura 4**). Dicha cantidad proporciona aproximadamente 5 mm de grosor de sedimento; lo cual permite realizar de forma rápida la búsqueda de los organismos durante la prueba eco-toxicológica y también es una cantidad suficiente para garantizar su sobrevivencia.



*Figura 4. Introducción de 10 g de sedimento tratado en los recipientes.*

### **3. 2. 2. Preparación de agua salina**

Se añadió sal marina marca Oceanic® al agua destilada para preparar una solución con la misma salinidad que la del sitio de muestreo (9%). Así, se evita la afectación de resultados por algún posible tóxico presente en el agua de la bahía que pudiera desencadenar una reacción química con el lixiviado utilizado.

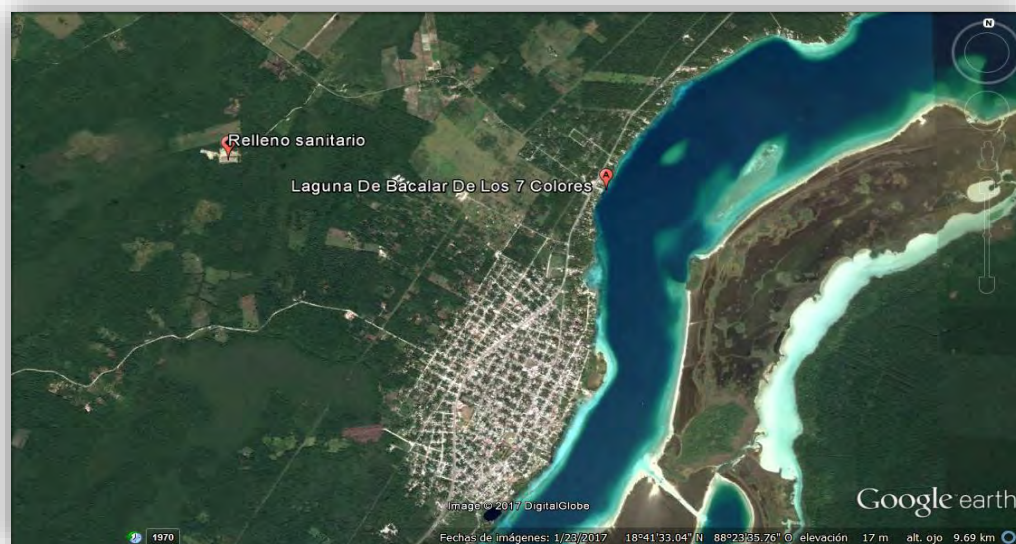
### 3. 3. Recolección del lixiviado

El lixiviado fue extraído de la laguna de lixiviados del relleno sanitario ubicado municipio de Bacalar que colinda en la parte Norte con el municipio de Felipe Carrillo Puerto y al sur con el municipio de Othón P. Blanco, está ubicado en las coordenadas geográficas 18°42'16.68" N y 88°25'32.17" O. Aproximadamente a unos 30 minutos o 45 kilómetros de la ciudad de Chetumal, capital del estado (Hernández-Pech., 2016).

Entre sus actividades económicas que se realizan en todo el municipio son 80% rural;

- Actividad agrícola: siembra de maíz, frijol, sorgo, soya y piña
- Actividad pecuaria: cría de ganado (bovino y ovino)
- Actividad forestal (aprovechamiento maderable) y hortalizas (invernaderos)
- Actividad apícola: producción de miel
- El otro 20 % corresponde a las actividades turísticas y de servicios. (Hernández-Pech, 2016).

Se evaluó la toxicidad del lixiviado del relleno sanitario del municipio de Bacalar del estado de Quintana Roo. Por su ubicación, se puede apreciar su relativa cercanía a la Laguna Azul (**Figura 5**).



*Figura 5. Mapa de ubicación del relleno sanitario de Bacalar municipio del Estado de Quintana Roo visto en Google Earth.*

---

Se realizaron varias visitas a la laguna de lixiviado del relleno sanitario de Bacalar para la colecta del lixiviado la primera fue a principios de Junio; se colectó 4 Litros de muestra de lixiviado por lo que pudiera suceder accidentalmente ( por ejemplo pérdida de contaminante por error de medición, etc. ), ésta se obtuvo directamente de la laguna del lixiviado con ayuda de una botella de plástico de 4 Litros de capacidad; sujeta a una cuerda de un metro aproximadamente, colocando así, junto a la boquilla de la botella y la cuerda; un objeto cualquiera ( una rondana con forma redonda que tenía un orificio en medio donde se sujetó con la cuerda a la boquilla de la botella ), este sirvió de peso para el hundimiento de la botella de esta forma se lanzó lentamente a la laguna sin soltar el extremo de la cuerda y de esta manera se observó cuando la botella ya estaba llena de lixiviado y posteriormente se tensó la cuerda para obtener el lixiviado.

En la **Figura 6** podemos observar la posición, estructura y dimensiones de la laguna de Lixiviados en Bacalar, área donde fue colectada las diversas muestras.



**Figura 6. Dimensiones de la Laguna de Lixiviados del relleno sanitario de Bacalar. Vista con Google Earth.**



---

El muestreo fue de un día antes de llevar a cabo el bioensayo y se mantuvo en refrigeración a 4° C con el fin de mantener la calidad y propiedades del lixiviado extraído **(Figura 7)**.

El transporte de la muestra de la laguna del lixiviado fue en una nevera, debidamente sellado y tapado y puesto a temperatura ambiente una hora antes de su utilización.



*Figura 7. Recolección de lixiviado del relleno sanitario de la laguna de Bacalar.*

---

### 3. 4. Preparación de bioensayos

Se colocaron 10 organismos de *Laeonereis culveri* seleccionados de forma aleatoria en cada recipiente de plástico con capacidad de 250 ml, donde se había introducido previamente el sedimento preparado, y el porcentaje de agua salina (**Figura 8**). En total, se utilizaron 60 organismos por cada cámara de bioensayo exploratorio y 160 en bioensayo definitivo. Después se esperó un tiempo de aproximadamente 15 min con el objetivo de permitirles a los organismos introducirse en el sedimento para finalmente agregar el volumen del porcentaje de lixiviado correspondiente.

En el control de la cámara de bioensayo únicamente se colocaron los 10 organismos de prueba, sedimento tratado y 250 ml de la preparada agua salina.



**Figura 8.** *Agregación de lixiviado a cada uno de los recipientes.*

---

### 3. 4. 1. Disoluciones de prueba

Dichos factores se iniciaron con los siguientes porcentajes de concentración (100, 75, 50, 25 y 12.5 %) (Tabla 2).

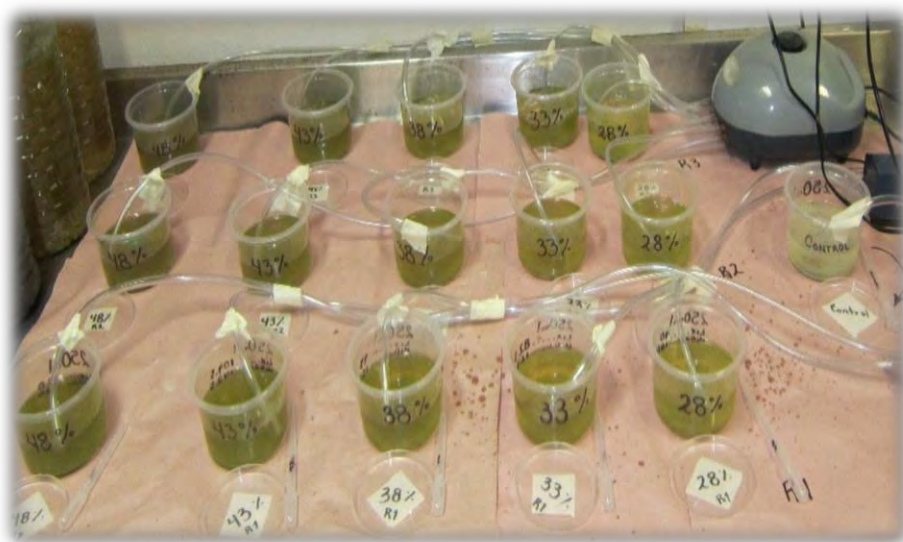
Posteriormente se calculó el volumen exacto de lixiviado y agua salina para preparar las 5 concentraciones de cada cámara de bioensayo, de tal manera que el volumen total para cada una sea de 250 ml a una salinidad de 20 %.

*Tabla 2. Cantidad de lixiviado y agua destilada utilizada en bioensayos.*

| <b>Concentraciones</b> | <b>Lixiviados</b>         | <b>Agua salina</b>         |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 48%                    | 120 ml                    | 130 ml                     |
| 43%                    | 107.5 ml                  | 142.5 ml                   |
| 38%                    | 95 ml                     | 155 ml                     |
| 33%                    | 82.5 ml                   | 167.5 ml                   |
| 28%                    | 70 ml                     | 180 ml                     |
| <b>Total</b>           | <b>475 ml = .475 Ltrs</b> | <b>775 ml = .775 Ltrs.</b> |
| Por tres replicas      | 1.425 Ltrs.               | 2.325 Ltrs.                |

### 3. 4. 2. Realización de bioensayo

Los bioensayos realizados fueron a 48 horas (**Figura 9**), se aplicó la prueba estática por que la solución de lixiviado y los organismos estudiados se colocaron en cámaras y se mantienen ahí todo el tiempo que dura la prueba, con aplicación de aireación constante y sin alimento para los organismos, efectuando lecturas de mortalidad en los siguientes intervalos de tiempo de exposición: a 1, 2, 8, 16, 24, 36, y 48 horas. Los organismos muertos fueron contabilizados y retirados de los recipientes en cada lectura de mortalidad mediante pipetas de plástico y fueron reconocidos tomando en cuenta las consideraciones de APHA (1992): organismos inmóviles en la superficie del sedimento, hinchados y con la coloración pálida, un criterio para la validación de la prueba fue que en los grupos de control tienen que permanecer vivos al menos el 90 % de los organismos. Y se registró la lectura de mortalidad; (**Anexo 4**).



*Figura 9. Cámara de bioensayos del lixiviado al inicio de la prueba definitiva.*

Se midió los parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos, al momento en cada réplica de la cámara de bioensayo al inicio y al término de la prueba utilizando el mismo equipo de medición empleado durante el muestreo de campo.

---

### 3. 4. 3. Registro de mortalidad

Se realizó el registro del progreso de la mortalidad en una bitácora, de los bioensayos realizados; con la finalidad de conocer el porcentaje de concentración donde se encuentra la CL<sub>50</sub>. (Anexo 4).

### 3. 5. Calculo de la concentración letal media (CL<sub>50</sub>)

La CL<sub>50</sub> a 48 horas del lixiviado en *Laeonereis culveri* se calculó utilizando el método probit (APHA, 1992) con intervalos de confianza del 95 %. Los resultados se graficaron como curvas de regresión de los valores del probit empírico contra el logaritmo de la concentración.

#### 3. 5. 1. Análisis estadístico

Para conocer el comportamiento general de los datos obtenidos de las pruebas de toxicidad aguda, se realizó un análisis estadístico exploratorio. Posteriormente se realizó la prueba de normalidad (con el residuo de la variable mortalidad) y una vez que se cumplió el requisito de normalidad de los datos, se procedió a llevar a cabo el análisis de varianza ANOVA de una vía con un nivel de confianza del 95 %; con la finalidad de analizar las diferencias entre las concentraciones y las réplicas, tomando la mortalidad de *L. culveri* a 48 horas como la variable de respuesta

- **Hipótesis nula = Ho:** Los datos poseen distribución normal.
- **Hipótesis alterna = Ha:** Los datos no poseen distribución normal.

Al denotarse diferencias estadísticas se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Los análisis estadísticos fueron realizados con un software especializado STATISTICA en su versión 7.1.

---

### 3. 5. 2. Estimación del grado de Toxicidad

Para determinar la toxicidad del lixiviado, se calculó de acuerdo con la metodología que establece la norma mexicana NMX-AA-112-1995-SCFI, en la cual nos indica los procedimientos para calcular las Unidades de Toxicidad aguda (U. T.), mediante la siguiente ecuación:

$$UT = \frac{1}{CL_{50}} \times 100$$

La clasificación del grado de toxicidad del Lixiviado. Se determinó con ayuda de la siguiente **Tabla 3**:

*Tabla 3: Clasificación de toxicidad basada en Unidades de Toxicidad. Fuente Saldaña et al., 2002.*

| <b>Clasificación</b> | <b>Toxicidad (UT)</b> |
|----------------------|-----------------------|
| Altamente Tóxico     | > 4                   |
| Tóxico               | 2 – 4                 |
| Moderadamente tóxico | 1.33 – 1.99           |
| Ligeramente tóxico   | < 1.33                |



## Capítulo IV

### RESULTADOS

---

## IV. Resultados

Con la finalidad de mantener aclimatados a los organismos de prueba, se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: conductividad, densidad, temperatura, pH, salinidad y oxígeno disuelto (**Tabla 4**).

*Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos registrados in situ.*

| Parámetros fisicoquímicos |            | Valores |
|---------------------------|------------|---------|
| Conductividad             | (CE)       | 23.9    |
| Densidad                  | ( $\rho$ ) | 1.014   |
| Temperatura               | (T)        | 30.7    |
| Ph                        |            | 6.28    |
| Salinidad                 | (%)        | 9       |
| Oxígeno Disuelto          | (ml/L)     | 7.6     |

### 4. 1. Bioensayos exploratorios

Se realizó primeramente un bioensayo exploratorio del lixiviado con las siguientes concentraciones: 100, 75, 50, 25 y 12.5 % para determinar la  $CL_{50}$  de *Laeonereis culveri*. El resultado del análisis exploratorio determinó que la  $CL_{50}$  se encontraría en el siguiente rango: 48, 43, 38, 33 y 28 %.



---

#### 4. 2. Resultados de la mortandad de organismos en la cámara de bioensayos de lixiviados

De acuerdo con la lectura de la mortalidad de organismos de *Laeonereis culveri* en la cámara de bioensayo de lixiviado (**Anexo 4**) se obtuvieron los siguientes resultados. De un total de 30 organismos expuestos por concentración; en la concentración del 28 % de lixiviado se registraron 7 organismos muertos, constituyendo el (23.3 %) en la concentración del 33 % murieron 9 organismos (30 %), en la concentración 38 % murieron 13 organismos (43.3 %) en la concentración del 43 % murieron 16 organismos (53.3 %), y en 48 % murieron 19, constituyendo el (63.3 %) (**Tabla 5**).

**Tabla 5. Resultados de mortandad de *Laeonereis culveri* en la cámara de bioensayos de lixiviado.**

| Concentración | No. De organismos expuestos | No. Organismos muertos | Mortalidad % |
|---------------|-----------------------------|------------------------|--------------|
| Control       | 10                          | 0                      | 0%           |
| 28%           | 30                          | 7                      | 23.30%       |
| 33%           | 30                          | 9                      | 30%          |
| 38%           | 30                          | 13                     | 43.30%       |
| 43%           | 30                          | 16                     | 53.30%       |
| 48%           | 30                          | 19                     | 63.30%       |

---

#### 4. 3. Valor probit empírico asociado a los porcentajes de mortalidad y log concentración de las concentraciones de la cámara de bioensayos de lixiviados.

El Logaritmo de la concentración de 28 ml es 1.447, de 33 ml es 1.518, de 38 ml es 1.579, de 43 ml es 1.633 y de 48 es 1.681.

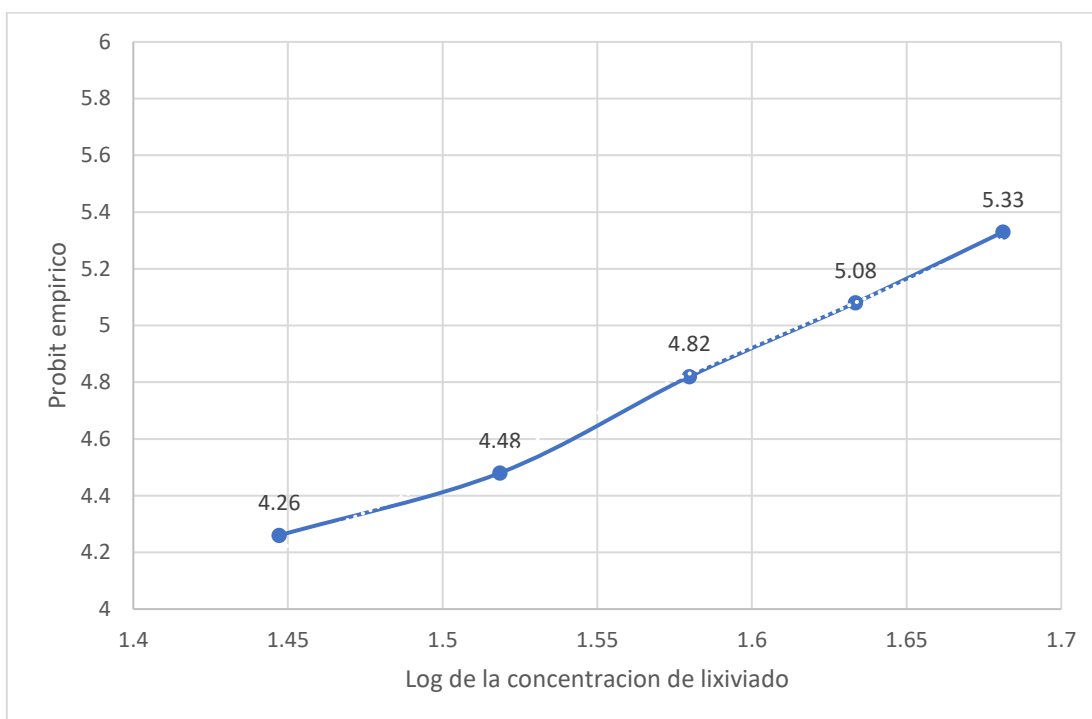
Los valores Probit empírico asociado a los porcentajes de mortalidad 28 % (4.26), 33 % (4.48), 38 % (4.82), 43 % (5.08), 48 % (5.33) se encuentran en la **Tabla 6**.

*Tabla 6. Probit empírico asociado a los porcentajes de mortandad y log de las concentraciones de la cámara de bioensayo del lixiviado.*

| Concentración | Log de la concentración | Mortalidad % | Probit Empírico |
|---------------|-------------------------|--------------|-----------------|
| 28%           | 1.447                   | 23.3         | 4.26            |
| 33%           | 1.518                   | 30           | 4.48            |
| 38%           | 1.579                   | 43.3         | 4.82            |
| 43%           | 1.633                   | 53.3         | 5.08            |
| 48%           | 1.681                   | 63.3         | 5.33            |

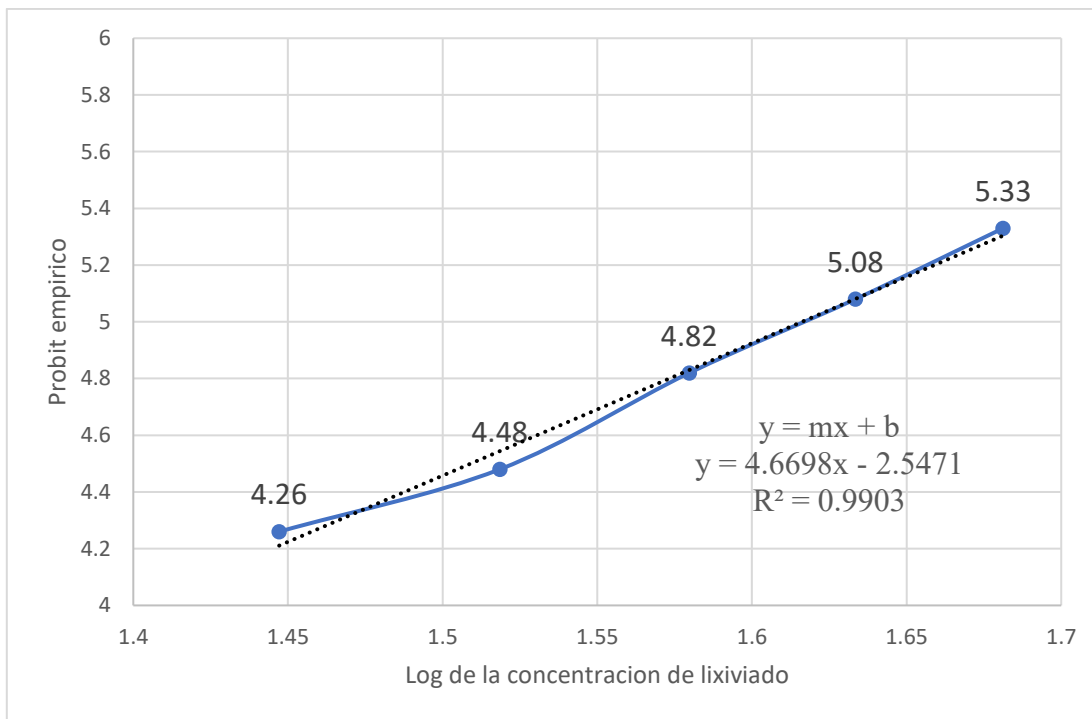
#### 4. 4. Concentració Letal media ( CL<sub>50</sub> ) de Lixiviados en *Laeonereis culveri*

En la **Figura 10** se encuentra la gráfica del logaritmo de la concentración del lixiviado (eje X) contra el valor probit empírico correspondiente a cada porcentaje de mortandad (eje Y).



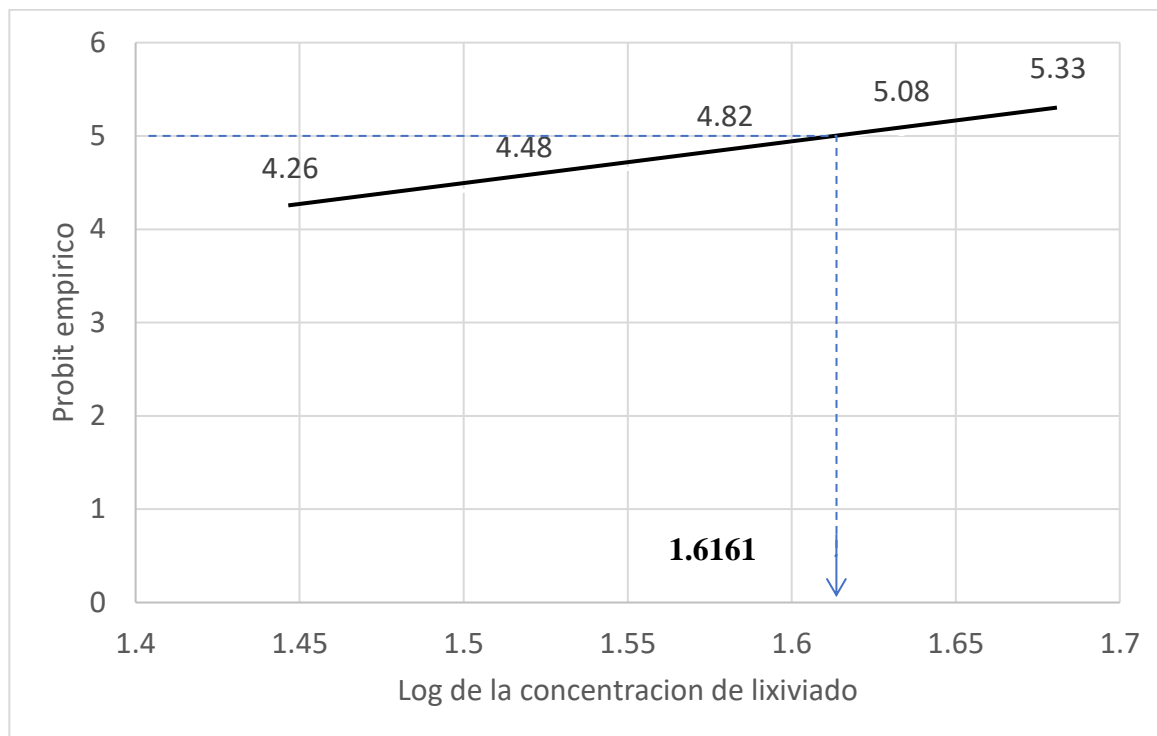
**Figura 10.** Grafica del Log de la concentración de lixiviado contra el valor probit.

Seguidamente en la **Figura 11**, se encuentra el ajuste de la recta obtenida correspondiente a la siguiente ecuación  $y = 4.6698x - 2.5471$ ; donde “y” es el valor probit, “x” es el Log de la concentración y 4.6698 es el valor de la pendiente.



**Figura 11.** Recta resultante del ajuste por mínimos cuadrados de Log de la concentración de lixiviados contra el valor probit.

En la **Figura 12** se observa la gráfica de la recta ajustada por mínimos cuadrados a la cual se le trazó una línea perpendicular al eje Y en el valor probit empírico 5, que corresponde a un 50 % de mortalidad, y que en su punto de intersección con la recta ajustada se proyectó hacia el eje X, lo cual nos indica el Log de la concentración de lixiviado que elimina la mitad de la población de *L. culveri* (Log CL<sub>50</sub>), que en este caso es de **1.6161**.



**Figura 12. Representación gráfica de Log de la CL<sub>50</sub> a 48 horas del lixiviado en *L. culveri*.**

Al aplicar el Antilogaritmo al Log de la CL<sub>50</sub> se obtuvo el valor de la CL<sub>50</sub> a 48 h del lixiviado en *L. culveri* con un intervalo de confianza del 95 %, el cual es de **43.31426 ml/L**.

---

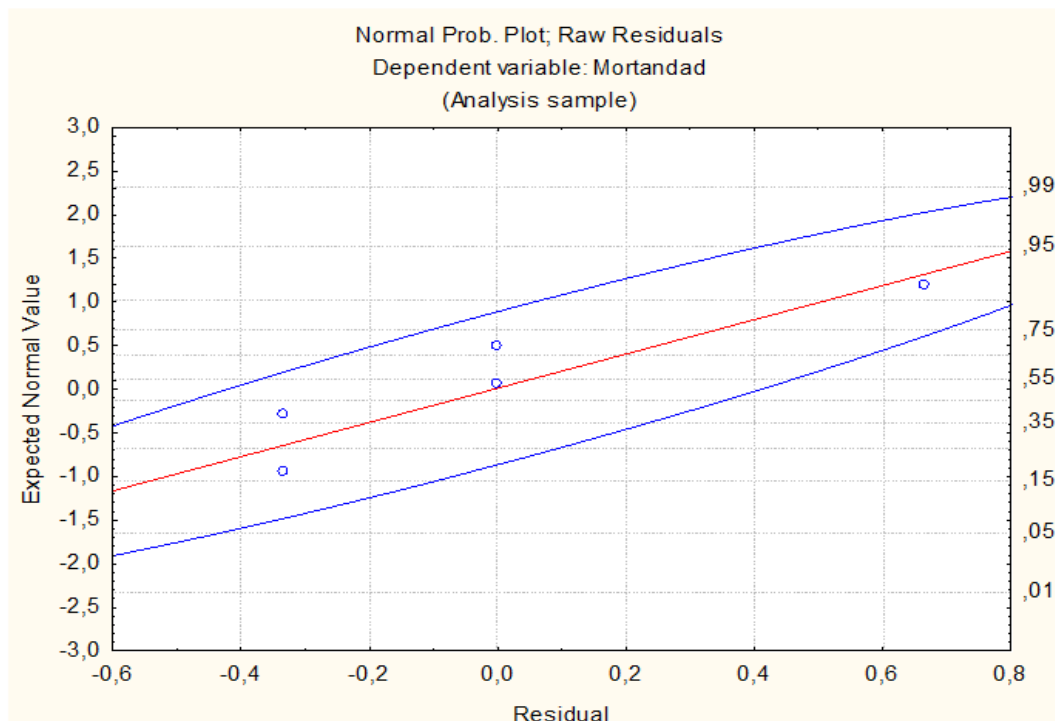
#### 4. 5. Análisis estadístico de la cámara de bioensayo de lixiviado

Al realizar el análisis estadístico exploratorio de la variable dependiente (mortalidad) se encontraron los valores de la **Tabla 7**.

*Tabla 7. Estadística descriptiva de la variable dependiente número de muertos de la cámara de bioensayo de lixiviado*

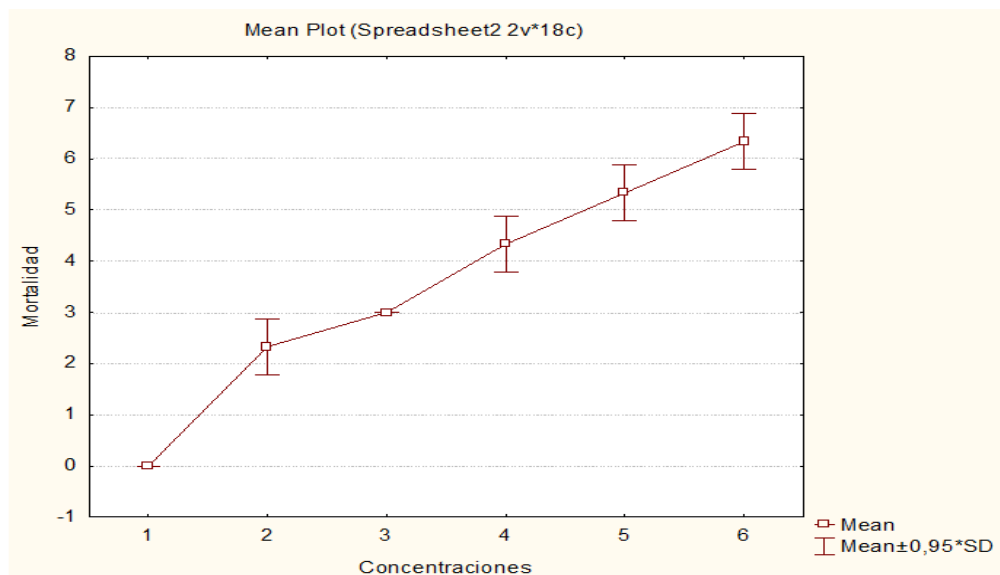
| <b>Variable dependiente</b>          | <b>Mortalidad</b> |
|--------------------------------------|-------------------|
| No de valores                        | 6                 |
| Media                                | 10.6667           |
| Límite de confiabilidad inferior 95% | 35.3333           |
| Límite de confiabilidad superior 95% | 50                |
| Mediana                              | 11                |
| Mínimo                               | 0                 |
| Máximo                               | 19                |
| Amplitud                             | 19                |
| Varianza                             | 46.66667          |
| Desv. estándar                       | 6.831301          |

Se encontró que el comportamiento de los datos de la variable dependiente tiene una distribución normal mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk (  $W = 0,960422$ ,  $P = 0,776943$  ) al cumplirse la condición  $p > 0.05$ . De forma gráfica se puede observar que los valores esperados de normalidad se encuentran dentro del elipse de confianza del 95 % (Figura 13).

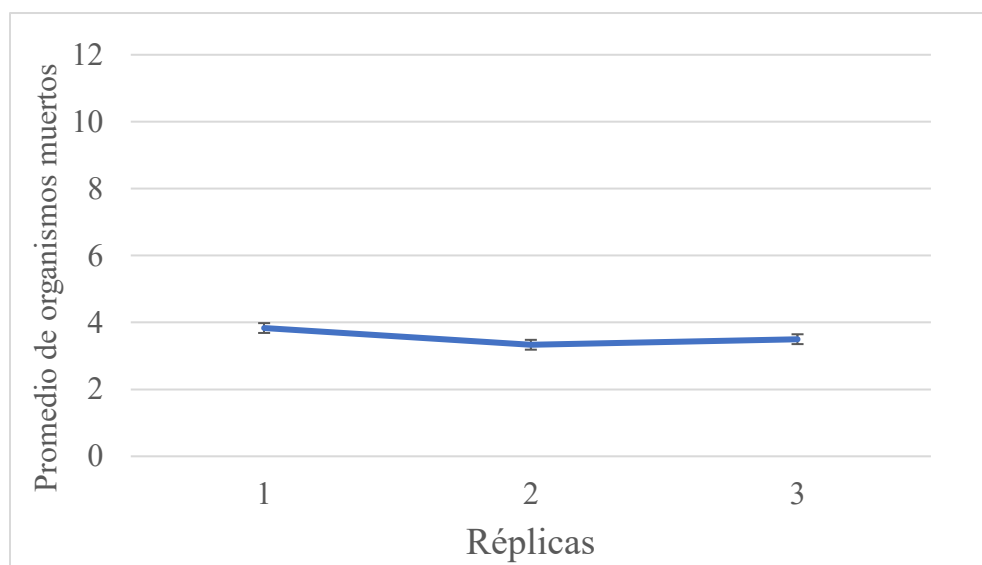


*Figura 13. Normalidad y elipse de confianza del 95 % de la variable dependiente de la cámara de bioensayo del lixiviado.*

El análisis de varianza ANOVA demostró que existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las concentraciones de Lixiviados y su mortalidad respectiva (**Figura 14**). Por el contrario, al realizar el mismo análisis entre las 3 réplicas y su mortalidad se encontró que no existen diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) como se muestra en la Figura 15.



**Figura 14.** Promedio y errores estándar de organismos muertos por concentración de lixiviados.



**Figura 15.** Promedios y errores estándar de organismos muertos por réplica de la cámara de bioensayo de lixiviado.



---

#### 4. 6. Clasificación de la Toxicidad del Lixiviado

El valor de la CL<sub>50</sub> a 48 horas del lixiviado en *L. culveri* se empleó para obtener las unidades de toxicidad (U.T. = 2.4201897), lo cual, comparado con la clasificación de toxicidad basada en unidades de toxicidad por medio de formula señalada por (Saldaña *et al.*, 2002) se obtuvo que el lixiviado se clasifica como Tóxico para dicho organismo utilizado de prueba (**Tabla 8**).

$$UT = \frac{1}{CL_{50}} \times 100$$

*Tabla 8. Clasificación de Toxicidad del lixiviado en L. culveri.*

| Clasificación | Toxicidad (U.T.) |
|---------------|------------------|
| Tóxico        | 2.42018974       |



## Capítulo V

## DISCUSIÓN

---

## V. Discusión

Existe el riesgo de que estos lixiviados causen efectos adversos a los organismos del sistema acuático, principalmente a los organismos del bentos, debido a sus características de reducida o nula locomoción y su alimentación, por lo que son más vulnerables al grado tóxico del lixiviado (Wallace *et al.*, 1993), ya que los sedimentos constituyen un reservorio natural de contaminantes (Rojas-Mayorquín, 2011). La toxicidad presente puede deberse a efectos resultantes de la interacción de uno o más sustancias presentes en las muestras ensayadas (Torres-Rodríguez *et al.*, 2006) o relacionarse a la edad del lixiviado (Rivera-laguna *et al.*, 2013).

Flores-Tena *et al.* (2010), evaluaron la toxicidad de lixiviados de biosólidos en *Nannochloris oculata*, *Oreochromis niloticus*, *Lecane quadridentata* y *Limnodrilus hoffmeisteri*. Resultando, *O. niloticus* más sensible con una CL<sub>50</sub> al 8.6 % de concentración, *L. quadridentata* al 42.4 % y por sus características morfológicas similares a la especie estudiada *L. hoffmeisteri*, presenta una gran tolerancia a los lixiviados, ya que al 80 % de concentración se registra un 6 % de mortalidad, pudiendo relacionarse las muertes de esta especie a factores de pH y salinidad, debido a que sus rangos de tolerancia de pH oscilan entre 6.5 y 8.5, y el pH del lixiviado ensayado fue de 8.92. Por su parte los especímenes de *L. culveri* ensayado en este trabajo toleran un pH alrededor de 6.28, por lo que las muertes pudieron deberse a la perturbación de los rangos de tolerancia del mismo. *L. culveri* ya que resultó ser más sensible a los lixiviados, presentando una CL<sub>50</sub> de 41.31 %.

Las características fisicoquímicas y biológicas de los lixiviados mantienen una estrecha relación con su edad (Foley *et al.*, 2012), por ejemplo, el pH aumenta conforme aumenta la edad del lixiviado, mientras que la DQO, DBO y COD tienden a disminuir (Rivera-laguna *et al.*, 2013). En el estudio efectuado por Rivera-Laguna *et al.* (2013) determinaron la toxicidad de lixiviados empleando como bioindicador a *Daphnia pulex*, en pruebas estáticas y agudas a 48 horas, obtuvieron una CL<sub>50</sub> de 83.1, 47.7 y 27.7 % de concentración para el lixiviado joven, intermedio y maduro, respectivamente; la CL<sub>50</sub> del lixiviado del presente estudio es de 41.3 %, mismo que concuerda con la edad del lixiviado, entre intermedio y maduro, de igual forma es indicativo que *D. pulex* y *L. culveri* presentan

---

una sensibilidad similar ante el contaminante ensayado. La toxicidad y la edad de los lixiviados mantienen una relación inversamente proporcional, debido a que mayor edad del lixiviado es menos tóxico.

Las características de los lixiviados son muy variables, lo que puede atribuirse a la interacción de muchos factores, como son la composición y edad de los residuos, la disponibilidad de oxígeno y la humedad, el diseño y la operación del vertedero, la tasa de precipitaciones, la hidrología del lugar, la compactación, el diseño de la cobertura, los procedimientos de muestreo y la interacción entre los lixiviados y el ambiente (Vázquez Godina *et al.*, 2001) de acuerdo a los componentes de lixiviados procedentes de rellenos sanitarios se observa que predominan las concentraciones típicas más altas de los compuesto orgánicos; la demanda química de oxígeno (DQO) con 18, 000 mg/L, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) de 10, 000 mg/L y carbón orgánico total (COT) de 6, 000 mg/L, estas cifras son indicativas de la cantidad de materia orgánica presente en el contaminante, misma que pudo contribuir a la mortandad de *L. culveri*.

En el análisis de comportamiento sobre los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos de la ciudad de la Habana Espinosa-Lloréns *et al* (2010), observó que las concentraciones de DQO y DBO durante la época de lluvia son mayores que las obtenidas en época de secas, relacionándose a la presencia de grandes cantidades de materia orgánica debido a la ausencia de sistemas de recogida clasificada de los residuos sólidos urbanos (RSU). Este estudio se efectuó dentro la época de secas (Junio), obteniéndose una CL<sub>50</sub> en 41.31%, sin embargo esto no es indicativo que en época de lluvia deba presentarse una toxicidad menor, que en teoría debería ser, ya que el lixiviado tendría más edad, además de que las lluvias diluirían a esta misma; puede presentarse una toxicidad mucho mayor, ya que los componentes del lixiviados no son controlados, además que varían de acuerdo al residuos sólido que se encuentre depositado en el relleno sanitario, además de la actuación de otros factores, Espinosa-Lloréns *et al* (2010).

Uc-Peraza y Delgado-Blas (2011) utilizaron la especie *L. culveri* para evaluar la toxicidad de 4 detergentes de diferentes marcas Foca® se obtuvo una CL<sub>50</sub> de 0.01288 ml, Blanca Nieves® una CL<sub>50</sub> de 0.01303 ml, Roma® una CL<sub>50</sub> de 0.01348 ml y Puro Sol® una CL<sub>50</sub> de 0.01412 ml, en el presente estudio *L. culveri* es más resistente a la toxicidad de los

---

lixiviados que a la de los detergentes ya que se obtuvo una  $CL_{50}$  de 103.29 ml. Algunos detergentes aun no siendo tóxicos, pueden actuar de manera sinérgica alcanzando su potencial tóxico, además el activo LAS tiende a precipitarse y adherirse en las principales fuentes de alimentación de estos organismos (Uc-Peraza y Delgado-Blas, 2011), razón por la cual *L. culveri* es más sensible a los detergentes, y más tolerante a los lixiviados, ya que estos contaminantes se estabilizan con el paso del tiempo.

El cálculo de las unidades de toxicidad por Nah Song, (2016) de siete efluentes que desembocan en la Bahía de Chetumal Quintana Roo con organismos *L. culveri* introducidos en diversas concentraciones de cada uno de los efluentes, monitoreados por los efectos de mortalidad, obtuvo como resultado el grado de toxicidad va en escala de ligeramente tóxico a muy tóxico, presentando el siguiente orden secuencial en unidades de toxicidad: Dina (1) < Mega escultura (1.90) < Sam's (3.16) < Poder judicial (3.31) < Chevrolet (3.71) < CETMAR (5.12) < Muelle fiscal (5.71). En el presente estudio se calculó el grado de toxicidad de las diversas concentraciones del lixiviado (48, 43, 38, 33 y 28 %), con la misma especie clasificando el resultado de acuerdo en unidades de toxicidad por medio de formula señalada por (Saldaña *et al.*, 2002) se obtuvo que el lixiviado se clasifica de acuerdo a la NOM-052-2005 como un residuo peligroso, dando como resultado (2.42) y que comparado con la estimación del índice de toxicidad con los efluentes que desembocan en la bahía de Chetumal se encuentra entre los resultados de Mega escultura (1.90) y Sam's (3.16), es notable que los 2 efluentes antes mencionados y la unidad de toxicidad del lixiviado son similares por lo que permite pensar que estos mismos efluentes tienen un grado tóxico importante y considerados perjudiciales a la salud humana, por ende los que resultaron con un número mayor en unidades de toxicidad a estos.

El impacto del lixiviado de rellenos sanitarios potencialmente pueden contaminar el acuífero freático, ya que la composición iónica de las aguas subterráneas difiere de las superficiales, fuertemente impactadas por el lixiviado así mismo la composición del agua subterránea que tomaron con perforaciones ubicadas a menos de 250 m de relleno, a entre 250 y 500 m y a más de 500 m determinaron coeficientes que expresan la carga de contaminante del lixiviado: conductividad eléctrica, concentración de cloruro, concentración de amonio, DBO y DQO. En base a esto la gran cantidad de lixiviado es drenado

---

superficialmente por el curso que desemboca a la zona costera, por ello se cree que si no se toman medidas pertinentes para el tratamiento y disposición final adecuada de los vertederos de lixiviados afectaran directamente los cuerpos de agua y con ello los ecosistemas.

Existen diferencias significativas entre las concentraciones y la mortalidad del lixiviado, ya se observa que a mayor concentración se registra una mortalidad más temprana, Calderon- Ruiz, (2017) señala la mortalidad relacionada conforme aumenta la concentración de los plaguicidas estudiados con *Capitella* cf. *capitata*, puesto que existieron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la mortalidad de las diferentes concentraciones de las ambas cámaras de bioensayos, así como también una investigación registrada por Nah Song, (2016), señala que de acuerdo con la mortalidad registrada en los bioensayos con *L. culveri* en los siete efluentes evaluados y en los diferentes niveles de concentración a los que fueron expuestos, estos; mostraron diferencias significativas al aplicar el análisis estadístico ANOVA ( $p < 0.05$ ), por lo que indica que el comportamiento de la mortalidad fue diferente en cada tratamiento y en los diferentes niveles de concentración, esto probablemente se deba a la diversidad de sustancias que contienen las aguas residuales que son vertidas en cada uno de los efluentes.

El poblado de Bacalar tiene un tipo de suelo muy permeable García- Gil y Graniel-Castro (2000), señala altos niveles de rocas calizas es por ello la importancia del tratamiento de los lixiviados, por lo que se cree que en temporadas de lluvias se percola el lixiviado con mayor facilidad al manto acuífero y por la alta composición de contaminantes constituyentes del lixiviado pueden afectar a gran medida a los organismos del bentos y por ende a los ecosistemas.



## Capítulo VI

### CONCLUSIONES

---

## VI. Conclusiones

- Mediante las pruebas de toxicidad aguda con organismos de *Laeonereis culveri* se obtuvo la  $CL_{50}$  a 48h del lixiviado perteneciente al relleno sanitario de Bacalar Quintana Roo con valor de 41.31% de concentración.
- De acuerdo a las Unidades de Toxicidad obtenidas del lixiviado en el presente estudio se clasifica como Tóxico (U. T. = 2.42).
- Los bioensayos eco toxicológicos mostraron que *L. culveri* fue mucho más sensible expuesto a 48 h al lixiviado del relleno sanitario, que otros organismos acuáticos, por lo que pueden ser buenos bioindicadores de presencia de toxicidad en lixiviados.
- Los lixiviados derivados del amontonamiento de los residuos sólidos presentan un peligro para la vida acuática, ya que si estos llegan a un cuerpo de agua tienen la probabilidad de que causen daño, particularmente donde no se tenga un manejo adecuado para su disposición final.



---

## VII. Recomendaciones

- Se recomienda el empleo de *Laeonereis culveri* en bioensayos de ecotoxicidad debido a su fácil manejo, y sensibilidad.
- Realizar bioensayos de toxicidad aguda de lixiviados con otras especies de la Bahía de Chetumal Quintana Roo.
- Es importante utilizar más organismos para evaluar la toxicidad de los lixiviados como peces, crustáceos, moluscos y plantas acuáticas, con la finalidad de generar información eco-toxicológica con la utilización del lixiviado del mismo relleno sanitario.
- Realizar bioensayos de tipo crónico, o sub-letal, para conocer más sobre los efectos del lixiviado nuevo, medio y viejo. También investigar sobre los efectos sobre sistemas (nervioso, respiratorio, inmune, circulatorio y excretor), órganos, biomasa, crecimiento, comportamiento y reproducción.
- Evaluar la toxicidad de los lixiviados en cada temporada estacional (lluvias, secas y nortes).
- Debido a que los lixiviados se componen de diversas sustancias, se recomienda realizar la evaluación eco-toxicológica de cada uno de los compuestos que conforman el lixiviado y de esta manera tener una idea más cercana de cual sustancia tiene mayor afectación.

---

## VIII. Referencias

Amaral C., Kawakami E. & Mittogo A. (1980). Importancia de dos anelideos poliquetos na alimentação da macrofauna demersal e epibentónica da região de Ubatuba. Artículo de investigación del *Boletín Instituto Oceanográfico, São Paulo, Brasil*, pp. 2-31 (35).

Angarita Santos J. C., Barazeta Ávila Pa., Díaz Casagua J., Alonso Flórez N., Infante H., Martínez Urrego G., Montealegre Castillo N., Orjuela Manrique M., Ovalle Hernández S. P., Pachón Robayo S. M., Pinzón Quintero O., Rico Malagón L. M., Robles Vargas S. C., Romero Buitrago C., Romero Layton E. L., Veloza Herrera S. P. Y Villareal Torres G., (2013), Libro; *Gerencia de instituciones de salud y gestión ambiental, Manejo de lixiviados en América Latina*. (C. Romero Buitrago., & M. Orjuela Manrique), pp. 52-75. Investigación en Posgrado, Departamento de Biblioteca. Fundación Universitaria del Área Andina 1ª edición, ISBN: 978-958-8494-71-5. Bogotá, D. C., Colombia, pp. 9 -172.

Angulo, Poot. L. (2013). Determinación de la toxicidad total del efluente de la planta de tratamiento primer centenario en la región Lagunar Norponiente de Chetumal Quintana Roo, mediante *Oreochromis niloticus*, Tesis para obtener el grado de Licenciada en Ingeniería Ambiental, Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería, Chetumal Quintana Roo, Mexico, pp. 81

APHA, AEEA, & WPCF. (1992). Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid: Días de Santos.

APHA, AWWA, & WPCF (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. USA, p. 1220.

Castillo Morales G., Diaz Báez, M. C., Pica Granados Y., Ronco A. Sobrero C., Bulus Russini G., Feola G., Forget G., & Sanchez Bain A. (2004). Libro; Enzayos

- 
- toxicológicos y métodos de evaluación de caalidad de aguas. *Estandarización, intercalibración resultados y aplicaciones* Castillo G., Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Primera edición, Mexico, pp.189.
- Day, K. E., Scroggins R. P., & Eisenhauer, R. P. (1988). *Biology in the new regulatory framework for aquatic protection*. National Water Research Institute, Universidad de Michigan, Ottawa, Canadá, pp. 71.
- Delgado Blas V. H., Hernández H. A., & Kuk J. G. (2011). Distribución espacial y temporal de poliquetos (*polychaeta: annelida*) de la Bahía de Chetumal Quintana Roo. En V. H. Delgado Blas, J. S. Ortegón Aguilar, M. M. Vázquez González, A González Damián, & J. Hernández Rodríguez, *Avances de la ciencia y tecnología en Quintana Roo (Primeraedición, pp. 1- 285)*. Chetumal, Quintana Roo, México: Plaza y Valdez S.A. de C.V.
- Escobar Malaver P. M., (2009). Implementación de un sistema de alerta de riesgo toxicológico utilizando *Daphnia pulex* para la evaluación de muestras ambientales, Épsilon No. 12, Artículo del grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá D. C Colombia., pp. 115-133 (174).
- Espinosa Lloréns M. C., López M., Pellón A., Robert M., Diaz S., González A., Rodríguez N. y Fernández A. (2010). *Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuo sólidos municipales de la ciudad de la Habana*, Revista internacional de contaminación ambiental, Departamento de Estudios sobre Contaminación Ambiental (DECA). Centro de Investigaciones del Ozono. Centro Nacional de Investigaciones Científicas. Ave. 25 y Calle 158. Cubanacán, Playa. Ciudad de La Habana, Cuba. Correo electrónico: maria.espinosa@cnic.edu.cu.

---

Universidad de Pinar del Río, Calle Martí final, Pinar del Río. Cuba, Versión impresa ISSN 0188-4999, Laboratorio de Análisis de Residuos (LARE). Dirección Provincial de Servicios Comunes. Playa. Ciudad de La Habana, Cuba, Vicedirección Técnica. Unidad Provincial de Higiene. Dirección Provincial de Servicios Comunes. Playa. Ciudad de La Habana, Cuba,  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992010000400006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000400006).

Flores Tena F. J., Flores Pardave L., Valenzuela Cárdenas I. C., Flores Salinas E. A, (2010). Lixiviados de biosólidos sobre la biota dulceacuícola. Investigación y Ciencia, de la Universidad Autónoma de Aguascalientes., No. (48): 38-43.

Foley, K., Doniger, A., Shock, C., Horneck, D. y Welch T. (2012). Contaminación por nitratos en aguas subterráneas, técnicas de agricultura sostenible, Universidad Estatal de Oregón, Departamento de Cultivos y Ciencias del Suelo Ext / pp. 137.

García Garza, M. E. (2009). Capitellidae Grube, 1862. En J. A. De León González, J. R. Bastida Zavala, L. F. Carrera Parra, M. E. García Garza, A. Peña Rivera, S. I. Salazar Vallejo, & V. Solís Weiss, Poliquetos (Annelida: Polychaeta) de México y América tropical (págs. 101-104). Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Hernández Pech A. I. (2016). Estrategias de participación ciudadana en la planeación del desarrollo turístico de la ciudad de Bacalar. Tesis para obtener el grado de maestría en planeación, *División de Ciencias e Ingeniería*, Universidad de Quintana Roo, México, pp. 221.

INHEM (2006). Toxicidad aguda de lixiviados acuosos mediante un ensayo con *Lactuca sativa L.* Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología, Higiene y Sanidad Ambiental, Centro Habana, E-mail: marina@inhem.sld.cu, pp. 170-172.

Lee, A. H., Nikraz, H., y Hung, Y. T., (2010), Artículo; Influence of Waste Age on Landfill Leachate Quality, ProQuest®, Volumen 1 (4), pp. 347-535.

- 
- López Martínez, L. M. (2009). Determinación de la concentración letal media (CL<sub>50-48</sub>) del cloro en el efluente de una industria mediante bioensayos de toxicidad acuática utilizando *Daphnia pulex*. Tesis para obtener el grado de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle, *Programa de ingeniería Ambiental y Sanitaria*) Bogotá D. C. pp. 126.
- Nah Song, I. R. (2016). Determinación de la concentración letal media CL (50) de 10 efluentes que desembocan en la zona conurbada de la Bahía de Chetumal Quintana Roo utilizando *Laeonereis culveri* como bioindicador. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Ambiental en la Universidad de Quintana Roo, Chetumal Quintana Roo, México, pp. 82.
- Reinel Muñoz M. (2009), La Determinación De La Característica De Toxicidad Por Lixiviación (TCLP) Del Ingrediente Activo Malatión en un Plaguicida Organofosforado Mediante El Procedimiento De TCLP, Para obtener el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y sanitaria Bogotá D. C Colombia., pp. 224.
- Renou S., Givauda J.G., Poulain S., Dirassouyan F., y Moulin P., (2007), Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of hazardous Materials*, Science Direct, Artículo de Investigación Groupe Pizzorno Environnement, France, Volumen 150, pp. 468-493 (1316).
- Ríos Palacios X. V. (2016) Biosorción de compuestos recalcitrantes de Lixiviados usando maguey morado, Tesis para obtener el grado de Ingeniería Ambiental, Universidad de Quintana Roo *División de Ciencias e Ingeniería*. Chetumal Quintana Roo, México, pp. 52- 64 (92).
- Rivera-Laguna, E., Barba-Ho, L. y Torres-Lozada, P., (2013), Determinación de la toxicidad de lixiviados provenientes de residuos sólidos urbanos mediante indicadores

---

biológicos. Artículo del grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle Carrera 100 No. 13-00, Santiago de Cali, Colombia, AFINIDAD LXX, (563): 183-188.

Rodríguez, J., Correa, M, Escalpez, M (1993). Aplicación de técnicas de bioensayos a problemas de contaminación ambiental.

Rojas-Mayorquín, C. M. (2011). Estudios de la contaminación de los recursos hídricos en la cuenca del Río San Pedro, previos a la construcción de una hidroeléctrica (P.H. Las Cruces) en Nayarit, México. (Tesis inédita de licenciatura). Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco.

Salazar Vallejo S. I., González J. A. y Salaices Polanco H. (2008). Poliquetos (Annelida: Polychaeta) de México: Generalidades, Claves Ilustradas para Familias y Géneros, y Bibliografía Lista de Especies. Libro, Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, pp. 211.

Saldaña, P., Lerdo de Tejada, A, Gómez, M. A., y López, R (2002). *La importancia de incluir análisis de toxicidad en descargas industriales y municipales que afectan a los cuerpos receptores*. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.

Sánchez Rivas, G., y Vera Diego, G. (2001). Informe; Manual introductorio de ecotoxicología acuática. Callao, Perú *Sidalic* Instituto del mar del Perú, pp. 10–20 (ISSN 0378 - 7702), No 161, pp. 40.

SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL NORMA MEXICANA (1995). NMX-AA-87-1995-SCFI, *Análisis de agua, evaluación de Toxicidad Aguda con Daphnia magna Stratus (Crustacea-Cladocera) Método de prueba*, Dirección General de Normas, pp. 39.

---

SEMARNAT (2003). 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. Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Sierra Ramírez C. A., (2011). Calidad del agua: evaluación y diagnóstico. Libro de Ingeniería Ambiental, *Introducción a la toxicología acuática*, Capítulo 3, Departamento de biblioteca de la Universidad de Medellín, Colombia, 1ª edición (d. I. U, Ed.) pp. 457.

Silva J., Torrejón G., Bay Schmith E. & Larrain A., (2003). Calibration of the acute toxicity bioassay with *Daphnia pulex* (Crustacea: cladocera) using a reference toxicant, Scielo., Volumen 1, Universidad de Concepción, Depto. de Zoología, Tierras Blancas, Coquimbo (Guayana), Chile, pp., 87-96.

Stephan, C. E., (1977). Métods for calculating an LC<sub>50</sub>. (Mayer F. L. y Hamelink, J. L., edits), Philadelphia, Pennsylvania, USA: In American Society for testing and materials <ASTM> Acuatc Toxicology and Haxard Evaluation.

Torres-Rodríguez, M. T., García-Melián, M., Hernández-Perera, N. M. & Fernández-Novo, M. (2006). Toxicidad aguda de lixiviados acuosos mediante un ensayo con *Lactuca sativa* L. Higiene y Sanidad Ambiental, 6: 170-172.

Uc-Peraza R. G. y Delgado-Blas V. H. (2011). Artículo Determinación de la concentración letal media (CL<sub>50</sub>) de cuatro detergentes domésticos biodegradables en *Laeonereis culveri* (webster 1879) (polychaeta: annelida), Laboratorio de Suelos, División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Apartado Postal 10, Chetumal 77019, Quintana Roo, México. Autor responsable; russ\_net42@hotmail.com.

---

Uc-Peraza R. G., y Delgado Blas, V. H. (2015). Acute toxicity and risk assessment of three commercial detergents the polychaeta *Capitella* sp. C from Chetumal Bay, Quintana Roo. Tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental, Chetumal, México. *International Aquatic Research* pp. 251-261.

US EPA, (1992). Framework for Ecological Risk Assessment. Washington: Risk Assessment Forum Report No. EPA/630/R-92/00.

Vázquez Godina Elías (2001)., Cuantificación y efectos de la producción de lixiviados en el relleno sanitario de Salinas Victoria N. L. como requisito parcial para obtener el grado de maestría en ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Nuevo León, dirección general de bibliotecas TM TH6021.V3, facultad de ingeniería civil, división de estudios de posgrado, pp (221).

Wallace, R. L., *et al.*, (1993). Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental of the world (Zooplankton guides) 23 Rotifera. Holanda: Backhuys, pág. 229.

Wang W., Wang X., Wang X., Yang L., Wu Z., Xia S. & Zhao J. (2013) Cr (VI) removal from aqueous solution with bamboo charcoal chemical modified by iron and cobalt with the assistance of microwave. *Journal of environmental Sciences*, 25, 1726-1735.

Webster, H. (1879) *Annelida Chaetopoda of the Virginian coast*. N. Y.

Wu L., Zhang L., Shi X., Liu T., Peng Y., and Zhang J. (2015) Analysis of the impact of reflux ratio on coupled partial nitrification-anammox for co-treatment of mature landfill leachate and domestic wastewater. *Bioresource Technology* 198: 207-214.



## IX. Anexos

### Anexo 1. Tablas de datos.

| Componente orgánico           | Concentración reportada en<br>lixiviados (mg/L) |        | Componente orgánico                                 | Concentración reportada en<br>lixiviados (mg/L) |        |
|-------------------------------|---|--------|---|---|--------|
|                               | Mínima  | Máxima |   | Mínima  | Máxima |
| Acetona                       | 8   | 11000  | 1, 4 - Diclorobenceno                               | 1   | 52.1   |
| Acroleína                     | 270   | 270    | Diclorodifluorometano                               | 10.3  | 450    |
| Benceno                       | 4   | 1080   | 1, 1 - Dicloroetano                                 | 4   | 44000  |
| Bromometano                   | 170   | 170    | 1, 2 - Dicloroetano                                 | 1   | 11000  |
| Butanol                       | 10000   | 10000  | Cis - 1, 2 - Dicloroetano                           | 190   | 470    |
| 1-Butanol                     | 320   | 360    | trans - 1, 2 - Dicloroetano                         | 2   | 4800   |
| 2-Butanona                    | 110   | 27000  | 1, 2 - Dicloropropano                               | 0.03  | 500    |
| Butil bencil fenol            | 21  | 150    | 1, 3 - Dicloropropano                               | 18  | 30     |
| Endrin                        | 0.04  | 50     | Dietil ftalato                                      | 3   | 330    |
| Clorobenceno                  | 1   | 685    | 2, 4 - Dimetil fenol                                | 10  | 28     |
| Cloroetano                    | 11.1  | 860    | Ftalato de dimetilo                                 | 30  | 55     |
| 2-Cloronaftaleno              | 46  | 46     | 4, 4' - DDT   | 0.042   | 0.22   |
| 2-Cloroetil vinil éter        | 2   | 1100   | Etanol  | 23000   | 23000  |
| Cloroformo                    | 7.27  | 1300   | Etilacetato   | 42  | 130    |
| Clorometano                   | 170   | 400    | Etilbenceno   | 6   | 4900   |
| Bis (clorometil) éter         | 250   | 250    | Bis (2 - etil hexil) ftalato                        | 16  | 750    |
| Bis (2 - Cloroetil) metano    | 18  | 25     | 2 - Hexanona (metil butil quetona)                  | 6   | 690    |
| <i>p</i> - Cresol             | 45.2  | 5100   | Isoforona   | 4   | 16000  |
| 2, 4 - D                      | 7.4   | 220    | Lindano   | 0.017   | 1.023  |
| 1, 1, 2, 2 - Tetracloroetano  | 210   | 210    | 4 - Metil - 2 - Pentona (metil<br>isobutil quetona) | 10  | 710    |
| Dibrometano                   | 5   | 5      | Diclorometano                                       | 2   | 220000 |
| Di - <i>N</i> - Butil ftalato | 12  | 150    | Naftaleno   | 2   | 202    |
| 1, 2 - Dicloroetileno         | 3   | 21.9   | Nitrobenceno  | 4   | 120    |
| Tetracloroetileno             | 2   | 620    | 4 - Nitrofenol                                      | 17  | 17     |
| Tetrahidrofurano              | 18  | 1300   | Pentaclorofenol                                     | 3   | 470    |
| Tolueno                       | 5.5   | 18000  | Fenol   | 7.3   | 28000  |
| Toxafeno                      | 1   | 1      | 1 - Propanol  | 11000   | 11000  |
| 1, 1, 1 - Tricloroetano       | 1   | 13000  | 2 - Propanol  | 94  | 26000  |
| 1, 1, 2 - Tricloroetano       | 30  | 630    | Tricloroetileno                                     | 1   | 13000  |
| Cloruro de vinilo             | 8   | 61     | Triclorofluorometano                                | 4   | 150    |
| Tetracloruro de carbono       | 6   | 397.5  | 1, 2, 3 - Tricloropropano                           | 230   | 230    |
|                               |   |        | Xilenos   | 32  | 310    |

**Tabla 1. Anexo 1: Compuestos Orgánicos reportados en Lixiviados de Rellenos sanitarios (Scopiu y Gravilescu., 2010).**

| Indicadores | Concentración reportada en Lixiviados (mg/L) |        | Contaminantes inorgánicos | Concentración reportada en Lixiviados (mg/L) |        |
|-------------|--|--------|---------------------------|--|--------|
|             | Mínima                                       | Máxima |                           | Mínima                                       | Máxima |
| Alcalinidad | 470  | 57,850 | Aluminio                  | 0.01   | 5.8    |
| Amonio      | 0.93   | 1,200  | Antimonio                 | 0.0015                                       | 47     |
| DBO5        | 7  | 29,200 | Arsénico                  | 0.0002                                       | 0.928  |
| DQO         | 42   | 50,450 | Bario                     | 0.08   | 5      |
| Calcio      | 95.5   | 2,100  | Berilio                   | 0.001  | 0.01   |
| Cloruros    | 31   | 5,450  | Cadmio                    | 0.0007                                       | 0.15   |
| Fluoruros   | 0.11   | 302    | Cromo total               | 0.0005                                       | 1.9    |
| Hierro      | 0.22   | 2,280  | Cobalto                   | 0.04   | 0.13   |
| Fósforo     | 0.29   | 117    | Cobre                     | 0.003  | 2.8    |
| Potasio     | 17.8   | 1,175  | Cianuro                   | 0.004  | 0.3    |
| Sulfato     | 8  | 1,400  | Plomo                     | 0.005  | 1.6    |
| Sodio       | 12   | 2,574  | Magnecio                  | 74   | 927    |
| SDT         | 390  | 31,800 | Mercurio                  | 0.0001                                       | 0.0098 |
| SST         | 23   | 17,800 | Níquel                    | 0.02   | 2.227  |
| COT         | 20   | 14,500 | Vanadio                   | 0.009  | 0.029  |
|             |  |        | Zinc                      | 0.03   | 350    |

**Tabla 2. Anexo 1: Indicadores y componentes inorgánicos de lixiviados de relleno sanitario. Fuente: Schiopu y Gavrilescu (2010).**

| Característica         | Joven            | Intermedio        | Viejo        |
|------------------------|------------------|-------------------|--------------|
| Fase                   | Aeróbica y ácida |                   | Metanogénica |
| Edad (años)            | < 1              | 1 - 5             | > 5          |
| pH                     | < 6.5            | 6.5 - 7.5         | > 7.5        |
| DQO (mg/L)             | > 15,000         | 3,000 - 15,000    | < 3,000      |
| Relación DBO5/DQO      | 0.5 - 1.0        | 0.1 - 0.5         | < 0.1        |
| Metales pesados (mg/L) | > 2              | < 2               | < 2          |
| Compuestos orgánicos   | 80 % AGV         | 5 - 30 % AGV + SH | SH           |
| Biodegradabilidad      | Importante       | Media             | Baja         |

**AGV: ácidos grasos volátiles; SH: ácidos húmicos y fúlvicos**

**Tabla 3. Anexo 1: Clasificación de los lixiviados de relleno sanitario de acuerdo a su edad, según Abbas et al., (2009), Deng (2009) y Li et al., (2010).**

| <b>Característica</b>  | <b>Joven</b> | <b>Intermedio</b> | <b>Viejo</b>      |         |
|------------------------|--------------|-------------------|-------------------|---------|
| Edad (años)            |              | < 5               | 5 - 10            | > 10    |
| pH                     |              | < 6.5             | 6.5 - 7.5         | > 7.5   |
| DQO (mg/L)             |              | > 10,000          | 4,000 - 10,000    | < 4,000 |
| Relación DBO5/DQO      |              | > 0.3             | 0.1 - 0.3         | < 0.1   |
| Metales pesados (mg/L) |              | Baja-Media        |                   | Baja    |
| Compuestos orgánicos   |              | 80 % AGV          | 5 - 30 % AGV + SH | SH      |
| Biodegradabilidad      |              | Importante        | Media             | Baja    |

**AGV: ácidos grasos volátiles; SH: ácidos húmicos y fúlvicos**

*Tabla 4. Anexo 1: Clasificación de los lixiviados de relleno sanitario vs edad, según Renou et al., (2007).*

| <b>Parámetro</b>              | <b>Método</b>                            |
|-------------------------------|--|
| Demanda Química de Oxígeno    | NMX-AA-30-SCFI-2001                      |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | NMX-AA-028-SCFI-2001                     |
| Carbono Orgánico Total        | Método directo Test N tube 10128 HR HACH |
| pH                            | NMX-AA-008-SCFI-2011                     |
| Conductividad                 | NMX-AA-093-SCFI-2000                     |
| Turbiedad                     | NMX-AA-038-SCFI-2001                     |
| Metales pesados               | NMX-AA-051-SCFI-2001                     |

*Tabla 5. Anexo 1: Parámetros medidos de los lixiviados y métodos utilizados en su medición según (Ríos Palacios., 2016).*

**Datos típicos de la composición de los lixiviados procedientes de los rellenos sanitarios nuevos y antiguos**

| Constituyentes                       | Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años) |        | Relleno sanitario antiguo<br>(mayor de 10 años) |
|--------------------------------------|---|--------|---|
|                                      | Rango                                     | Típico |   |
| DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) | 2,000-30,000                              | 10,000 | 100-200   |
| COT (Carbono Orgánico Total)         | 1,500-20,000                              | 6,000  | 80-180  |
| DQO (Demanda Química de Oxígeno)     | 3,000-80,000                              | 18,000 | 100-500   |
| SST (Sólidos Suspendidos Totales)    | 200-2,000                                 | 500    | 100-400   |
| Nitrógeno Orgánico                   | 10-800                                    | 200    | 80-120  |
| Nitrogeno Amoniacal                  | 10-800                                    | 200    | 20-40   |
| Nitrato                              | 5-40                                      | 25     | 5-10  |
| Fosforo total                        | 5-100                                     | 30     | 5-10  |
| Ortofosfato                          | 4-80                                      | 20     | 4-8   |
| Alcalinidad como CaCO3               | 1,000-10,000                              | 3,000  | 200-1,000                                       |
| pH                                   | 4.5-5.7                                   | 6      | 6.6-7.5   |
| Dureza total como CaCO3              | 300-10,000                                | 3,500  | -   |
| Calcio                               | 200-3,000                                 | 1,000  | 100-400   |
| Magnesio                             | 50-1,500                                  | 250    | 50-200  |
| Potacio                              | 200-1,000                                 | 300    | 50-400  |
| Sodio                                | 200-2,500                                 | 500    | 100-200   |
| Cloruros                             | 200-3,000                                 | 500    | 100-400   |
| Sulfatos                             | 50-1,000                                  | 300    | 20-50   |
| Hierro total                         | 50-1,200                                  | 60     | 20-200  |

Todos los valores estan en mg/L, excepto el pH que no tiene unidades.

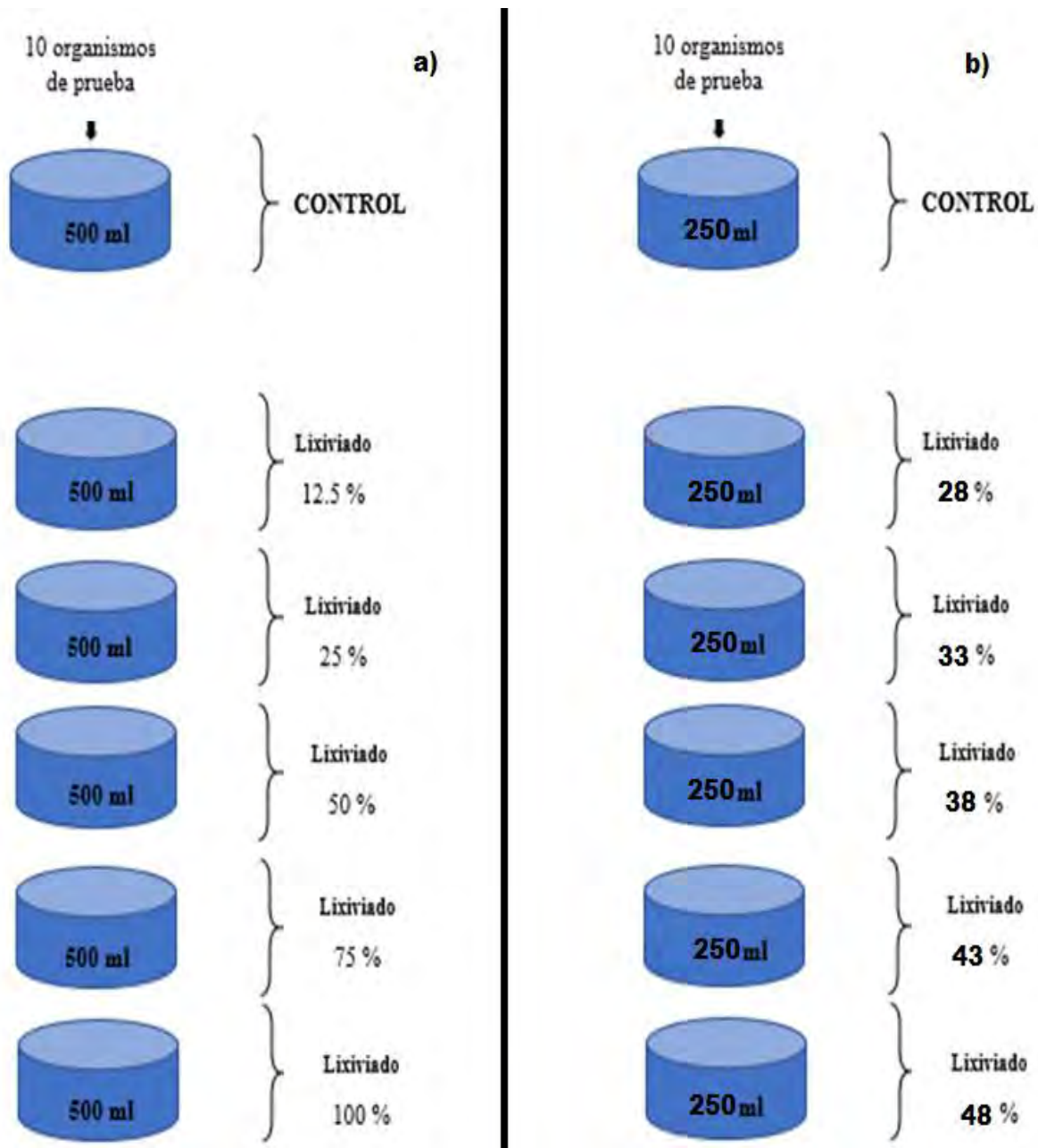
**Tabla 6. Anexo 1: Datos típicos de la composición de los lixiviados procedentes de los rellenos sanitarios nuevos y antiguos (Vázquez Godina 2001).**

**Características promedio de los lixiviados en las 2 estaciones de muestreo en 2004**

| <b>Indicador</b>   | <b>Unidades</b>     | <b>Estación lluvia</b> | <b>Estación seca</b> |
|--------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| pH                 | -                   | 7.93                   | 8.1                  |
| T                  | °C                  | 29.8                   | 29.53                |
| CE                 | μS cm <sup>-1</sup> | 7542                   | 8800                 |
| OD                 | mg L <sup>-1</sup>  | 0.57                   | 0                    |
| DBO5               | mg L <sup>-1</sup>  | 776                    | 902                  |
| DQO                | mg L <sup>-1</sup>  | 1188                   | 2011                 |
| Acidez             | mg L <sup>-1</sup>  | 213                    | 250                  |
| Alcalinidad        | mg L <sup>-1</sup>  | 923                    | 1190                 |
| P total            | mg L <sup>-1</sup>  | 8.82                   | 68.5                 |
| N am               | mg L <sup>-1</sup>  | 50.54                  | 104.69               |
| N total            | mg L <sup>-1</sup>  | 72.56                  | 146.13               |
| N-N02              | mg L <sup>-1</sup>  | 0.02                   | 0.23                 |
| N-N03              | mg L <sup>-1</sup>  | 0.01                   | 0.36                 |
| Grasas y aceites   | mg L <sup>-1</sup>  | 1.23                   | 3.93                 |
| Fenoles            | mg L <sup>-1</sup>  | 0.08                   | 0.27                 |
| SDT                | mg L <sup>-1</sup>  | 4652                   | 6202                 |
| SST                | mg L <sup>-1</sup>  | 341                    | 629                  |
| STV                | mg L <sup>-1</sup>  | 1969                   | 1293                 |
| As                 | mg L <sup>-1</sup>  | 0.08                   | 0.23                 |
| Cd                 | mg L <sup>-1</sup>  | 0.01                   | 0.02                 |
| Cu                 | mg L <sup>-1</sup>  | 0.15                   | 1.4                  |
| Hg-T               | mg L <sup>-1</sup>  | 0.05                   | 0.3                  |
| Pb                 | mg L <sup>-1</sup>  | 0.11                   | 0.71                 |
| Zn                 | mg L <sup>-1</sup>  | 0.24                   | 6.2                  |
| Cr+6               | mg L <sup>-1</sup>  | 0.31                   | 0.12                 |
| CN-T               | mg L <sup>-1</sup>  | 0.06                   | 0.05                 |
| Detergentes        | mg L <sup>-1</sup>  | 0.24                   | 0.75                 |
| Color              | UC                  | 3878                   | 6958                 |
| Turbidez           | UNT                 | 138.78                 | 289.1                |
| Coliformes Totales | NMP/100ml           | 1.71E+05               | 5.93E+01             |
| Coliformes Fecales | NMP/100ml           | 2.61E+04               | 4.98E+01             |

**Tabla 7. Anexo 1: Características promedio de los lixiviados en las estaciones de muestreo (Espinosa Lloréns et al., 2010).**

*Anexo 2: Figuras de las baterías de la preparación de los bioensayos exploratorios y definitivos.*



*Figura 1. Anexo 2: Representación de la batería de bioensayo para las pruebas exploratorias A y B.*

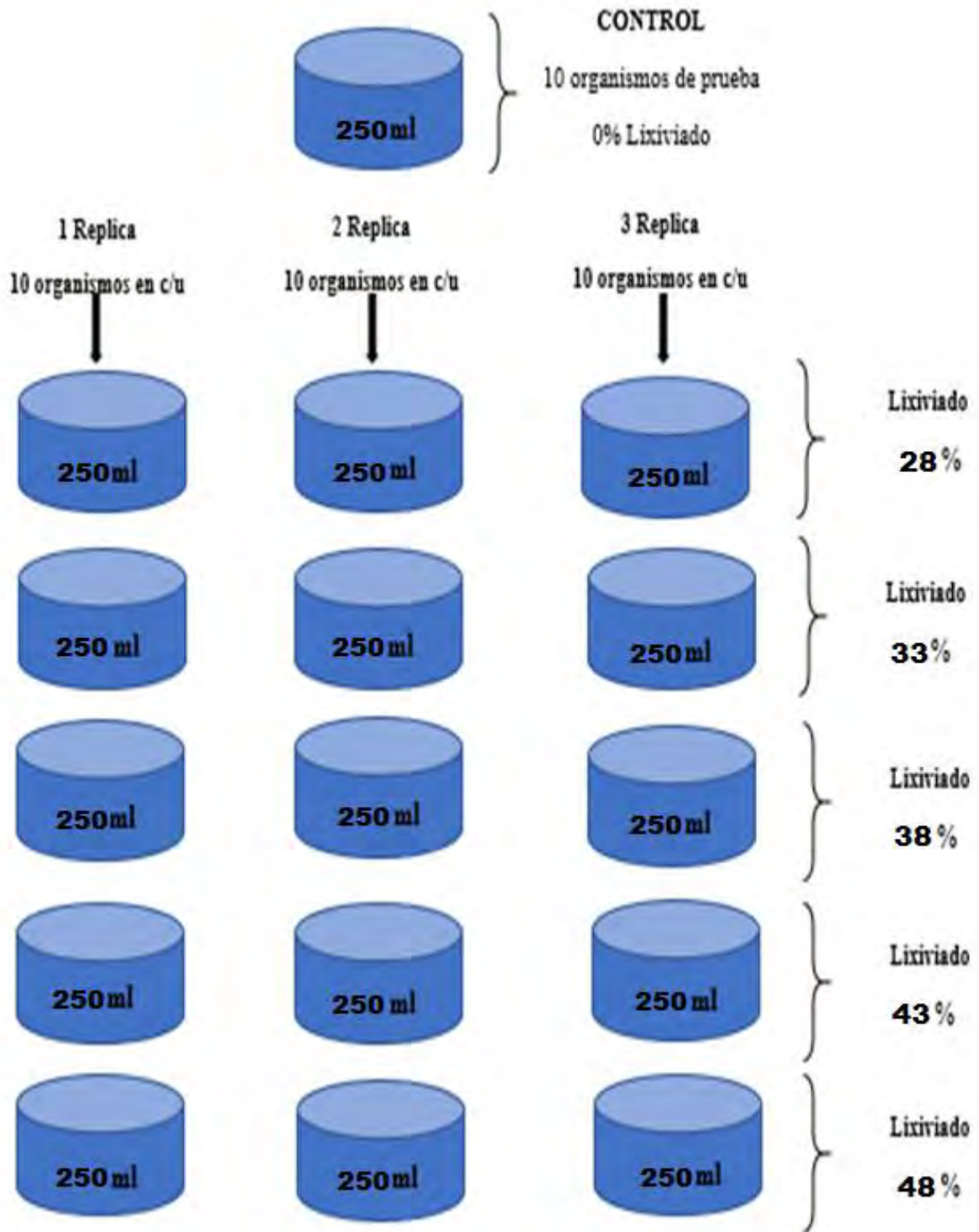
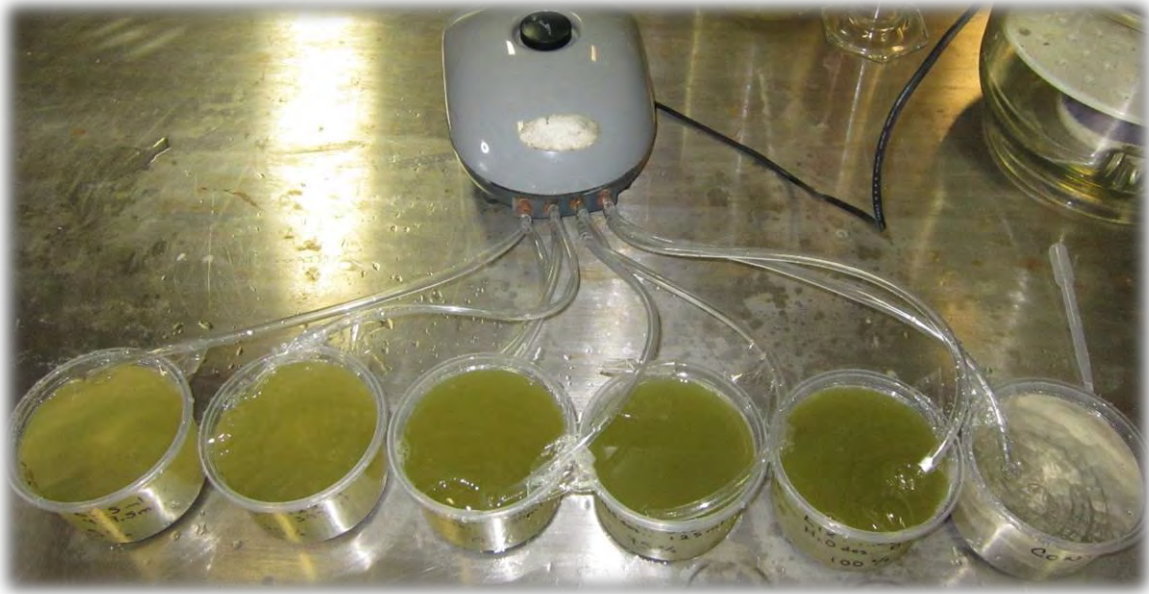
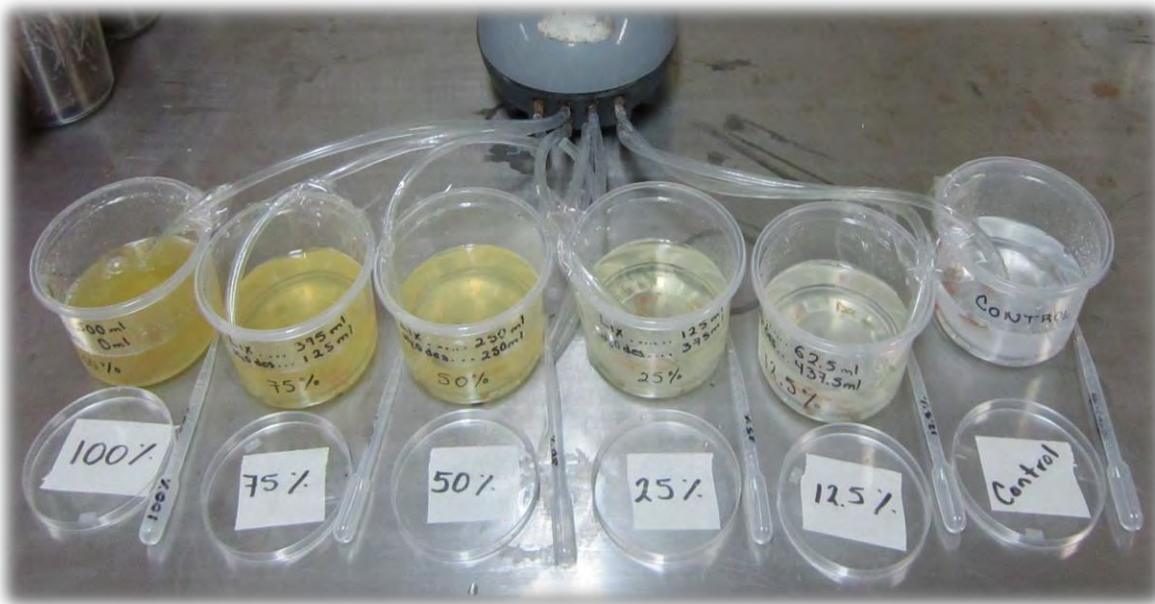


Figura 2. Anexo 2: Representación de la batería de bioensayo para las pruebas definitivas.

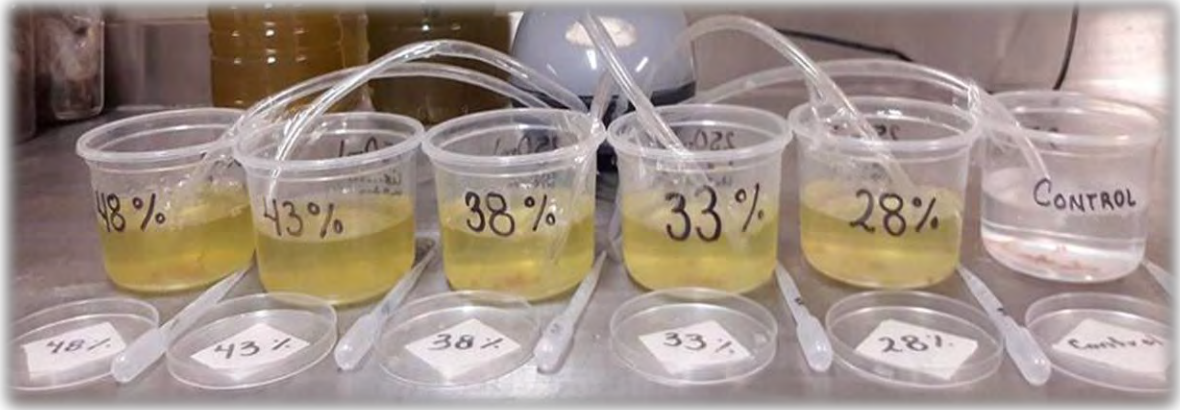


**Figura 3. Anexo 2: Pila de bioensayo exploratorio de 100, 75, 50, 25, 12.5% y un blanco de concentración de lixiviado en 500ml.**

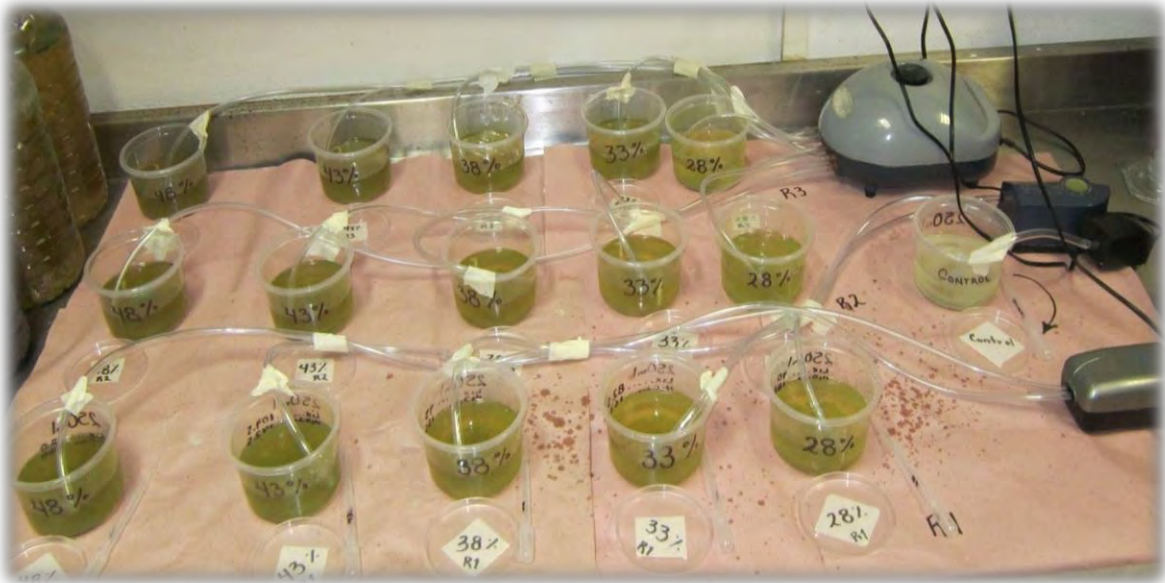


**Figura 4. Anexo 2: Segunda Pila de bioensayo exploratorio de 100, 75, 50, 25, 12.5% y un blanco de concentración de lixiviado en 250ml.**





**Figura 5. Anexo 2: Tercera Pila de bioensayo exploratorio de 48, 43, 38, 33, 28% y un blanco de concentración de lixiviado en 250ml.**



**Figura 6. Anexo 2: Cuarta Pila de bioensayo definitiva de 48, 43, 38, 33, 28% y un blanco de concentración de lixiviado en 250ml.**

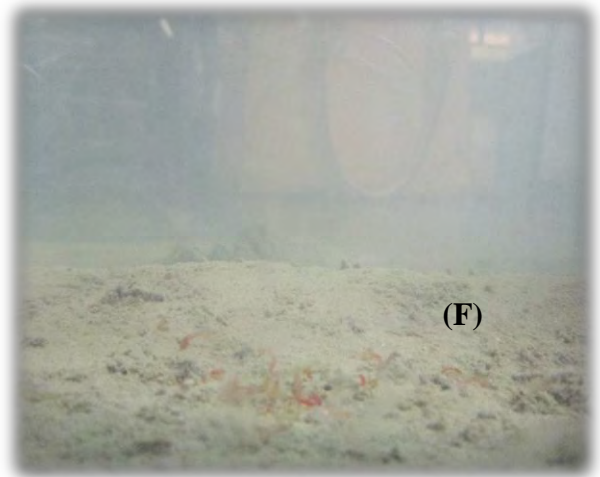
---

**Anexo 3: Figuras de la laguna de Lixiviado evaluado (A), (B) y la técnica de extracción (C)(D).**



---

*Material (E), aclimatación (F) y extracción del organismo de prueba (G) Y (H).*



**Anexo 4: Tablas de mortandad obtenidas de los bioensayos exploratorios y definitivos.**

| Concentración | Horas |   |   |    |    |    |    | Muertos | Vivos |
|---------------|-------|---|---|----|----|----|----|---------|-------|
|               | 1     | 2 | 8 | 16 | 24 | 36 | 48 |         |       |
| 100%          | 1     | 2 | 7 | 0  | 0  | 0  | 0  | 10      | 0     |
| 75%           | 0     | 0 | 3 | 0  | 0  | 2  | 3  | 8       | 2     |
| 50%           | 0     | 0 | 2 | 0  | 0  | 2  | 2  | 6       | 4     |
| 25%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 2  | 0  | 2       | 8     |
| 12.50%        | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 1       | 9     |
| Control       | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0       | 10    |
|               |       |   |   |    |    |    |    | 27      | 33    |

**Tabla 8. Anexo 4: Prueba exploratoria 1**

| Concentración | Horas |   |   |    |    |    |    | Muertos | Vivos |
|---------------|-------|---|---|----|----|----|----|---------|-------|
|               | 1     | 2 | 8 | 16 | 24 | 36 | 48 |         |       |
| 48%           | 0     | 0 | 1 | 1  | 2  | 0  | 2  | 6       | 4     |
| 43%           | 0     | 0 | 1 | 0  | 3  | 0  | 1  | 5       | 5     |
| 38%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 3  | 1  | 0  | 4       | 6     |
| 33%           | 0     | 0 | 1 | 0  | 1  | 1  | 0  | 3       | 7     |
| 28%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 0  | 2       | 8     |
| Control       | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0       | 10    |
|               |       |   |   |    |    |    |    | 20      | 40    |

**Tabla 9. Anexo 4: Prueba exploratoria 2**

**RÉPLICA 1**

| Concentración | Horas |   |   |    |    |    |    | Muertos | Vivos |
|---------------|-------|---|---|----|----|----|----|---------|-------|
|               | 1     | 2 | 8 | 16 | 24 | 36 | 48 |         |       |
| 48%           | 0     | 0 | 0 | 2  | 1  | 2  | 2  | 7       | 3     |
| 43%           | 0     | 0 | 0 | 1  | 2  | 3  | 0  | 6       | 4     |
| 38%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 1  | 3  | 1  | 5       | 5     |
| 33%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 1  | 2  | 0  | 3       | 7     |
| 28%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 1  | 2       | 8     |
| Control       | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0       | 10    |
|               |       |   |   |    |    |    |    | 23      | 37    |

*Tabla 10. Anexo 4: Primera réplica de la prueba definitiva*

**RÉPLICA 2**

| Concentración | Horas |   |   |    |    |    |    | Muertos | Vivos |
|---------------|-------|---|---|----|----|----|----|---------|-------|
|               | 1     | 2 | 8 | 16 | 24 | 36 | 48 |         |       |
| 48%           | 0     | 0 | 0 | 1  | 3  | 2  | 0  | 6       | 4     |
| 43%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 2  | 2  | 1  | 5       | 5     |
| 38%           | 0     | 0 | 0 | 2  | 0  | 0  | 2  | 4       | 6     |
| 33%           | 0     | 0 | 0 | 1  | 0  | 1  | 1  | 3       | 7     |
| 28%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 1  | 2       | 8     |
| Control       | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0       | 10    |
|               |       |   |   |    |    |    |    | 20      | 40    |

*Tabla 11. Anexo 4: Segunda réplica de la prueba definitiva*

RÉPLICA 3

| Concentración | Horas |   |   |    |    |    |    | Muertos | Vivos |
|---------------|-------|---|---|----|----|----|----|---------|-------|
|               | 1     | 2 | 8 | 16 | 24 | 36 | 48 |         |       |
| 48%           | 0     | 0 | 0 | 1  | 1  | 3  | 1  | 6       | 4     |
| 43%           | 0     | 0 | 0 | 1  | 2  | 2  | 0  | 5       | 5     |
| 38%           | 0     | 0 | 0 | 1  | 2  | 0  | 1  | 4       | 6     |
| 33%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 3       | 7     |
| 28%           | 0     | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 3       | 7     |
| Control       | 0     | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0       | 10    |
|               |       |   |   |    |    |    |    | 21      | 39    |

*Tabla 12. Anexo 4: Tercera réplica de la prueba definitiva*

---

**Anexo 6: Organismo de prueba utilizado.**

*Laeonereis culveri*



**Reino:** Animal

**Phylum:** Ammelida

**Clase:** Polichaeta

**Orden:** Phyllodocida

**Familia:** Nereididae

**Género:** Nereis

*Determinación de la Concentración Letal Media (CL<sub>50</sub>) del lixiviado del relleno sanitario de Bacalar Quintana Roo utilizando *Laeonereis culveri* como bioindicador.*