

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química

Evaluación de un reactor biológico de lecho fijo  
acoplado a un humedal artificial para el  
tratamiento de lixiviados de relleno sanitario

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental

Presenta

Ing. María Guadalupe Hernández Guerrero

Dirigido por

Dr. José Alberto Rodríguez Morales

Santiago de Querétaro, Querétaro, 5 de diciembre de 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



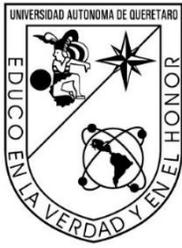
Evaluación de un reactor biológico de lecho fijo  
acoplado a un humedal artificial para el tratamiento  
de lixiviados de relleno sanitario

**por**

María Guadalupe Hernández Guerrero

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** FQMAC-227839



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental

Evaluación de un reactor biológico de lecho fijo acoplado a un humedal artificial para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en  
Ciencia y tecnología ambiental

Presenta

Ing. María Guadalupe Hernández Guerrero

Dirigido por

Dr. José Alberto Rodríguez Morales

Dr. José Alberto Rodríguez Morales

Presidente

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Secretaria

Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez

Vocal

Dr. Aldo Amaro Reyes

Suplente

Dr. Víctor Pérez Moreno

Suplente

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Centro Universitario, Querétaro, Qro

5 de diciembre de 2023

México

***A mis hermanos Homero Hernández y Silvia Hernández, gracias por todo y,  
por tanto.***

***A mis sobrinos que son mi motivo de alegrías y preocupaciones.***

***Sobre todo, a mi mamá.***

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis compañeros de la maestría, Enrique agradezco el apoyo que me diste desde el primer día, a Dani, Karlita y Javi, gracias por hacer de esta maestría de las mejores decisiones que he tomado.

A mi director de tesis, Dr. José Alberto, gracias por el apoyo y la motivación a seguir creciendo profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Humanidades y Ciencias y Tecnología (CONAHCYT), por la beca otorgada que me brindó la oportunidad de seguir preparándome profesionalmente y así contribuir en pro de la sociedad.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por su compromiso con la educación y formación de personas conscientes de las problemáticas sociales y prepara a sus estudiantes con conocimientos y habilidades para estar preparados para las problemáticas actuales.

# ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
ÍNDICE DE CUADROS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 ANTECEDENTES.....	2
2.1 Aguas residuales.....	2
2.1.1 Normativa vigente.....	3
2.2 Relleno sanitario.....	4
2.3 Principales productos de relleno sanitario.....	5
2.4 Lixiviados de relleno sanitario.....	6
2.4.2 Interacción de lixiviados con el ambiente.....	8
2.4.3 Fases de los lixiviados de relleno sanitario.....	8
2.4.4 Clasificación de los lixiviados de relleno sanitario.....	10
2.4.5 Métodos de tratamiento de los lixiviados de relleno sanitario.....	12
2.5 Tratamiento de lixiviado con agua residual.....	14
2.6 Reactor biológico de lecho fijo.....	14
2.7 Humedal Artificial.....	15
3 HIPÓTESIS.....	17
4 OBJETIVO.....	18
4.8 Objetivo General.....	18
4.9 Objetivos Específicos.....	18
5 METODOLOGÍA.....	19
5.1 Sitio de estudio.....	19
5.2 Recolección de muestra de lixiviados de relleno sanitario.....	19
5.3 Caracterización de lixiviados de relleno sanitario.....	19
5.4 Colecta de lodos activados de planta de tratamiento residual.....	20
5.5 Construcción y acondicionamiento del reactor biológico de lecho fijo.....	20
5.5.1 Área de contacto del soporte y biomasa adherida.....	21
5.6 Constantes biocinéticas.....	22
5.7 Mezcla lixiviado de relleno sanitario- agua residual.....	23

5.8	Construcción de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal .....	24
5.9	Alimentación del humedal con aguas del tratamiento primario.....	24
5.10	Análisis fisicoquímicos del agua tratada por el sistema compuesto por reactor biológico y humedal artificial. ....	25
5.11	Índice de Biodegradabilidad (IB) de los lixiviados.....	25
5.12	Bioética en la investigación y buenas prácticas de laboratorio.....	26
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	27
6.1	Recolección de muestra de lixiviados de relleno sanitario.....	27
6.2	Caracterización del lixiviado .....	27
6.2.1	Caracterización del agua residual .....	29
6.3	Colecta de lodos activados de planta de tratamiento residual.....	30
6.4	Construcción y acondicionamiento del reactor biológico de lecho fijo .....	30
6.4.1	Área de contacto del lecho fijo y biomasa adherida .....	31
6.5	Constantes biocinéticas .....	33
6.5.2	Tasa de utilización de sustrato (k) y Constante de velocidad media ( $K_s$ ) 34	
6.5.3	Rendimiento celular máximo (Y) y Coeficiente de decaimiento endógeno ( $K_d$ ).....	35
6.6	Parámetros fisicoquímicos de mezcla Lixiviado con Agua residual en reactor biológico. ....	36
6.6.1	Agua residual .....	36
6.6.2	MEZCLA 30% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 70% AGUA RESIDUAL.....	38
6.6.3	MEZCLA 50% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 50% AGUA RESIDUAL.....	39
6.6.4	MEZCLA 70% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 30% AGUA RESIDUAL.....	41
6.7	parámetros fisicoquímicos en el humedal.....	43
6.7.1	Efluente del Humedal artificial de la mezcla 30% lixiviado de relleno sanitario en 70% agua residual.....	43
6.7.2	Efluente del Humedal artificial de la mezcla 50% lixiviado de relleno sanitario en 50% agua residual.....	44
6.7.3	Efluente del Humedal artificial de la mezcla 70% lixiviado de relleno sanitario en 30% agua residual.....	46
6.7.4	pH.....	48
6.7.5	Grasa y aceites .....	49

6.7.6	Sólidos Suspendidos Totales .....	49
6.7.7	Demanda Biológica de Oxígeno .....	49
6.7.8	Demanda Química de Oxígeno .....	49
6.7.9	Coliformes fecales.....	50
6.7.10	Huevos de Helmintos.....	50
6.7.11	Nitrógeno .....	50
6.7.12	Fosforo.....	51
6.8	Índice de Biodegradabilidad (IB) de los lixiviados por etapa.....	52
6.9	Análisis estadístico .....	52
7	CONCLUSIONES .....	54
8	REFERENCIAS .....	55

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO 1</b> LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LA NOM-001-SEMARNAT-2021 PARA RIEGO DE ÁREAS VERDES VALOR INSTANTANEO.....	3
<b>CUADRO 2</b> LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN LA NOM-001-SEMARNAT-2021 PARA RIEGO DE ÁREAS VERDES VALOR INSTANTÁNEO.....	3
<b>CUADRO 3</b> LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL NOM-002-SEMARNAT-1996 VALOR INSTANTÁNEO.....	4
<b>CUADRO 4</b> LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN AGUAS TRATADAS PARA SERVICIOS AL PÚBLICO NOM-0003-SEMARNAT-1997 PROMEDIO MENSUAL.....	4
<b>CUADRO 5</b> VARIACIONES EN LA COMPOSICIÓN FISCOQUÍMICA DE LIXIVIADOS EN FUNCIÓN A LA EDAD DEL RELLENO SANITARIO EN REGIONES TEMPLADAS. MODIFICADO DE (MORAES COSTA ET AL., 2019; ROCHA LEBRON ET AL., 2021).....	11
<b>CUADRO 6</b> ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS NECESARIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO.....	20
<b>CUADRO 7</b> ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS NECESARIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO.....	20
<b>CUADRO 8</b> ANÁLISIS FISCOQUÍMICO DEL LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO.....	28
<b>CUADRO 9</b> ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO.....	28
<b>CUADRO 10</b> CLASIFICACIÓN DEL LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO.....	29
<b>CUADRO 11</b> CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA RESIDUAL.....	29
<b>CUADRO 12</b> CONCENTRADO DE DATOS DE DQO Y SST EN 24 HORAS.....	33
<b>CUADRO 13</b> VARIABLES ASOCIADAS AL CÁLCULO DE K Y K <sub>s</sub> .....	34
<b>CUADRO 14</b> VARIABLES ASOCIADAS AL CÁLCULO DE Y Y K <sub>d</sub> .....	35
<b>CUADRO 15</b> RESUMEN DE CONSTANTES BIOCINÉTICAS.....	36
<b>CUADRO 16</b> PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE EFLUENTE DEL REACTOR DE LECHO FIJO DEL AGUA RESIDUAL.....	37
<b>CUADRO 17</b> PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE EFLUENTE DEL REACTOR DE LECHO FIJO DE LA MEZCLA 30% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 70% DE AGUA RESIDUAL.....	39
<b>CUADRO 18</b> PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE EFLUENTE DEL REACTOR DE LECHO FIJO DE LA MEZCLA 50% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 50% DE AGUA RESIDUAL.....	41
<b>CUADRO 19</b> PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE EFLUENTE DEL REACTOR DE LECHO FIJO DE LA MEZCLA 70% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 30% DE AGUA RESIDUAL.....	43

<b>CUADRO 20</b> PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE EFLUENTE DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE LA MEZCLA 30% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 70% DE AGUA RESIDUAL .....	44
<b>CUADRO 21</b> PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE EFLUENTE DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE LA MEZCLA 50% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 50% DE AGUA RESIDUAL. ....	45
<b>CUADRO 22</b> PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE EFLUENTE DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE LA MEZCLA 70% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 30% DE AGUA RESIDUAL. ....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> CARACTERÍSTICAS E INFRAESTRUCTURA DE UN RELLENO SANITARIO. MODIFICADO DE (QUADRI & DOHARE, 2021; ZHANG ET AL., 2021). .....	5
<b>FIGURA 2</b> EVALUACIÓN DE LA BOTELLA PARA DETERMINAR EL ÁREA SUPERFICIAL .....	21
<b>FIGURA 3</b> ESQUEMA DEL CONO TRUNCO PARA OBTENER EL ÁREA DE CONTACTO.....	21
<b>FIGURA 4</b> ESQUEMA DEL CILINDRO PARA OBTENER EL ÁREA DE CONTACTO .....	22
<b>FIGURA 5</b> HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (HAFSH) .....	24
<b>FIGURA 6</b> CONFIGURACIÓN DEL HAFSH.....	25
<b>FIGURA 7</b> RELLENO SANITARIO EN SAN PEDRO AHUACATLÁN, SAN JUAN DE RÍO, A) RELLENO SANITARIO, B) CANAL CREADO POR EL CAUDAL DE LRS Y C) PISCINA DE LRS.....	27
<b>FIGURA 8</b> PLANTA DE TRATAMIENTO NO. 4 CAMPUS AEROPUERTO, UAQ. ....	30
<b>FIGURA 9</b> CONSTRUCCIÓN DE REACTOR BIOLÓGICO DE LECHO FIJO A BASE DE POLIETILENO TEREFALATO: A) DIFUSORES DE AIREACIÓN, B) DISPOSICIÓN DEL LECHO FIJO CON POLIETILENO TEREFALATO Y C) REACTOR BIOLÓGICO DE LECHO FIJO.....	31
<b>FIGURA 10</b> SOPORTES DE POLIETILENO TEREFALATO A) ACOMODO EN EL RBLF Y B) BIOMASA ADHERIDA AL SOPORTE.....	32
<b>FIGURA 11</b> TASA MÁXIMA DE CRECIMIENTO (K) Y CONSTANTE DE VELOCIDAD MEDIA (KS).....	34
<b>FIGURA 12</b> RENDIMIENTO CELULAR MÁXIMO (Y) Y EL COEFICIENTE DE DECAIMIENTO ENDÓGENO (K <sub>D</sub> ).....	35
<b>FIGURA 13</b> AGUA RESIDUAL VS AGUA RESIDUAL TRATADA POR EL RBLF.....	37
<b>FIGURA 14</b> VARIACIÓN DE A) PH, B) COLOR VERDADERO, C) TEMPERATURA Y D) SDT EN LA MEZCLA 30LRS-70AR DEL AFLUENTE Y EFLUENTE.....	39
<b>FIGURA 15</b> VARIACIÓN DE A) PH, B) COLOR VERDADERO, C) TEMPERATURA Y D) SDT EN LA MEZCLA 50LRS-50AR DEL AFLUENTE Y EFLUENTE.....	41
<b>FIGURA 16</b> VARIACIÓN DE A) PH, B) COLOR VERDADERO, C) TEMPERATURA Y D) SDT EN LA MEZCLA 70LRS-30AR DEL AFLUENTE Y EFLUENTE.....	42
<b>FIGURA 17</b> MEZCLA 30LRS-70AR, EFLUENTE DE MEZCLA 30LRS-70AR Y EFLUENTE DE HUMEDAL ARTIFICIAL 30LRS-70AR.....	44
<b>FIGURA 18</b> MEZCLA 50AR-50LRS, EFLUENTE DE MEZCLA 50AR-50LRS Y EFLUENTE DE HUMEDAL ARTIFICIAL 50AR-50LRS.....	45
<b>FIGURA 19</b> MEZCLA 30AR-70LRS, EFLUENTE DE MEZCLA 30AR-70LRS Y EFLUENTE DE HUMEDAL ARTIFICIAL 30AR-70LRS.....	46
<b>FIGURA 20</b> HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL, A) INICIO DEL EXPERIMENTO Y B) FIN DEL EXPERIMENTO, 400 DÍAS DE DIFERENCIA. ....	47

<b>FIGURA 21</b> VEGETACIÓN DEL MÓDULO 1, A) <i>DIETES SP.</i> AL INICIO DEL EXPERIMENTO, B) RAÍCES DE <i>DIETES SP.</i> , C) <i>DIETES SP.</i> AL FINAL DEL EXPERIMENTO Y D) RAÍZ DE <i>DIETES SP.</i> AL FINAL DEL EXPERIMENTO. .....	48
<b>FIGURA 22</b> ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD DE LAS MEZCLAS ETAPA 1, DE LOS EFLUENTES DEL REACTOR DE CADA MEZCLA, ETAPA 2, Y DE LOS EFLUENTES DE LOS HUMEDALES, ETAPA 3. ....	52
<b>FIGURA 23</b> DIAGRAMA DE PARETO DE LA MEZCLA 30% LRS-70% AR.....	53
<b>FIGURA 24</b> DIAGRAMA DE PARETO DE LA MEZCLA 50% LRS-50% AR.....	53
<b>FIGURA 25</b> DIAGRAMA DE PARETO DE LA MEZCLA 70% LRS-30% AR.....	54

## RESUMEN

Los lixiviados de relleno sanitario son el líquido resultante de la disposición y descomposición de los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, este líquido contiene diferentes tipos de contaminantes y debido a sus concentraciones elevadas representan un problema ambiental sino se confina y trata adecuadamente. De las alternativas de tratamiento están las fisicoquímicas, sin embargo, hay necesidad de altos consumos de energía y/o químicos peligrosos; las biológicas, la ventaja que presentan estas alternativas es su mayor accesibilidad y una operación sencilla. Por lo que, en la presente investigación se evaluó el sistema compuesto por un reactor biológico de lecho fijo acoplado a un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, con 3 mezclas en dilución: 1) lixiviado 30% agua residual con 70 % de lixiviado, 2) 50% de lixiviado con 50% de agua residual y, 3) 70% de lixiviado con 30% de agua residual. El objetivo fue determinar la remoción que el sistema propuesto tendría con parámetros como la DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, coliformes fecales, nitrógeno total y fósforo total, donde la mejor mezcla fue la de 30% lixiviado con 70% agua residual obteniendo degradaciones de hasta 96%, 82%, 94%, 81%, 97%, 73% y 57% respectivamente de los parámetros mencionados.

**Palabras Clave:** Consorcio microbiano, constantes biocinéticas, relleno sanitario a cielo abierto, residuos sólidos urbanos´.

### **Declaración de responsabilidad de estudiante:**

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporte detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.



## **SUMMARY**

The landfill's leachate is the liquid resulting from the disposal and decomposition of urban solid waste in landfills. This liquid contains different types of contaminants and, due to its high concentrations, represents an environmental problem if this is not properly confined and treated. Among the treatment alternatives are physicochemical methods; however, these require high energy consumption and/or hazardous chemicals. Biological methods, these have the advantage of being more accessible and operationally simpler. Hence, the present research evaluated a system composed of a biological fixed-bed reactor coupled with a subsurface horizontal flow artificial wetland, using three dilution mixtures: 1) 30% leachate and 70% wastewater, 2) 50% leachate and 50% wastewater, and 3) 70% leachate and 30% wastewater. The aim was to determine the removal efficiency of the proposed system concerning parameters such as BOD<sub>5</sub>, COD, total suspended solids, fats and oils, fecal coliforms, total nitrogen, and total phosphorus. The best mixture was found to be 30% leachate with 70% wastewater, achieving degradation rates of up to 96%, 82%, 94%, 81%, 97%, 73%, and 57%, respectively, for the mentioned parameters.

**Key words:** Microbial consortium, biokinetic constants, open landfill, urban solid waste.

# 1 INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios son la principal técnica para manejo de residuos sólidos urbanos (RSU), de estos la mayoría trabajan a cielo abierto y sin algún control ambiental, es decir, no existe una regulación para el tratamiento de los desechos, ni de sus productos generados como lo son los lixiviados, propiciando con ello contaminación ambiental, problemáticas a la salud humana, flora y fauna. Los lixiviados de relleno sanitario (LRS) tienen un alto contenido de materia orgánica, contaminantes inorgánicos, metales pesados, sustancias tóxicas, farmacéuticos, microplásticos, presencia de patógenos, entre otros, lo que propicia un bajo índice de biodegradabilidad. Debido a esto es primordial proponer técnicas de saneamiento para los LRS donde la eficiencia, los costos y las consecuencias ambientales sean los principales criterios para tomar en consideración. Para su tratamiento se han evaluado sistemas fisicoquímicos (sistema Fentón, coagulación, oxidación con ozono, entre otros), convencionales (recirculación y dilución) y los biológicos (Lagunas, reactores, humedales, algas y microorganismos), sin embargo, los sistemas combinados para el tratamiento de lixiviados han demostrado obtener mejores remociones de contaminantes comparado con la aplicación de un solo sistema, por ello la presente investigación evaluará un sistema compuesto por un reactor biológico acoplado con un humedal artificial para el tratamiento de los lixiviados de relleno sanitario, se utilizó un tren de tratamiento biológico completamente y con ellos determinar su efecto sobre los parámetros fisicoquímicos como lo es la Demanda Biológica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), grasas y aceites, coliformes fecales y huevos de Helmintos, estos comparados con estándares legales como lo es la NOM-003-SEMARNAT-1997, para con ellos determinar si las remociones obtenidas son lo suficientemente buena como para considerar el reusó de los lixiviados tratados de bajo el sistema de tratamiento biológico.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 AGUAS RESIDUALES

El crecimiento demográfico ha provocado la explotación de recursos naturales, en especial del hídrico resultando en contaminación y disminución de la disponibilidad de agua dulce, generando con ello volúmenes masivos de Aguas Residuales (AR). Estas AR se describen como cualquier agua cuya calidad ha sido alterada, resultando en un líquido turbio con olor séptico debido a su extracción para uso y servicio de los seres humanos en los sectores: industrial, doméstico, hospitales, urbano, agrícola, entre otros (Onu et al., 2023; Saxena et al., 2021; Sharma et al., 2020). La composición de las AR depende de su fuente de alimentación, sin embargo, todas tienen concentraciones elevadas de compuestos orgánicos e inorgánicos, salinidad, nitratos y fosfatos (Alarjani et al., 2021; Dinh et al., 2021; Li et al., 2021). Debido a estos compuestos se llega a provocar afectaciones a la salud con enfermedades como la shigelosis, cólera, fiebre, tifoidea, diarrea, anquilostomiasis, cáncer (Leonel & Tonetti, 2021; Natasha et al., 2021); al ambiente por ser causante de eutrofización y disminuyendo el oxígeno disuelto (OD) en el agua (Alarjani et al., 2021; Li et al., 2021).

Por lo que la aplicación tecnologías de tratamiento físicos, químicos y biológicos han sido estudiados para ayudar a disminuir la carga contaminante y toxicidad de las aguas residuales y así reutilización de las AR antes de su descarga a cuerpos receptores, lo cual favorece el saneamiento urbano y seguridad hídrica, evitando la dispersión de los contaminantes presentes en las AR al suelo, subsuelo y cuerpos de agua y así contribuyendo a la protección de la salud pública y el medio ambiente. (Breitenmoser et al., 2022; Dinh et al., 2021; Natasha et al., 2021). Los parámetros que se evalúan son: sólidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), grasas y aceites, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales. (CONAGUA, 2022; SEMARNAT, 2004).

### 2.1.1 Normativa vigente

La información y educación continua es vital para una concientización del manejo de aguas residuales, donde la economía y la política son los factores importantes, por lo que las Normas Oficiales Mexicanas establecen los límites permisibles de contaminantes en aguas que han pasado por procesos individuales o combinados del tipo físico, químico, biológico u otros, con el fin de proteger su calidad y posibilitar el reúso (Onu et al., 2023).

**Cuadro 1** Límites máximos permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021 para riego de áreas verdes valor instantáneo.

Parámetros	Unidad	Límites máximos permisibles
Temperatura	(°C)	35
Grasas y aceites	(mg/L)	21
Sólidos suspendidos totales (SST)	(mg/L)	42
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	(mg/L)	84
Nitrógeno Total (NT)	(mg/L)	NA
Fósforo Total (FT)	(mg/L)	NA
Huevos de Helminthos	(h/L)	1

NA: No aplica

**Cuadro 2** Límites máximos permisibles para metales pesados en la NOM-001-SEMARNAT-2021 para riego de áreas verdes valor instantáneo.

Parámetros	Unidad	Límites máximos permisibles
Arsénico	(mg/L)	0.4
Cadmio	(mg/L)	0.1
Cianuro	(mg/L)	3
Cobre	(mg/L)	6
Cromo	(mg/L)	1
Mercurio	(mg/L)	0.01
Níquel	(mg/L)	4
Plomo	(mg/L)	1
Zinc	(mg/L)	20

**Cuadro 3** Límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal NOM-002-SEMARNAT-1996 valor instantáneo.

Parámetros	Unidad	Límites máximos permisibles
pH		5.5-10
Grasa y aceites	(mg/L)	100
Sólidos sedimentables	(mg/L)	10
Arsénico total	(mg/L)	1
Cadmio Total	(mg/L)	1
Cianuro Total	(mg/L)	2
Cobre Total	(mg/L)	20
Cromo hexavalente	(mg/L)	1
Mercurio Total	(mg/L)	0.02
Níquel Total	(mg/L)	8
Plomo Total	(mg/L)	2
Zinc Total	(mg/L)	12

**Cuadro 4** Límites máximos permisibles en aguas tratadas para servicios al público NOM-0003-SEMARNAT-1997 promedio mensual.

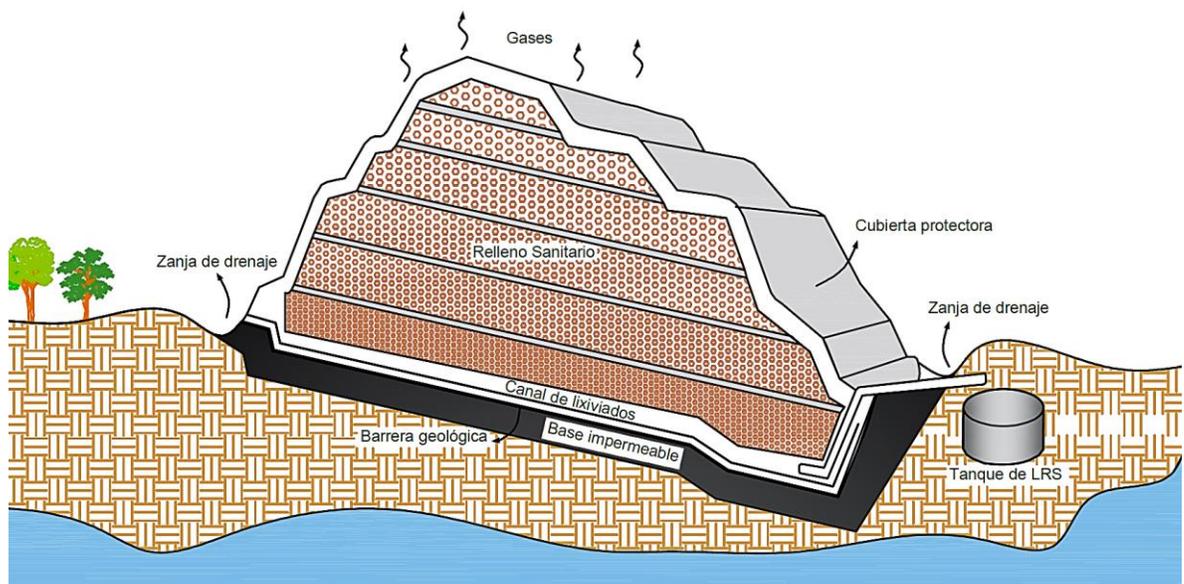
Parámetros	Unidad	Límites máximos permisibles (PM)	
		Contacto directo	Contacto indirecto u ocasional
Coliformes fecales	NMP/100 ml	240	1,000
Huevos de Helmintos	(h/L)	<1	<5
Grasas y aceites	(mg/L)	15	15
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	20	30
SST	(mg/L)	20	30

## 2.2 RELLENO SANITARIO

El Relleno Sanitario (RS), es un terreno donde se encuentra la Infraestructura para la gestión, almacenamiento y confinamiento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y así eliminar o minimizar el impacto inherente que tienen. Los RSU son un conjunto de residuos sólidos de sectores empresariales, agrícolas, espacios públicos, viviendas, hospitales, centros comerciales y escuelas, compuestos por plásticos, electrónicos, madera vieja o dañada, desechos sanitarios, medicamentos caducados, material de limpieza, excrementos de animales, productos hortícolas

desnutridos, entre otros. La disposición puede ser directamente en el suelo (recreación de terrenos) o llenando una abertura en el suelo (Vertedero), el cual está destinado a cubrir los RSU por medio de capas de geotextil y tierra, **Figura 1**, (Bandala et al., 2021; Quadri & Dohare, 2021; Rocha Lebron et al., 2021)

Según la NOM-083-SEMARNAT-2003, los rellenos sanitarios se clasifican por el tonelaje recibido por día, considerando 4 clasificaciones de la A (mayor a 100 ton), B (50 hasta 10 ton), C (10 a 50 ton) y la D (menor a 10 ton), siendo de mayor impacta la de la clasificación A (Chen et al., 2020).



**Figura 1** Características e infraestructura de un relleno sanitario. Modificado de (Quadri & Dohare, 2021; Zhang et al., 2021).

### 2.3 PRINCIPALES PRODUCTOS DE RELLENO SANITARIO

Gases de relleno sanitario, consisten en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y gas de amonio, el  $\text{CH}_4$  es un gas inflamable que podría provocar un incendio, así como su liberación daña la capa de ozono, este es más peligroso comparado con el  $\text{CO}_2$ , la combinación de estos gases resulta en un olor desagradable, riesgo de incendio, daño a la capa de ozono (Quadri & Dohare, 2021).

El Lixiviado de Relleno Sanitario (LRS) es un líquido que emana del fondo del relleno sanitario, de color oscuro, turbio y con altas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos, nutrientes, entre otros. Estos son el resultado de procesos físicos, químicos y biológicos de la interacción de los RSU con el ambiente, preocupante por su impacto negativo en suelo, agua y aire, así también por su persistencia en los mismos, provocando afectaciones a la calidad de los recursos naturales, cuerpos de agua, salud humana e higiene. El volumen de LRS producidos por un relleno sanitario depende en gran medida a la separación, colección y disposición de los RSU (Bandala et al., 2021; Ferdous et al., 2021; Naveen et al., 2017; Sohail et al., 2023).

#### **2.4 LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO**

El LRS es una mezcla líquida generada por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos del contenido de agua y degradación de los RSU, así como la filtración de aguas pluviales a través de las zonas expuestas en el RSU, afluencias de aguas subterráneas, escorrentía de aguas superficiales y el contenido de humedad del suelo de cobertura (Bandala et al., 2021; Mandal et al., 2017; Naveen et al., 2017; Teng et al., 2021).

La composición y clasificación de los LRS varía en función del tipo, calidad, volumen y manejo de RSU, degradación (hidrólisis, adsorción, biodegradación, especiación, disolución, dilución, intercambio iónico, redox, tiempo de contacto, separación, gas de precipitación, generación de calor y transporte), la edad del relleno sanitario, la infraestructura de disposición, material de revestimiento, la hidrogeología y condiciones climáticas, es decir, la composición de los lixiviados va a variar entre vertederos, así como en las diferentes estaciones del año (Bandala et al., 2021; Jagaba et al., 2021; Rocha Lebron et al., 2021; Teng et al., 2021).

Se estima que 200 L de LRS se generan por cada tonelada de residuos en una disposición inicial, y que, un vertedero puede seguir generando lixiviados durante más de 50 años (Cárdenas-Ferrer et al., 2020).

En los LRS se han encontrado gran variedad de compuestos como lo son:

- Sustancias orgánicas disueltas (alcoholes, húmicos, fúlvicos y VFA), (Jagaba et al., 2021).
- Componentes inorgánicos como: Amonio, bicarbonatos, calcio, cloruro, hierro, magnesio, manganeso, potasio, sodio, carbonatos, fluoruro, yoduro, cianuro, nitrato, nitrito, sulfato y bicarbonatos (Jagaba et al., 2021; Mandal et al., 2017).
- Metales pesados como: Arsénico, cadmio, cromo, cobalto, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc (Jagaba et al., 2021; Mandal et al., 2017).
- Compuestos orgánicos xenobióticos los cuales se aportan en los vertederos sanitarios mediante el uso de productos químicos domésticos e industriales abarcando amplias variedades de hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles (el bisfenol y 2,4-di-tert-butilefenol), alifáticos clorados, plaguicidas, descriptores endocrinos, plastificantes, compuestos orgánicos clorados y halogenados, así como compuestos aromáticos como los éteres de difenilo polibromado, encontrados en plásticos, textiles, materiales de construcción, electrónicos (Jagaba et al., 2021; Mandal et al., 2017; Teng et al., 2021; Ye et al., 2019; Zhang et al., 2021).

El LRS también contiene compuestos orgánicos persistentes, organismos patógenos, productos farmacéuticos (antibióticos, antiinflamatorios, estimulantes, bloqueadores, de cuidado personal, subproductos de desinfección entre otros), sales totales disueltas, NH<sub>3</sub>-N, alcalinidad total, DQO, dureza total, disolventes y carcinógenos además de presentar un olor fétido.(Jagaba et al., 2021; Teng et al., 2021)

El LRS es un líquido preocupante por la persistencia ambiental que tiene, transporte a larga distancia, bioacumulación y naturaleza tóxica (Zhang et al., 2021). La filtración de lixiviados da lugar a diversos riesgos de contaminación ambiental, como la contaminación del suelo; contaminación en agua causando eutrofización

propagando algas, agotando el oxígeno, pérdidas de especies, aumento de color, turbidez y toxicidad en el agua (Bandala et al., 2021; Begum et al., 2018; Tighiri & Erkurt, 2019); problemas a la salud con exposición prolongada como efectos neurotóxicos, carcinógenos, efectos negativos en la salud reproductiva e inmunidad, malignidad, problemas respiratorios, deformidades en niños (Quadri & Dohare, 2021; Zhang et al., 2021).

#### **2.4.2 Interacción de lixiviados con el ambiente**

La urbanización ha incrementado la mancha urbana lo que ha resultado en una centralización de los vertederos, es decir, los RS que se encontraban en las afueras de las ciudades ahora son parte de estas, así como también se ha incrementado la generación de RSU y ha dificultado la recolección de los mismo causando la utilización de RS no regulados, con estos factores se ha provocado una mayor interacción con residentes de los alrededores, fauna y flora. Los contaminantes de los RS pueden llegar a cuerpos de agua, suelo (superficial y subterráneo) y atmosfera, para posteriormente acumularse en plantas que llegan a ser consumidas por animales. El transporte de los lixiviados llega a ser a través de generación de plagas, precipitaciones secas y húmedas, escorrentía, volatilización y lixiviación, aunado a la deficiente gestión de los residuos. (Jagaba et al., 2021; Quadri & Dohare, 2021; Rocha Lebron et al., 2021; Zhang et al., 2021).

#### **2.4.3 Fases de los lixiviados de relleno sanitario**

Con el paso del tiempo los LRS pasan por diferentes fases de degradación de la matriz de residuos orgánicos: aerobia o de transición inicial, acidogénica, metanogénica y por último la estabilización o maduración (Bandala et al., 2021; Mandal et al., 2017; Tałaj et al., 2019).

#### 2.4.3.1 *Fase aerobia o de transición inicial*

Esta fase dura un tiempo corto ya que es solo en el depositado de los RSU y el oxígeno es consumido rápidamente favoreciendo la formación de CO<sub>2</sub> (Bandala et al., 2021; Begum et al., 2018).

#### 2.4.3.2 *Fase acidogénica o ácida*

Etapa inicial en un vertedero joven, tras el agotamiento de oxígeno en las células de desecho, el pH del lixiviado es <6 debido a la degradación de compuestos orgánicos y a la formación de ácidos grasos volátiles, lo que resulta en altas concentraciones de materia orgánica representada con la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Se crea un entorno anaeróbico con una DQO más soluble, donde los microorganismos inertes comienzan a consumir la DQO conduciendo a la formación de ácidos orgánicos, en esta fase hay una degradación de proteínas (amonificación del nitrógeno orgánico) siendo la principal fuente de nitrógeno en los lixiviados. (Begum et al., 2018; Moraes Costa et al., 2019; Cano et al., 2020; Rocha Lebron et al., 2021).

#### 2.4.3.3 *Fase metanogénica*

El indicador de esta fase ha iniciado sucede cuando los ácidos grasos volátiles alcanzan su máximo y empieza a disminuir, este cambio indica que el LRS han entrado en la fase de formación de metano, donde se consumen los ácidos orgánicos que dan como resultado la formación de metano CH<sub>4</sub>, los ácidos grasos volátiles se convertirán en biogás (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>), el será pH > 7, el material orgánico estará presente como ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y sustancias orgánicas xenobióticas, debido a la mineralización de los compuestos orgánicos simples. Las concentraciones de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> que se encuentran en lixiviados envejecidos debido a la amonificación continuara sin degradación significativa a lo largo de los años, así también quedan remanentes de compuestos recalcitrantes (Begum et al., 2018;

Cano et al., 2020; Gu et al., 2020; Mandal et al., 2017; Moraes Costa et al., 2019; Rocha Lebron et al., 2021).

#### 2.4.3.4 Fase de estabilización o de maduración

Se dice que el lixiviado de vertedero madura cuando pasa por todas las fases mencionadas. El pH y la alcalinidad de un lixiviado de relleno sanitario son indicadores del grado de estabilización, en esta fase el nitrógeno tiene mayores concentraciones comparado con la primera fase, menor actividad microbiana y baja producción de metano (Begum et al., 2018; Bandala et al., 2021; Gu et al., 2020)

#### 2.4.4 Clasificación de los lixiviados de relleno sanitario

La edad del RS es un factor clave que afecta la composición y las propiedades físicas, químicas y biológicas de los LRS, se divide en tres clasificaciones según la edad del RS joven, Intermedio y viejo, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, (Teng et al., 2021).

#### 2.4.4.5 Lixiviados jóvenes

Los LRS jóvenes, **Cuadro 5**, están compuestos principalmente por materia orgánica hidrofílica de bajo peso molecular, con bajos valores de pH, altas concentraciones de DBO<sub>5</sub> y DQO lo que resulta en un alto índice de biodegradabilidad (DBO<sub>5</sub>/DQO mayor a 0.5). Se produce una fermentación que da lugar a ácidos grasos volátiles, reforzada por un alto contenido de humedad en los RSU, concentraciones elevadas de amoníaco (<400 mg/L) y nitrógeno amoniacal debido a la desaminación de aminoácidos durante la descomposición de compuestos orgánicos (Yalcuk & Ugurlu, 2009; Rocha Lebron et al., 2021; Teng et al., 2021; Jagaba et al., 2021) .

El LRS joven contiene mucho menos orgánicos refractarios que el LRS maduro (Jagaba et al., 2021).

#### 2.4.4.6 Lixiviados intermedios

LRS Intermedio de 5 a 10 años, **Cuadro 5**, tiene un índice de biodegradabilidad moderada, su relación de DQO/NT es de 3-6. La parte biodegradable de los contaminantes orgánicos va disminuyendo con la edad del RS, posiblemente por la descomposición anaeróbica que afecta al RS (Jagaba et al., 2021).

#### 2.4.4.7 Lixiviados Viejos o maduros

LRS Viejos o maduros, **Cuadro 5**, están presentes en RS mayores a 10 años, inician con la fase metanogénica, donde los ácidos grasos volátiles se convierten en biogás (principalmente CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>), para continuar con la fase de estabilización. Son los de menor concentración de sustancias orgánicas biodegradables (DQO <3000 mg/L), bajo índice de biodegradabilidad DBO<sub>5</sub>/DQO (<0.1), lo que indica la presencia de compuestos recalcitrantes o biorefractarios como los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y fracción hidrofílica, estos tienen un alto peso molecular, lo cual genera un aumento de pH, reduciendo la solubilidad de metales ayudando a disminuir las concentraciones de los metales pesados en los LRS. El amoníaco con concentraciones mayores a 1000 mg/L es el principal contaminante que va a perdurar en el LRS y no disminuye con la edad del RS (Jagaba et al., 2021; Rocha Lebron et al., 2021; Teng et al., 2021; Yalcuk & Ugurlu, 2009).

**Cuadro 5** Variaciones en la composición fisicoquímica de lixiviados en función a la edad del relleno sanitario en regiones templadas. Modificado de (Moraes Costa et al., 2019; Rocha Lebron et al., 2021)

Parámetros	Unidad	Tipo de Lixiviado		
		Joven	Intermedio	Viejo
Edad del RS	Años	<5	5-10	>10
pH		<6.0	6.0-7.0	>7.0
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	>10,000	1,000-4,000	50-1,000
DQO	(mg/L)	>15,000	5,000-15,000	5,000-1,000
DBO <sub>5</sub> /DQO		≥ 0.6	0.1-0.6	≤ 0.1
Conductividad	(ms/cm)	15-41.5	6.0-14	-
SDT	(mg/L)	10,000-25,000	5,000-10,000	2,000-5,000
NT	(mg/L)	1500-4500	400-800	75-300
PT	(mg/L)	100-300	10-100	-
Metales pesados	(mg/L)	>2	>2	<2

#### **2.4.5 Métodos de tratamiento de los lixiviados de relleno sanitario**

Los métodos de tratamiento tienen la finalidad de minimizar el daño causado por los LRS creando alternativas para su estabilización y así reducir el uso de agua dulce mediante el reciclado de los LRS. Se busca reducir costos y el uso de químicos peligrosos. Los métodos de tratamiento se pueden dividir en 3 grandes clasificaciones: físicos-convencionales, químicos y biológicos, sin embargo, la combinación de tratamientos mejora la remoción de contaminantes de los LRS (Onu et al., 2023; Pourbavarsad et al., 2021; Saxena et al., 2021; Ye et al., 2019).

##### *2.4.5.1 Métodos físicos-convencionales*

Procesos de uso común donde se aprovechan las propiedades físicas y/o mecánicas de los sistemas; como la recirculación de lixiviados, este método mejora el rendimiento hidrolítico de los biorresiduos, mostrando un efecto positivo en el proceso acidogénico por medio de la mejora en la hidrólisis y la acidificación (Saadoun et al., 2022); así también influye en la descomposición acelerada de desechos ya que se genera una estimulación en la actividad microbiana (Mandal et al., 2017). Dilución de lixiviados con agua residual y transferencia a plantas depuradoras (Teng et al., 2021); filtración por membrana (microfiltración/ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa) (Rocha Lebron et al., 2021); Ultrasonido antes del paso biológico parece ser una opción interesante, revelando que la zonificación de los LRS aumenta la biodegradabilidad y reduce su toxicidad para los microorganismos del lodo activado (Grosser et al., 2019).

##### *2.4.5.2 Métodos químicos*

Normalmente usados como post-tratamiento, tiene el propósito de que exista una interacción química que proporcione una separación de los componentes, algunos ejemplos de estos tratamientos son: Oxidación electroquímica la cual ha demostrado ser eficiente en remoción de la DQO y nitrógeno amoniacal de LRS (Mandal et al., 2017); Tratamiento electroquímico degradando hasta un 90%

concentraciones de piridina y productos derivados (Lou et al., 2021); Fentón obtuvo remociones de la DQO de hasta 38.8%, sólidos totales de 51% y de turbidez de 98%, el tratamiento se lleva a cabo mediante la reacción entre peróxido de hidrógeno y un catalizador de hierro, generalmente en forma de iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) o férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ), la reacción produce radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ), es decir, implica la generación de radicales hidroxilo para descomponer contaminantes orgánicos (Medina Valderrama et al., 2016).

#### 2.4.5.3 *Métodos biológicos*

Los métodos biológicos incluyen el compostaje para tener una degradación de la materia orgánica y convertirlo en suelo similar al humus, con una reducción de la DQO de 80% (Mirghorayshi et al., 2021); Biorreactor de membrana con osmosis inversa (Chen et al., 2020); Biorreactor de membrana (MBR) combinado con nanofiltración/ósmosis inversa, llega a cumplir con los estándares de descarga de efluentes para nitrógeno amoniacal, metales pesados y contaminantes altamente tóxicos (Ye et al., 2019); Biorreactor de lecho móvil consiste en bio-portadores suspendidos donde se tiene un consorcio microbiano en forma de flóculos o biopelícula, estos tienen libre movimiento por el licor mixto debido a la aeración continua (Saxena et al., 2021); Biotratamiento de lixiviados por microalgas-bacterias en un modo de secuenciación por lotes utilizando un fotobiorreactor. En ambos lotes, se eliminó completamente el  $\text{N-NH}_4$  del lixiviado. En el segundo lote, las eficiencias de eliminación de nitrato, DQO y fenol fueron superiores al 90%. La toxicidad relativa se redujo de 57,32 a 1,12% al final del segundo lote. La coexistencia de microalgas y bacterias desempeñó un papel importante en el tratamiento de lixiviados y la producción de biomasa con fines de biorrefinería.(Tighiri & Erkurt, 2019).

## **2.5 TRATAMIENTO DE LIXIVIADO CON AGUA RESIDUAL**

El tratamiento del Lixiviado de Relleno Sanitario (LRS) en dilución con agua residual permite la reducción de la concentración de contaminantes, toxicidad y de la carga orgánica, mejorando la relación  $DBO_5/DQO$ , la hidrólisis y la acidogénesis del LRS, y así hacer un afluente apto para el tratamiento biológico donde y a su vez no afecte a los consorcios microbianos responsables de la degradación (Rocha Lebron et al., 2021; Saadoun et al., 2022).

## **2.6 REACTOR BIOLÓGICO DE LECHO FIJO**

El reactor biológico de lecho fijo es una alternativa al sistema convencional de lodos activados, consiste en un tanque aireado que garantiza la homogenización y oxigenación del AR, con un soporte inerte de diferentes materiales como: plásticos, esponjas, rocas y polímeros extracelulares, el soporte permite el adhesión y desarrollo de una biopelícula, propiciando un mayor contacto entre el sustrato en las aguas residuales y la biomasa en el medio de soporte (Alarjani et al., 2021; Mirghorayshi et al., 2021; Rocha Lebron et al., 2021; Saxena et al., 2021). La biopelícula es un consorcio microbiano o biomasa que se cultiva y aclimata dentro del reactor, esta biomasa descompone los contaminantes y materia orgánica hasta una forma iónica facilitando la absorción por los microorganismos como fuente de energía, así también realiza una transformación por medio del metabolismo aerobio en biomasa biológica,  $CO_2$ , agua y minerales (Al-Amshawee et al., 2020; Rocha Lebron et al., 2021; Tałałaj et al., 2019).

Las ventajas que muestra este sistema sobre el sistema convencional de lodos activados es la disminución de pérdida así como mayor retención de biomasa activa, reducción del tiempo hidráulico de retención, y residencia de las células, bajo requerimiento de espacio y uso de tanque de sedimentación, menor producción de lodos, esto debido a la aplicación de materiales de soporte, también es más resistente hacia un alto contenido de nitrógeno amoniacal (Alarjani et al., 2021; Mirghorayshi et al., 2021; Rocha Lebron et al., 2021).

## 2.7 HUMEDAL ARTIFICIAL

Los humedales artificiales (CW, por sus siglas en inglés) son sistemas saturados que imitan los procesos de los humedales naturales, aplican procesos de biotransformación para el tratamiento (Bakhshoodeh et al., 2020; Cano et al., 2020).

El sistema de tratamiento cuenta con procesos físicos que incluyen la sedimentación, sorción, volatilización y filtración; procesos químicos como la precipitación, y adsorción; procesos biológicos como lo es la degradación microbiana adsorción de la zona radicular, nitrificación y desnitrificación. Los procesos anaerobios y aeróbicos tienen lugar en los poros del medio filtrante (arena o grava). Los CW ayudan en la eliminación de fósforo, nitrógeno, amoníaco y nitratos (Bakhshoodeh et al., 2020; Yalcuk & Ugurlu, 2009), fármacos como bisfenol S, fipronil, ketoprofeno, entre otros (Ren et al., 2023). Al igual tiene la capacidad de contener contaminantes debido a la presencia de biopelículas y rizosfera, así como a la ausencia de descarga de lodos (Yang et al., 2022).

Los CW generalmente se clasifican en función de la presencia/ausencia de agua en la superficie, flujo de superficie libre o flujo subsuperficial, y por la dirección del flujo (vertical u horizontal). Los sistemas de flujo subsuperficial son aquellos donde el agua se mantiene por debajo de las capas de sustrato a través del enraizamiento de las plantas, causan menos problemas derivados de olores, insectos o exposición pública, haciéndolos adecuados para el tratamiento del LRS (Bakhshoodeh et al., 2020; Gaballah et al., 2022; Wdowczyk et al., 2022; Yalcuk & Ugurlu, 2009).

Los humedales artificiales con flujo subsuperficial horizontal (HAFSH), tienen una entrada continua bajo la superficie del sustrato hasta alcanzar la salida, en este sistema se presenta un entorno anaeróbico que promueve la desnitrificación (Gaballah et al., 2022).

La composición microbiana puede estar relacionada con la presencia de especies de macrófitos, la absorción por los macrófitos es un mecanismo de “eliminación” de contaminantes siendo una función indirecta al suministrar oxígeno a la rizosfera, suministro de sustrato (raíces y rizomas) para el crecimiento de bacterias adheridas

o aislamiento durante períodos de frío (Bakhshoodeh et al., 2020; Vymazal et al., 2021).

La vegetación en los CW realiza funciones directas como la adsorción de nutrientes y metales pesados; y funciones indirectas como el suministro de oxígeno a la rizosfera, suministro de sustrato (raíces y rizomas) para el crecimiento de bacterias o aislamiento durante períodos de frío (Bakhshoodeh et al., 2020; Vymazal et al., 2021). La diversidad de plantas ayuda en la eficiencia de funcionamiento de los CW (Vymazal et al., 2021)

Las raíces también son sitios primarios para la absorción de nutrientes (Bakhshoodeh et al., 2020).

### **3 HIPÓTESIS**

El sistema compuesto por un reactor biológico de lecho fijo y un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, a través del tratamiento por dilución de lixiviado de relleno sanitario en agua residual, tendrá efecto significativo sobre la remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO, nitrógeno y fósforo totales.

## **4 OBJETIVO**

### **4.8 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la eficiencia de la remediación de lixiviados de relleno sanitario de un sistema de reactor de lecho fijo acoplado a un humedal artificial.

### **4.9 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar las propiedades fisicoquímicas del lixiviado y microbiológicas de lixiviados de relleno sanitario.
- Estimar eficiencia de remediación de lixiviados de relleno sanitario en un reactor biológico de lecho fijo.
- Determinar el efecto de un humedal artificial sobre la remoción de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del efluente de reactor biológico de lecho fijo.

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 SITIO DE ESTUDIO

El presente trabajo se realizó en el laboratorio de Tratamiento de Aguas Residuales ubicado en el Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro (CA-UAQ), (20°37'27.71 "N, 100°22'0.52 "O).

### 5.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO

Las muestras de LRS se tomaron del relleno sanitario a cielo abierto ubicado en San Pedro Ahuacatlán, San Juan del Río, Querétaro (20°26'09.6 "N, 99°58'15.61 "O) siguiendo la NMX-AA-003-SCFI-2019 para el muestreo de aguas residuales. El LRS se colectó de manera aleatoria en varios puntos del canal y de la piscina de lixiviados, con un filtrado por medio de una malla de plástico para retirar sólidos de tamaño superior a 0.5 cm, para obtener un volumen de muestra compuesta de 1000 L. La muestra se transportó y almacenó en recipientes de 20 L en CA-UAQ, donde se llevó a cabo la experimentación a una temperatura ambiente (17 °C – 28 °C).

### 5.3 CARACTERIZACIÓN DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO

De la muestra compuesta, se tomaron 10 L para la caracterización del LRS por medio de los parámetros fisicoquímicos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y microbiológicos, basados en la NOM-003-SEMARNAT-1997, norma que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, esta norma será utilizada como estándar para determinar si las remociones fueron aceptables a estándares legales.

**Cuadro 6** Análisis fisicoquímicos necesario para la caracterización del lixiviado de relleno sanitario

Parámetros	Método
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013
SST	NMX-AA-034-SCFI-2015
NT	NMX-AA-026-SCFI-2010
PT	NMX-AA-029-SCFI-2001
DBO <sub>5</sub>	NMX-AA-028-SCFI-2021
DQO	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Arsénico	NMX-AA-046-SCFI-1981
Cadmio	NXM-AA-060-1978
Cobre	NMX-AA-066-1981
Cromo	NMX-AA-044-SCFI-2014
Mercurio	NMX-AA-064-1981
Níquel	NOM-AA-76-1982
Plomo	NMX-AA-057-1981
Zinc	NMX-AA-074-SCFI-2014

SST: Sólidos Suspendidos Totales

NT: Nitrógeno Total

PT: Fosforo Total

**Cuadro 7** Análisis microbiológicos necesario para la caracterización de lixiviados de relleno sanitario

Parámetro	Método
Coliformes fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015
Huevos de Helmintos	NMX-AA-113-SCFI-2012

#### **5.4 COLECTA DE LODOS ACTIVADOS DE PLANTA DE TRATAMIENTO RESIDUAL.**

El lodo activado se colectó de la planta de tratamiento No. 4, ubicada en CA-UAQ (20°37'29.47 "N, 100°21'59.31 "O); **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se dejó sedimentar el lodo con agua residual durante 30 min en recipientes de 10 L, por medio de la decantación se retiró líquido sobrante, este proceso repitió hasta que se consiguieron 22 L de lodo.

#### **5.5 CONSTRUCCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL REACTOR BIOLÓGICO DE LECHO FIJO**

Este modelo estuvo compuesto por un tanque de acrílico con volumen de 74.385 L (altura de 45 cm, ancho de 28.5 cm y largo de 58 cm), se colocaron dos válvulas de 1": efluente y purga de biomasa; dos bombas de aireación con cuatro difusores en

el fondo del tanque para suministrar oxígeno, dos fueron colocadas en los laterales y dos en el centro para asegurar una aireación homogénea. El lecho fijo fue a base de botellas polietileno tereftalato de 3 L, 1.5 L y 0.6 L, colocados en bloque, este modelo estuvo propuesto por (Zúñiga Hernández, 2019).

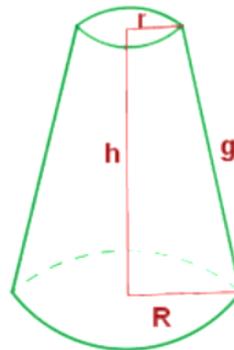
### 5.5.1 Área de contacto del soporte y biomasa adherida

El área superficial de contacto se obtuvo por medio del cono trunco y el cilindro.



**Figura 2** Evaluación de la botella para determinar el área superficial

Para obtener el área superficial del cono trunco se utilizan las **Ec. 1** y el área del cilindro la **Ec. 2**.



**Figura 3** Esquema del cono trunco para obtener el área de contacto

$$A = \pi g(R + r) \quad \text{Ec. 1}$$

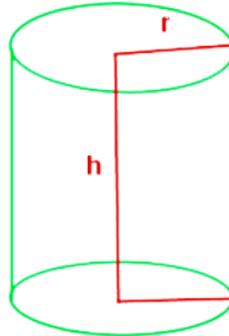
Donde:

A [m<sup>2</sup>]= Área total

R [m]= Radio mayor

r [m]=Radio menor

g [m]= Longitud inicio a final del cono



**Figura 4** Esquema del cilindro para obtener el área de contacto

$$A = 2\pi rh$$

**Ec. 2**

Donde:

A [m<sup>2</sup>]= Área total

h [m]= Altura

r [m]=Radio

## 5.6 CONSTANTES BIOCINÉTICAS

La estabilización del inoculo se revisó 28 días después con el modelo analizado por (Zúñiga Hernández et al., 2023), las constantes biocinética fueron: la utilizando tasa máxima de utilización de sustrato (k), constante de velocidad media (K<sub>s</sub>), rendimiento celular máximo (Y) y coeficiente de decaimiento endógeno (K<sub>d</sub>).

Donde para k y K<sub>s</sub>, se tiene la ecuación:

$$\frac{\theta X}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k * S} + \frac{1}{k}$$

**Ec. 3**

Donde:

θ [h]= Tiempo de retención hidráulico

X [mg/L]= Sólidos Suspendidos Totales

S<sub>0</sub> [mg/L]= Concentración de DQO en el afluente

S [mg/L]= Concentración de DQO en el efluente

k [h]= Tasa máxima de utilización de sustrato

$K_s$  [mg/L]= Constante velocidad media  
Para  $Y$  y  $K_d$ .

$$\frac{1}{\theta_c} = Y \frac{S_0 - S}{X\theta} - K_d$$

Ec. 4

Donde:

$Y$ = Rendimiento celular máximo

$K_d$  [ $h^{-1}$ ]= Coeficiente de decaimiento endógeno

Se monitoreo el pH y T ( $^{\circ}C$ ) con HANNA HI98191, Color verdadero (Pt-Co) con el colorímetro HANNA DR/890 y los SDT (ppm) se midieron con HANNA HI 9830 del agua residual y el efluente tratado por el RBLF cada 7 días.

### 5.7 MEZCLA LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO- AGUA RESIDUAL

El tratamiento de los LRS inició con un método convencional mediante la dilución del LRS en AR, para esto se probaron tres concentraciones de alimentación al reactor: 30% LRS - 70% AR, 50%LRS - 50% AR y 70% LRS - 30% AR.

Siguiendo la metodología del punto 5.3 donde en el **Cuadro 6** se enlistan las técnicas a utilizar para la caracterización fisicoquímica de los afluentes y efluentes, asimismo en el **Cuadro 7**, se indican las normas a utilizar para la medición de los parámetros microbiológicos de los afluentes y de los efluentes, esto para las 3 mezclas a evaluar en el tratamiento primario compuesto por la dilución y el reactor biológico. Con la EC. 3 se evaluó la eficiencia de remoción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

$$Remoción (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100$$

Ec. 5

Donde:

$C_i$ =Concentración inicial

$C_f$ =Concentración final

## 5.8 CONSTRUCCIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

El HAFSH estuvo compuesto por 4 módulos (altura 26 cm, largo 56 cm, ancho 43) con un volumen de 62.61 L, como sustrato se utilizó grava, tezontle y tierra negra con espesores de 7 cm, 7 cm, 5 cm respectivamente, con 4 ejemplares de plantas por modulo, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..



Figura 5 Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSH)

- En el módulo 1 se colocó *Dietes sp.* de la familia iridaceae, nombre común lirio persa.
- En el módulo 2 se colocó *Tulbaghia violácea* de la familia de las amarilidáceas nombre común ajo silvestre.
- En el módulo 3 se colocó *Lavandula officinalis* de la familia de las lamiáceas nombre común lavanda.
- En el módulo 4 se colocó *Equisetum arvense* de la familia de las equisetáceas nombre común cola de caballo.

## 5.9 ALIMENTACIÓN DEL HUMEDAL CON AGUAS DEL TRATAMIENTO PRIMARIO

El HAFSH fue alimentado con el efluente del tratamiento primario con el RBLF, el flujo fue entrada punto medio y salida punto medio, **Figura 6**. La posición de la

entrada y la salida del flujo del HAFSH tiene efectos importantes en el comportamiento hidráulico y en la eficiencia del tratamiento del humedal (Okhravi et al., 2018).



**Figura 6** Configuración del HAFSH

#### **5.10 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA TRATADA POR EL SISTEMA COMPUESTO POR REACTOR BIOLÓGICO Y HUMEDAL ARTIFICIAL.**

Para los análisis fisicoquímicos del agua tratada por el humedal artificial se seguirá el procedimiento descrito en el punto 5.3 Caracterización de los lixiviados de relleno sanitario y 5.7. Mezcla de lixiviado de relleno sanitario- Agua residual.

#### **5.11 ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD (IB) DE LOS LIXIVIADOS**

El IB se obtuvo tras calcular la relación  $DBO_5/DQO$ . Esta relación indicó qué fracción de la materia orgánica total existente en la muestra que puede descomponerse biológicamente.

## **5.12 BIOÉTICA EN LA INVESTIGACIÓN Y BUENAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO**

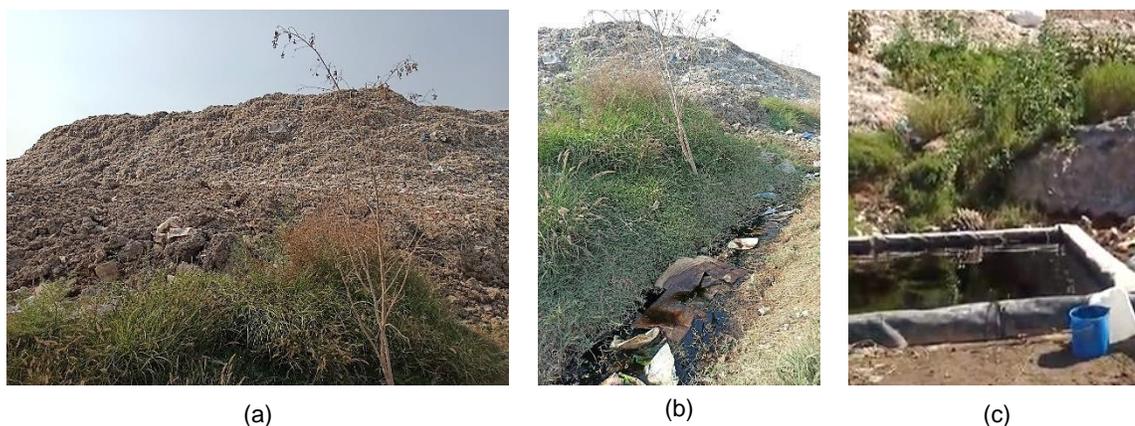
Se realizó el cumplimiento de las buenas prácticas de laboratorio siguiendo las normativas establecidas por el Comité de Seguridad e Higiene de la Facultad de Química. Se contó con los requisitos necesarios de seguridad personal, manteniendo el orden y la limpieza del área de trabajo, así como adecuado manejo y almacenamiento de reactivos y residuos. Finalmente se hace mención que en este trabajo de investigación no tuvo participación de sujetos humanos o animales para experimentación.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO

La toma de las muestras fue realizada de manera aleatoria en varios puntos del canal, Figura 7 (b), y de la piscina del LRS, Figura 7 (c), con un filtrado por medio de una malla de plástico para retirar solidos de tamaño superior a 0.5 cm, obteniendo una mezcla compuesta de 1000 L.

Como se observa en la **Figura 7** (a), el relleno sanitario es a cielo abierto, la infraestructura no cuenta con las necesidades del relleno sanitario ocasionando que el lixiviado haya creado un canal entre un camino rural y el relleno sanitario, este tiene contacto directo con el suelo, la vegetación y la población colindante. Asimismo, se observa que la piscina es de una capacidad insuficiente ya que se producen derrames en un tiempo aproximado de 24 horas.



**Figura 7** Relleno sanitario en San Pedro Ahuacatlán, San Juan de Río, a) Relleno Sanitario, b) Canal creado por el caudal de LRS y c) Piscina de LRS.

### 6.2 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO

Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica se muestran en el **Cuadro 8**, se observa que los valores de metales pesados son  $<1$  mg/L, indicando con ello que una concentración baja, por lo que para las siguientes caracterizaciones se consideró despreciable.

**Cuadro 8** Análisis fisicoquímico del Lixiviado de Relleno Sanitario

Parámetros	Unidad	Resultado
pH		7.57
Temperatura	(°C)	22.4
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	975.5
DQO	(mg/L)	3549.4
SST	(mg/L)	308
Grasas y aceites	(mg/L)	43
Nitrógeno Total	(mg/L)	277.5
Fósforo Total	(mg/L)	21.6
Arsénico	(mg/L)	0.15
Cadmio	(mg/L)	<0.18
Cobre	(mg/L)	<.047
Cromo	(mg/L)	<0.4
Mercurio	(mg/L)	<0.002
Níquel	(mg/L)	<0.68
Plomo	(mg/L)	<0.96
Zinc	(mg/L)	0.1

Con los resultados obtenidos de la caracterización microbiológica, **Cuadro 9**, donde se observa nula presencia de coliformes fecales, esto se ve posiblemente influenciado por la diversidad de comunidades bacterianas que contiene el lixiviado que llega a inhibir la identificación de los coliformes fecales.

**Cuadro 9** Análisis microbiológico del Lixiviado de Relleno Sanitario

Parámetros	Unidad	Resultado
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	<3
Huevos de Helminthos	(h/L)	0

De acuerdo con el **Cuadro 6**, donde se muestran los rangos de las composiciones fisicoquímicas de los lixiviados y con estos se clasifican los lixiviados con base a la edad del relleno sanitario (Moraes Costa et al., 2019; Rocha Lebron et al., 2021), se clasificó el lixiviado como viejo, **Cuadro 10**, es decir este cuenta con mayor concentración de materia inorgánica no biodegradable y grandes concentraciones de amonio, el relleno sanitario a cielo abierto tiene más de 30 años en operación,

acorde con los rangos establecidos para el lixiviado de relleno sanitario de esta edad.

**Cuadro 10** Clasificación del Lixiviado de Relleno Sanitario

Parámetros	Unidad	Lixiviado viejo	Resultado
Edad del RS	Años	>10	30
pH		>7.0	7.57
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	50-1,000	975.5
DQO	(mg/L)	5,000-1,000	3549.4
Nitrógeno Total	(mg/L)	75-300	277.5
Fósforo Total	(mg/L)	-	21.6
Metales pesados	(mg/L)	<2	<2

### 6.2.1 Caracterización del agua residual

En el **Cuadro 11**, se observa la caracterización fisicoquímica y microbiológica realizada al agua residual. Zúñiga Hernández et al., 2023, realizaron una caracterización del agua residual de la planta de tratamiento #4 de UAQ-CA, comparada con la NOM-003-SEMARNAT-1997 de huevos de Helminthos, grasas y aceites, DBO<sub>5</sub> Y SST obteniendo <1 h/L, 25 mg/L, 674 mg/L y 925 mg/L, respectivamente. Con la caracterización realizada en esta investigación se observa un incremento en grasas y aceites del 48%, un decremento del 3% en SST y un aumento del 4% en la DBO<sub>5</sub>, estos cambios se vieron probablemente afectados por las estaciones del año en las que se realizó la caracterización, así como la población fluctuante que se tuvo en los periodos de evaluación.

**Cuadro 11** Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual

Parámetros	Unidad	Resultado
pH		7.53 ±0.30
Temperatura	(°C)	22.06 ±3.32
Grasas y aceites	(mg/L)	36.92 ±10.15
SST	(mg/L)	899.85 ±208.35
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	703 ±114.85
DQO	(mg/L)	1254.54 ±316.94
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	56.31 ±16.70
Huevos de Helminthos	(h/L)	0

Nitrógeno Total	(mg/L)	34.38 ±12.56
Fósforo Total	(mg/L)	4.92 ±1.20

---

### 6.3 COLECTA DE LODOS ACTIVADOS DE PLANTA DE TRATAMIENTO RESIDUAL

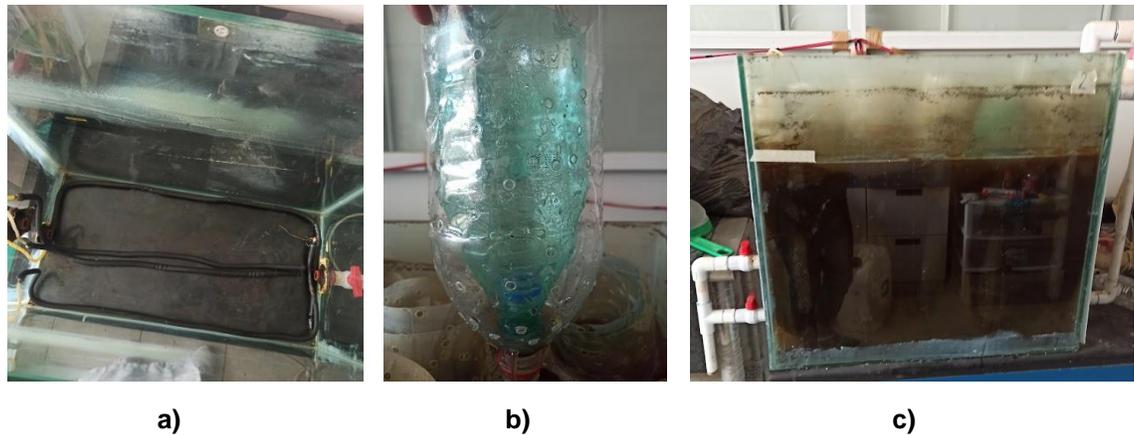
Los lodos activados se recolectaron de la planta de tratamiento No. 4, ubicada en CA-UAQ (20°37'29.47 "N, 100°21'59.31 "O), **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, obteniendo 22 L de lodos que sirvió como inóculo para iniciar el experimento.



**Figura 8** Planta de tratamiento No. 4 Campus Aeropuerto, UAQ.

### 6.4 CONSTRUCCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL REACTOR BIOLÓGICO DE LECHO FIJO

EL reactor estuvo compuesto por dos válvulas de 1" que permitieron la purga del exceso de lodos y la otra para el efluente, se incluyó cuatro difusores en el fondo del tanque para suministrar oxígeno, dos fueron colocadas en los laterales y dos en el centro para asegurar una aireación homogénea, **Figura 9** (a). El lecho fijo fue a base de botellas polietileno tereftalato de 3 L, 1.5 L y 0.6 L, colocados en bloque, **Figura 9** (b), para un terminado final como se muestra en la **Figura 9** (c).



**Figura 9** Construcción de reactor biológico de lecho fijo a base de polietileno tereftalato: a) difusores de aireación, b) disposición del lecho fijo con polietileno tereftalato y c) reactor biológico de lecho fijo.

Se ingresaron 22 L de lodo activado y se alimentó el reactor con 54 L de AR, se mantuvo la aireación desde el primer día para mantener las condiciones aeróbicas en el reactor.

Para la alimentación del reactor primero se retiraban 10 L por la válvula del efluente de agua tratada para posteriormente realizar la alimentación de 10 L de AR, pasando por la rejilla de pretratamiento para eliminar sólidos mayores a 0.1 cm.

#### **6.4.1 Área de contacto del lecho fijo y biomasa adherida**

La biomasa en el RBLF tuvo presencia en dos categorías, en suspensión y en una biopelícula, **Figura 10**, esta última se presentó en un área de contacto de  $6.29 \text{ m}^2$ , siendo la suma del área del cono trunco más la del cilindro por las dos caras tanto la externa como la interna que proporcionan una superficie de fijación para el lodo de las 3 botellas de polietileno tereftalato por los 20 de bloques que fueron colocados en el reactor. El soporte representó un 12% del volumen del RBLF.

Botella de 0.6 L	Botella de 1.5 L	Botella de 3 L
Cono trunco	Cono trunco	Cono trunco
R= 0.03 m	R= 0.04 m	R= 0.055 m
r= 0.01 m	r= 0.02 m	r= 0.015 m
g= 0.05 m	g= 0.08 m	g= 0.080 m
A= 0.013 m <sup>2</sup>	A= 0.028 m <sup>2</sup>	A= 0.035 m <sup>2</sup>
Cilindro	Cilindro	Cilindro
h= 0.12 m	h= 0.15 m	h= 0.17 m
r= 0.03 m	r= 0.04 m	r= 0.06 m
A= 0.045 m <sup>2</sup>	A= 0.075 m <sup>2</sup>	A= 0.117 m <sup>2</sup>
A <sub>total</sub> = 0.059 m <sup>2</sup>	A <sub>total</sub> = 0.103 m <sup>2</sup>	A <sub>total</sub> = 0.153 m <sup>2</sup>



**Figura 10** Soportes de polietileno tereftalato a) acomodo en el RBLF y b) Biomasa adherida al soporte.

## 6.5 CONSTANTES BIOCINÉTICAS

Los sistemas con lodos activados y un medio de soporte llega a estabilizar el efluente en 10 días mínimo (Saxena et al., 2021), por ello la evaluación del lodo se realizó a los 28 días utilizando el modelo evaluado por Zúñiga Hernández et al., 2023. Por medio de constantes biocinéticas: Tasa máxima de utilización de sustrato ( $k$ ), constante de velocidad media ( $K_s$ ), rendimiento celular máximo ( $Y$ ) y coeficiente de decaimiento endógeno ( $K_d$ ). Donde se usan los valores de la DQO soluble en el afluente, DQO soluble y sólidos suspendidos volátiles en el efluente. Consiste en realizar mediciones cada hora durante 8 horas, **Cuadro 12**, en este se observa una DQO inicial de 601 mg/L, donde al cabo del tiempo mencionado presentó una reducción del 89.5% con un valor de 63 mg/L. Los sólidos suspendidos volátiles se redujeron de 172 mg/L a 24 mg/L, representando estos en remoción del 86% en 8 horas.

Se realizó asimismo la evaluación a las 24 h, donde se obtuvieron remoción comparada con las 8 horas de 20% y 7% de DQO y SST respectivamente. Representando con ello que la mayor remoción de DQO Y SST, se realiza en las primeras 8 horas.

**Cuadro 12** Concentrado de datos de DQO Y SST en 24 horas.

Ciclo	$S_0$ DQO soluble en influyente (mg/L)	$S$ DQO soluble en efluente (mg/L)	$\theta$ Tiempo de retención hidráulica (h)	$X$ Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)
1	601		0	172
2		157	1	142
3		112	2	79
4		80	3	61
5		63	8	24

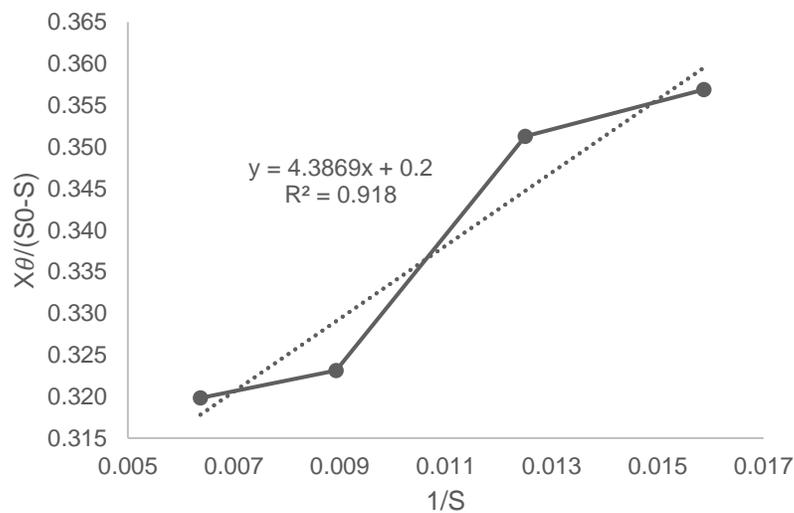
### 6.5.2 Tasa de utilización de sustrato (k) y Constante de velocidad media (K<sub>s</sub>)

Con los datos obtenidos en el **Cuadro 12**, se obtuvieron las variables asociadas a la tasa de utilización del sustrato (k) y a la constante de velocidad media (k<sub>s</sub>), **Cuadro 13**.

**Cuadro 13** Variables asociadas al cálculo de k y K<sub>s</sub>.

$X\theta$ (g SST/h*L)	1/S (g/L DQO)	$X\theta/(S_0-S)$ (h-1)
142.000	0.006	0.320
158.000	0.009	0.323
183.000	0.013	0.351
192.000	0.016	0.357

La **Figura 11** es el gráfico de  $X\theta/(S_0 - S)$  respecto a 1/S. En este gráfico la ordenada al origen es 1/k, que denota el inverso de la tasa máxima de utilización de sustrato; mientras que la pendiente es igual a K<sub>s</sub>/k. A partir de esta grafica se obtuvieron los valores de k y K<sub>s</sub> que fueron 5.0 h<sup>-1</sup> y 21.935 mg DQO /L respectivamente.



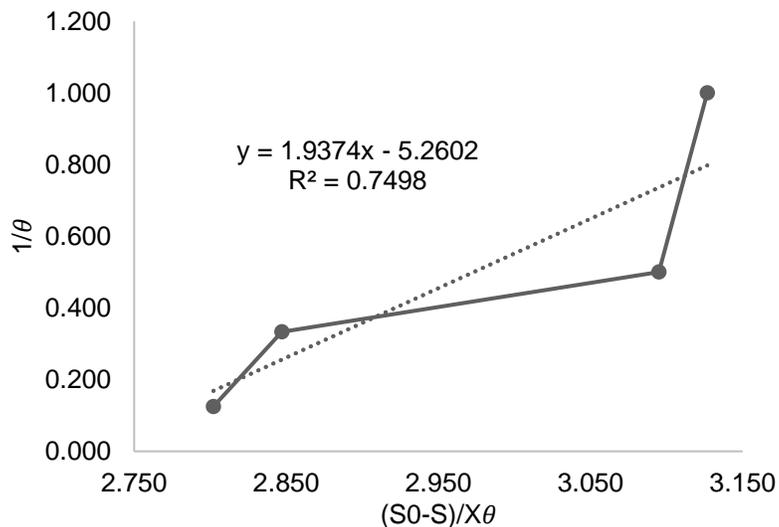
**Figura 11** Tasa máxima de crecimiento (k) y Constante de velocidad media (K<sub>s</sub>).

### 6.5.3 Rendimiento celular máximo (Y) y Coeficiente de decaimiento endógeno ( $K_d$ )

Con los datos obtenidos en el **Cuadro 12**, se obtuvieron las variables asociadas al rendimiento celular máximo (Y) y al coeficiente de decaimiento endógeno ( $k_d$ ), **Cuadro 14**.

**Cuadro 14** Variables asociadas al cálculo de Y y  $K_d$ .

$1/\theta$ ( $h^{-1}$ )	$(S_0-S)/X\theta$ ( $h^{-1}$ )
1.000	3.127
0.500	3.095
0.333	2.847
0.125	2.802



**Figura 12** Rendimiento celular máximo (Y) y el coeficiente de decaimiento endógeno ( $k_d$ ).

La **Figura 12**, muestra el gráfico que permitió calcular el rendimiento celular máximo (Y) de 0.5165 mg SSV/mg DQO, equivalente a la pendiente de la recta. El

coeficiente de decaimiento endógeno ( $k_d$ ) con un valor de  $0.12 \text{ h}^{-1}$ , congruente con la intersección del primer valor con el eje y.

**Cuadro 15** Resumen de Constantes Biocinéticas

Coeficiente	Valor obtenido	Rango	Unidades
k	5.000	4 a 12	g DQO/g SSV
$K_s$	21.935	1.0 a 30.0	mg/L DQO
Y	0.5162	0.08 a 0.6	mg SSV/ mg DQO
$K_d$	0.1200	0.02 a 0.15	$\text{h}^{-1}$

Con los valores mostrados el en **Cuadro 15**, se demuestra que el lodo tiene una estabilidad para seguir con el tren de tratamiento. Zúñiga Hernández et al., 2023, realizaron una evaluación de las constantes biocinéticas, dónde obtuvieron un  $k=5.6$  g DQO/g SSV, unas  $K_s=1.9$  g DQO/g SSV, Y  $0.085$  mg SSV/ mg DQO y una  $K_d=0.25$  mg SSV/ mg DQO, con ambos análisis se demuestra que el lodo de la planta de tratamiento #4, tiene un buen grado de desarrollo del consorcio microbiano, así como rendimiento y adaptabilidad.

## 6.6 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE MEZCLA LIXIVIADO CON AGUA RESIDUAL EN REACTOR BIOLÓGICO.

### 6.6.1 Agua residual

El residual y control del Reactor Biológico de Lecho Fijo (RBLF) se alimentó durante 29 días con AR para adaptación de lodo y control de RBLF, durante este periodo se obtuvieron remociones de color verdadero de hasta 80.92%, con valores promedio de 627 Pt-Co de la AR y 122 Pt-Co. En la **Figura 13**, se observa el AR junto con el AR tratada en 8 horas sin proceso de sedimentación o clarificación.



**Figura 13** Agua Residual vs Agua Residual tratada por el RBLF

Se realizó la evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la AR tratada para poder ser comparada con la NOM-003-SEMARNAT-1997, esta norma evalúa los parámetros de DBO<sub>5</sub>, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales y huevos de Helmintos, de estos las remociones fueron de 97%, 67%, 98%, 76% y sin presencia respectivamente, **Cuadro 16**, con estas remociones se alcanzó el cumplimiento de la norma mencionada, es decir, el consorcio microbiano estaba realizando adecuadamente de degradación de materia orgánica y contaminantes presentes en la AR.

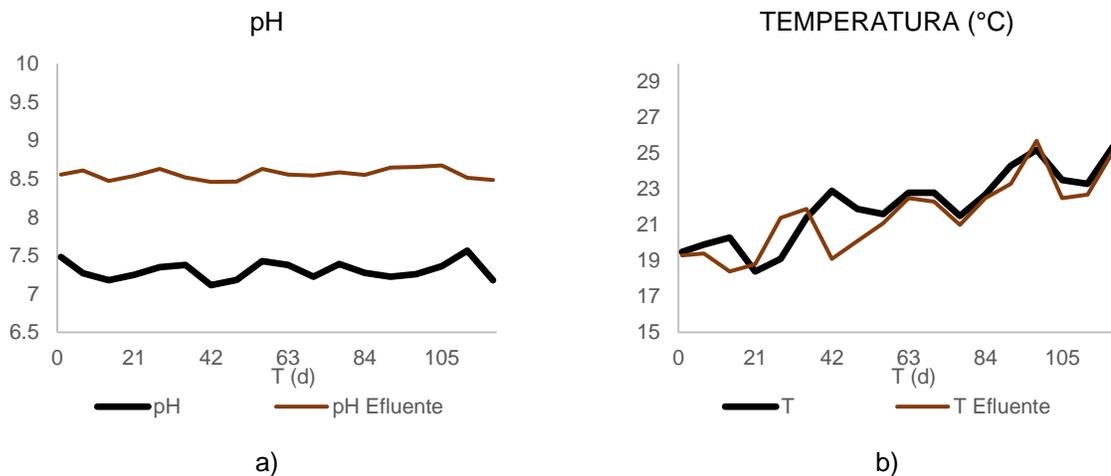
**Cuadro 16** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de efluente del reactor de lecho fijo del agua residual.

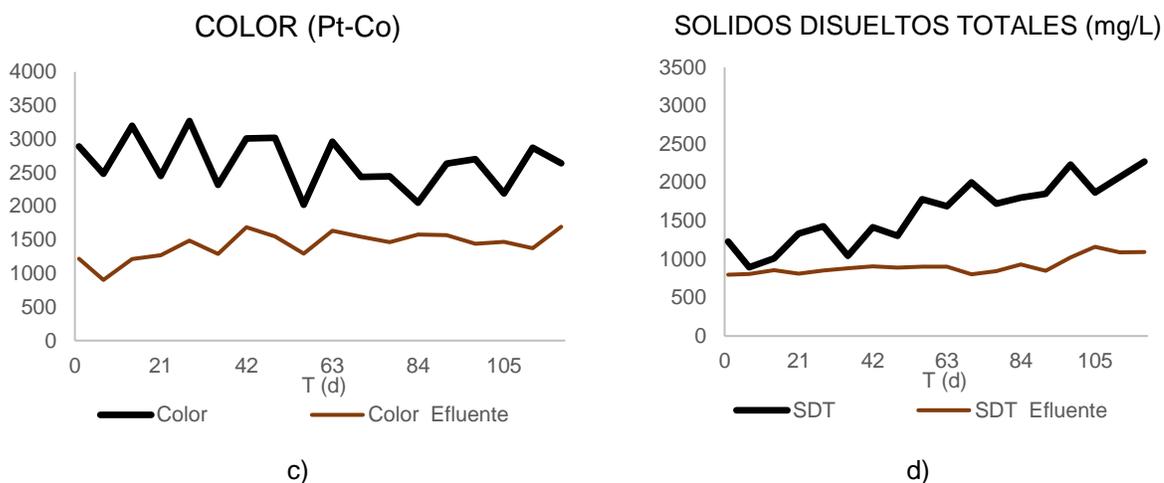
Agua residual (AR)					
Parámetros	Unidad	Afluente	Efluente	NOM-003-SEMARNAT-1997	Remoción
pH		7.53	8.38	-	-
Temperatura	(°C)	22.06	22.3	-	-
Grasas y aceites	(mg/L)	36.92	12.19	15	67%
SST	(mg/L)	897	17.86	30	98%
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	596	19.37	30	97%
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	56.31	13.31	1,000	76%
Huevos de Helmintos	(h/L)	0	0	<1	-
Nitrógeno Total	(mg/L)	34.38	12.82	-	63%
Fósforo Total	(mg/L)	15.22	2.08	-	86%

### 6.6.2 MEZCLA 30% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 70% AGUA RESIDUAL

Después de los primeros 29 días donde se alimentó al RBLF con agua residual, se tomó una muestra del efluente 7 días después de la evaluación de las constantes biocinéticas para determinar que el efluente pasara la NOM-003-SEMARNAT-1997, **Cuadro 16**, se realizó la alimentación del reactor con la mezcla 30% LRS- 70% AR, durante 2 semanas fue de forma gradual agregando solo 10 L en cada alimentación, después de estas dos semanas en el reactor estuvo compuesto por la mezcla mencionada.

En la **Figura 14** (a), demuestra la estabilización del efluente en un pH ligeramente básico de  $8.56 \pm 0.07$ , el reactor se mantuvo en una temperatura ambiente de  $21.51 \pm 2.08$  °C, **Figura 14** (b). La reducción de color del LRS indica la biodegradación de compuestos orgánicos consumidos por el consorcio microbiano presente en el reactor manteniéndose en un rango de  $1428.22 \pm 201.26$  Pt-Co, **Figura 14** (c). Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) se llegaron a remover hasta en un 60%, ayudando así con la disminución de color, el consorcio microbiano también estabilizó este parámetro en un promedio de  $911.86 \pm 109.28$  mg/L, **Figura 14** (d).





**Figura 14** Variación de a) pH, b) color verdadero, c) temperatura y d) SDT en la Mezcla 30LRS-70AR del afluente y efluente.

En el **Cuadro 17** se observa que los parámetros de  $DBO_5$  y los SST no cumplen con la NOM-003-SEMARNAT-1997, faltando una remoción mayor a 81% y 19% respectivamente.

**Cuadro 17** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de efluente del reactor de lecho fijo de la mezcla 30% lixiviado de relleno sanitario con 70% de agua residual

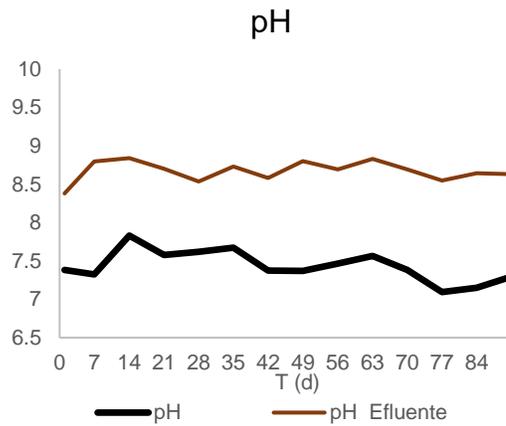
Mezcla 30LRS-70AR					
Parámetros	Unidad	Afluente	Efluente	NOM-003-SEMARNAT-1997	Remoción promedio
pH		7.69 ± 0.25	8.57 ± 0.09	-	
Temperatura	(°C)	21.9 ± 2.07	21.5 ± 2.08	-	
$DBO_5$	(mg/L)	675.4 ± 48.27	161.4 ± 44.73	30	76%
DQO	(mg/L)	1219.0 ± 174.76	536.8 ± 58.58	-	56%
SST	(mg/L)	302 ± 22.4	37 ± 4.32	30	88%
Grasas y aceites	(mg/L)	32 ± 6.43	11.6 ± 2.01	15	64%
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	210 ± 54.21	64 ± 10.47	1,000	
Huevos de Helminfos	(h/L)	0	0	<1	
Nitrógeno	(mg/L)	79.3 ± 5.06	33.1 ± 4.05	-	58%
Fósforo	(mg/L)	3.0 ± 0.43	1.9 ± 0.34	-	34%

### 6.6.3 MEZCLA 50% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 50% AGUA RESIDUAL

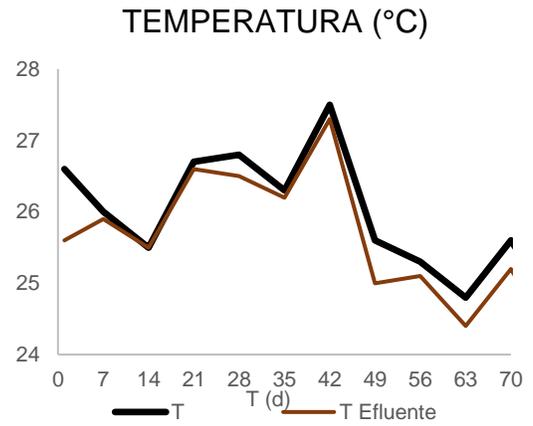
Después de 3 meses con la mezcla 30%LRS- 70% AR, se realizó el mismo procedimiento que con la primera mezcla, las primeras dos semanas se alimentó al

reactor con 10 L de la mezcla 50% Ar- 50% LRS, para posteriormente tener en el reactor una concentración 1:1.

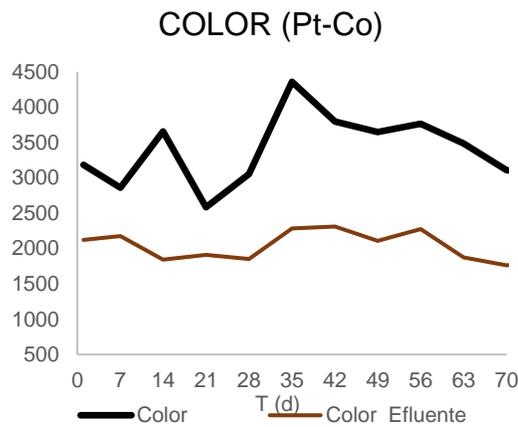
En la **Figura 15 (a)**, demuestra la estabilización del efluente en un pH ligeramente básico de  $8.68 \pm 0.12$ , el reactor se mantuvo en una temperatura ambiente de  $25.4 \pm 0.83 \text{ }^\circ\text{C}$ , **Figura 15 (b)**. La reducción de color promedio fue de 43%, llegando hasta 50%, es decir se mantuvo en un rango de  $2094.94 \pm 227.21 \text{ Pt-Co}$ , **Figura 15 (c)**. Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) se llegaron a remover hasta en un 57%, es decir, los SDT estuvieron en un promedio  $1232.58 \text{ mg/L} \pm 113.35$ , **Figura 15 (d)**.



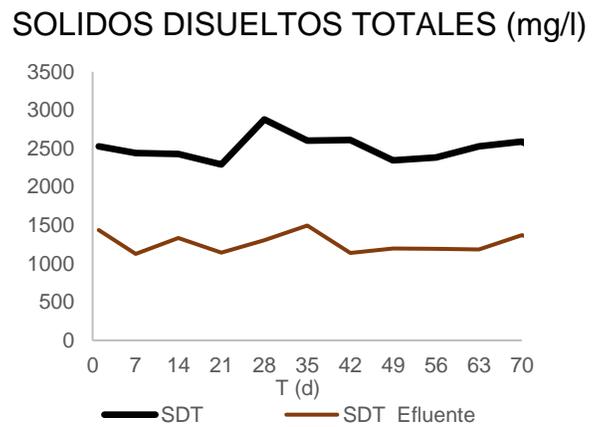
a)



b)



c)



d)

**Figura 15** Variación de a) pH, b) color verdadero, c) temperatura y d) SDT en la Mezcla 50LRS-50AR del afluente y efluente.

Con base a la NOM-003-SEMARNAT-1997, los parámetros de DBO<sub>5</sub> Y SST excedieron la norma, con ello se necesitaría una reducción mayor al 88.75% y 87.85% respectivamente.

**Cuadro 18** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de efluente del reactor de lecho fijo de la mezcla 50% lixiviado de relleno sanitario con 50% de agua residual.

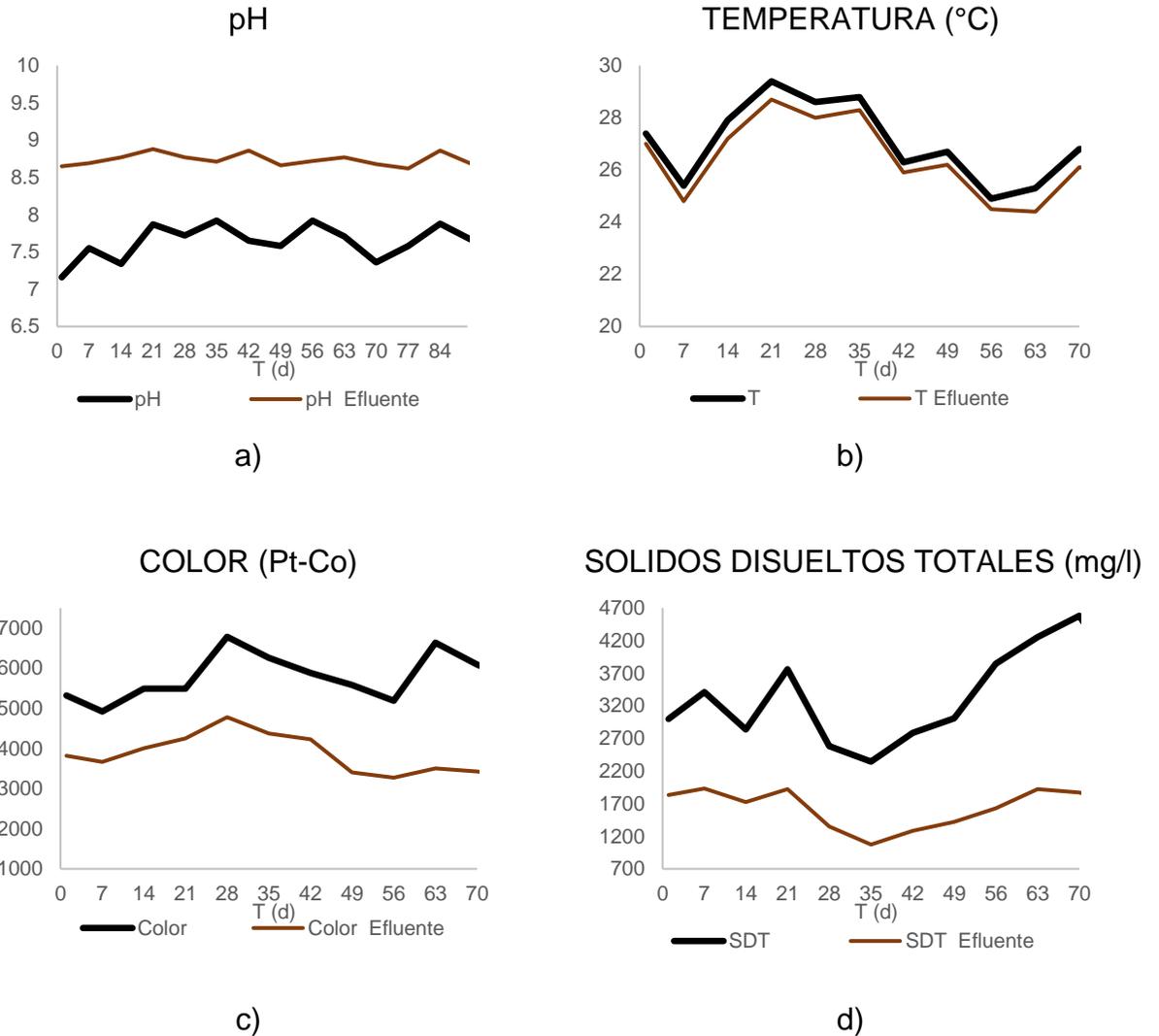
Mezcla 50LRS-50AR					
Parámetros	Unidad	Afluente	Efluente	NOM-003-SEMARNAT-1997	Remoción promedio
pH		7.45 ± 0.2	8.64 ± 0.18	-	
Temperatura	(°C)	25.89 ± 0.85	25.56 ± 0.92	-	
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	701.6 ± 71.02	266.9 ± 28.03	30	62%
DQO	(mg/L)	1593.9 ± 16.4	745.9 ± 33.22	-	53%
SST	(mg/L)	358 ± 22.3	247 ± 11.36	30	31%
Grasas y aceites	(mg/L)	41.2 ± 5.63	13.4 ± 2.34	15	67%
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	>1100	290 ± 77.32	1,000	
Huevos de Helmintos	(h/L)	0	0	<1	
Nitrógeno	(mg/L)	125.3 ± 10.71	82.0 ± 3.28	-	35%
Fósforo	(mg/L)	10.39 ± 1.0	7.55 ± 0.29	-	27%

#### 6.6.4 MEZCLA 70% LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO CON 30% AGUA RESIDUAL.

La alimentación de la mezcla 70% LRS- 30%AR se realizó después de 8 meses, al igual que las mezclas anteriores se tomó un tiempo de adaptación de dos semanas, ingresando 10 L diarios de la mezcla 70% LRS- 30%AR.

En la **Figura 16** (a), demuestra la estabilización del efluente en un pH ligeramente básico de  $8.75 \pm 0.08$ , el reactor se mantuvo en una temperatura ambiente de  $26.03 \pm 1.44$  °C, **Figura 16** (b). La reducción de color promedio fue de 48%, llegando hasta 48%, es decir se mantuvo en un rango de  $2094.94 \pm 227.21$  Pt-Co, **Figura 16** (c). Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) se llegaron a remover hasta en

un 59%, es decir, los SDT estuvieron en un promedio  $1600.17 \pm 294.46$  mg/L, **Figura 16 (d)**.



**Figura 16** Variación de a) pH, b) color verdadero, c) temperatura y d) SDT en la Mezcla 70LRS-30AR del afluente y efluente.

En esta última mezcla los parámetros de DBO, SST, grasas y aceites no cumplieron con la NOM-003-SEMARNAT-1997, necesitando una reducción mayor a 92.73%, 87.17% y 53.12 % respectivamente.

**Cuadro 19** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de efluente del reactor de lecho fijo de la mezcla 70% lixiviado de relleno sanitario con 30% de agua residual.

Mezcla 70LRS-30AR					
Parámetros	Unidad	Afluente	Efluente	NOM-003-SEMARNAT-1997	Remoción
pH		7.42 ±	8.36 ±	-	
Temperatura	(°C)	24.71 ±	23.94 ±	-	
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	924.5 ± 33.53	413.5 ± 31.54	30	55%
DQO	(mg/L)	2271.7 ± 65.95	1566.0 ± 51.29	-	31%
SST	(mg/L)	416 ± 34.23	234 ± 26.27	30	44%
Grasas y aceites	(mg/L)	48.2 ± 6.83	32 ± 2.99	15	34%
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	36 ± 13.65	<3	1,000	
Huevos de Helmintos	(h/L)	0	0	<1	
Nitrógeno	(mg/L)	155.8 ± 5.9	68.8 ± 3.2	-	56%
Fósforo	(mg/L)	15.2 ± 0.5	9.6 ± 0.23	-	37%

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las mezclas mostraron una variación que se atribuye a la estacional entre ellas.

Además, Liu et al. (2011) observaron que la relación N/F de 40 favorece la tasa de proliferación celular, la absorción de fósforo y nitrógeno es por ello por lo que la mezcla 30% AR – 70% LRS, es la que muestra mejores porcentajes de remoción.

## 6.7 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL HUMEDAL

### 6.7.1 Efluente del Humedal artificial de la mezcla 30% lixiviado de relleno sanitario en 70% agua residual.

El color de la mezcla 30% AR con 70% LRS mostró un cambio de color de rojizo oscuro a un marón después del RBLF y a un café a la salida del HAFH, **Figura 17**, en promedio se tuvo un valor de color verdadero del efluente de RBLF de 1428.22 mg/L y de 1221.66 mg/L a la salida del HAFSH, es decir, se tuvieron remociones promedio del 15%. Las remociones no son tan considerables, se supone fue afectado por el uso de tierra negra, la cual puso haber agregado unidades de color.



**Figura 17** Mezcla 30LRS-70AR, efluente de mezcla 30LRS-70AR y efluente de Humedal artificial 30LRS-70AR.

Para la mezcla 30% Lixiviado con 70% de agua residual, con ella se cumplió con la NOM-003-SEMARNAT-1997, **Cuadro 20**, en todos sus parámetros, que son DBO<sub>5</sub>, SST, Coliformes fecales, Huevos de Helmintos, Grasa y aceites. La dilución y el sistema biológico se aceptan con un sistema adecuado para esta mezcla.

**Cuadro 20** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de efluente del humedal artificial de la mezcla 30% lixiviado de relleno sanitario con 70% de agua residual

Mezcla 30LRS-70AR					
Parámetros	Unidad	Reactor	Humedal	NOM-003-SEMARNAT-1997	Remoción
pH		8.56 ± 0.07	7.57 ± 0.16	-	
Temperatura	(°C)	21.51 ± 2.08	26.58 ± 1.07	-	
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	161.4 ± 44.73	33.5 ± 2.91	30	79%
DQO	(mg/L)	536.8 ± 58.58	251.9 ± 7.16	-	53%
SST	(mg/L)	37 ± 4.32	17 ± 3.24	30	54%
Grasas y aceites	(mg/L)	11.6 ± 2.01	6 ± 1.12	15	48%
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	64 ± 10.47	7.2 ± 6.93	1,000	
Huevos de Helmintos	(h/L)	0	0	<1	
Nitrógeno	(mg/L)	33.1 ± 4.05	25.7 ± 2.63	-	22%
Fósforo	(mg/L)	1.9 ± 0.34	1.5 ± 0.09	-	25%

### 6.7.2 Efluente del Humedal artificial de la mezcla 50% lixiviado de relleno sanitario en 50% agua residual.

En esta mezcla el color se observa de un color café oscuro, para pasar a un café claro rojizo, terminando en un color amarillento. En la mezcla 50% Lixiviado con 50% agua residual si se observa una disminución de color, **Figura 18**, las mejores remociones fueron de hasta 58% de color verdadero.



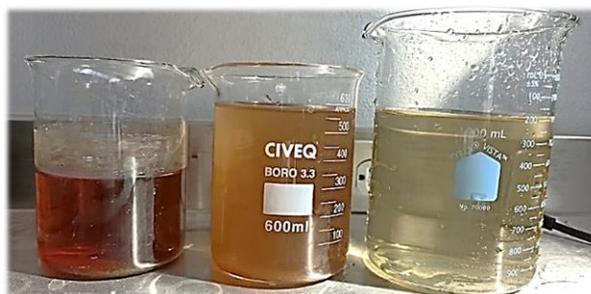
**Figura 18** Mezcla 50AR-50LRS, efluente de mezcla 50AR-50LRS y efluente de Humedal artificial 50AR-50LRS.

Los rangos de pH, no bajan de neutro, indicando con ello la estabilidad de los microorganismos en el humedal artificial.

**Cuadro 21** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de efluente del humedal artificial de la mezcla 50% lixiviado de relleno sanitario con 50% de agua residual.

Mezcla 50LRS-50AR					
Parámetros	Unidad	Reactor	Humedal	NOM-003-SEMARNAT-1997	Remoción
pH		8.68 ± 0.12	7.22 ± 0.22	-	
Temperatura	(°C)	25.40 ± 0.83	28.85 ± 2.07	-	
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	266.9 ± 28.03	40.4 ± 4.57	30	85%
DQO	(mg/L)	745.9 ± 33.22	293.8 ± 17.81	-	61%
SST	(mg/L)	247 ± 11.36	47 ± 5.92	30	81%
Grasas y aceites	(mg/L)	13.4 ± 2.34	9.2 ± 2.03	15	31%
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	290 ± 77.32	75 ± 43.75	1,000	
Huevos de Helmintos	(h/L)	0	0	<1	
Nitrógeno	(mg/L)	82.0 ± 3.28	43.6 ± 1.71	-	47%
Fósforo	(mg/L)	7.55 ± 0.29	3.02 ± 0.24	-	60%

### 6.7.3 Efluente del Humedal artificial de la mezcla 70% lixiviado de relleno sanitario en 30% agua residual.



**Figura 19** Mezcla 30AR-70LRS, efluente de mezcla 30AR-70LRS y efluente de Humedal artificial 30AR-70LRS.

En esta última mezcla la disminución de color alcanzo porcentaje de remoción de 47% y de Solidos disueltos totales de hasta 62%, el color es de los parámetros más visibles en el lixiviado y con este sistema se logró llegar a valores de 200 Pt-Co.

**Cuadro 22** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de efluente del humedal artificial de la mezcla 70% lixiviado de relleno sanitario con 30% de agua residual.

Mezcla 70LRS-30AR					
Parámetros	Unidad	Reactor	Humedal	NOM-003-SEMARNAT-1997	Remoción
pH		8.75 ± 0.08	7.52 ± 0.22	-	
Temperatura	(°C)	26.03 ± 1.44	28.21 ± 1.16	-	
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	413.5 ± 31.54	135.5 ± 16.13	30	67%
DQO	(mg/L)	1566.0 ± 51.29	825.5 ± 21.43	-	47%
SST	(mg/L)	234 ± 26.27	122 ± 15.43	30	48%
Grasas y aceites	(mg/L)	32 ± 2.99	18 ± 2.17	15	44%
Coliforme fecales	(NMP/100ml)	<3	<3	1,000	
Huevos de Helminetos	(h/L)	0	0	<1	
Nitrógeno	(mg/L)	68.8 ± 3.2	36.4 ± 3.93	-	47%
Fósforo	(mg/L)	9.6 ± 0.23	4.9 ± 0.3	-	49%

La vegetación compuestas por: *Dietes sp.* (lirio persa) en el módulo 1, *Tulbaghia violácea* (ajo silvestre) en el módulo 2, *Lavandula officinalis* (lavanda) en el módulo 3 y *Equisetum arvense* (cola de caballo) en el módulo 4, fueron seleccionada por el tipo y tamaño de su raíz la cual era delgada y de poca profundidad, su capacidad de soportar el flujo subsuperficial constante del humedal así como la exposición directa al ambiente. En la **Figura 20**, se observa la vegetación al inicio y al final de la investigación, notándose el crecimiento de las zonas aéreas de las plantas, de

estas las que mostraron una mejor resistencia a las condiciones climáticas y al afluente fueron: *Dietes sp.* (lirio persa) y *Tulbaghia violácea* (ajo silvestre) , por otro lado la *Lavandula officinalis* (lavanda) tuvo buenas remociones de nitrógeno y fósforo, sin embargo su resistencia a las condiciones ambientales no fue tan buena como las dos plantas anteriormente mencionadas, y *Equisetum arvense* (cola de caballo) fue la de menor resistencia a las condiciones ambientales y al afluente.



(a)



(b)

**Figura 20** Humedal Artificial Subsuperficial Horizontal, a) inicio del experimento y b) fin del experimento, 400 días de diferencia.

En la **Figura 21**, se observa el desarrollo de la zona radicular de *Dietes sp.* (lirio persa), la alimentación con las mezclas de lixiviado con agua residual no afecto su desarrollo, por lo que se ve factible su uso en futuras investigaciones, mejorando los sustratos utilizados, así como espacios con mayor profundidad para así mejorar la distribución de las raíces.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 21** Vegetación del módulo 1, a) *Dietes sp.* al inicio del experimento, b) raíces de *Dietes sp.*, c) *Dietes sp.* al final del experimento y d) raíz de *Dietes sp.* al final del experimento.

#### 6.7.4pH

Las variaciones de pH tienen influencia en las especies ionizadas y no ionizadas de los LRS, estas a su vez determinan las propiedades fisicoquímicas y la toxicidad de LRS (Cano et al., 2020). Es por ello por lo que es importante su monitoreo constante en cada etapa, el pH llega a ser un parámetro determinante para saber si el sistema está funcionando. En general el sistema tiene a dar un afluente ligeramente básico en un rango de 7.7-8.8.

#### **6.7.5 Grasa y aceites**

El sistema compuesto por el RBLF e el humedal artificial obtuvo remociones de hasta 81%, 78% y 63% con las mezclas 30%LRS-70%AR, 50%LRS-50%AR y 70%LRS-30%AR, respectivamente. Este parámetro es el que mejor cumple con la NOM-003-SEMARNAT-1997, la concentración de grasas y aceites en las mezclas evaluada no fue elevada, es por ello, que el sistema es funcional para la remoción de este parámetro.

#### **6.7.6 Sólidos Suspendidos Totales**

Con el tren de tratamiento se alcanzaron remociones de hasta 94%, 87% y 71% con las mezclas 30%LRS-70%AR, 50%LRS-50%AR y 70%LRS-30%AR, respectivamente, esto se debió a la disminución de Sólidos totales, para haber obtenido mejores resultados es recomendable que en el humedal artificial no agregar tierra negra.

#### **6.7.7 Demanda Biológica de Oxígeno**

La DBO<sub>5</sub>, es un parámetro fundamental de evaluación, con el tren de tratamiento se alcanzaron remociones de hasta 96%, 96% y 88% con las mezclas 30%LRS-70%AR, 50%LRS-50%AR y 70%LRS-30%AR, respectivamente. El sistema sirvió para remover la parte biodegradable de las mezclas, sin embargo, estas tienen una concentración de materia inorgánica mayor.

#### **6.7.8 Demanda Química de Oxígeno**

Con el tren de tratamiento se alcanzaron remociones de hasta 82%, 83% y 66% con las mezclas 30%LRS-70%AR, 50%LRS-50%AR y 70%LRS-30%AR, respectivamente. Saxena et al., 2021, obtuvieron mediante un biorreactor híbrido de lecho móvil una reducción en la DQO en un rango 77%-80% con una mezcla de 20% LRS- 80% AR y, durante 155 días. Tighiri & Erkurt, 2019, con un biotratamiento

de lixiviados por microalgas-bacterias en un modo de secuenciación por lotes utilizando un fotobiorreactor lograron eficiencias de remoción de la DQO entre 90.1% y 92.34%.

#### **6.7.9 Coliformes fecales**

La presencia de los coliformes fecales se tuvo mayormente en la mezcla 50% LRS-50%AR, esto se supone debido a la disponibilidad de materia orgánica y a la dilución de diversos microorganismos que podrías estar afectando la lectura de los coliformes fecales.

#### **6.7.10 Huevos de Helmintos**

En esta investigación no se encontró presencia de huevos de Helmintos, punto importante, en caso de haberlos encontrado sería alarmante por los problemas a la salud que causan.

#### **6.7.11 Nitrógeno**

Las remociones de NT fueron de 85%, 90%, 87% y 89% con *Dietes sp.* (lirio persa), *Tulbaghia violácea* (ajo silvestre), *Lavandula officinalis* (lavanda) y *Equisetum arvense* (cola de caballo), respectivamente. Tighiri & Erkurt, 2019, obtuvieron remociones entre 83.6% y el 99.4% de NT con un biotratamiento de lixiviados por microalgas-bacterias en un modo de secuenciación por lotes utilizando un fotobiorreactor.

La eliminación de nitrógeno es fundamental para el tratamiento los LRS y con esto evitar la eutrofización de cuerpos de agua que agota el oxígeno disuelto (DO) y causa la muerte de organismos acuáticos. El proceso de nitrificación comienza con la oxidación de amonio, proceso realizado por bacterias como la especie *Nitrosomonas*, que convierte el amoniaco en nitritos (NO<sub>2</sub>). Luego, otras especies

bacterianas, como la Nitrobacter, son responsables de la oxidación de los nitritos en nitratos (NO<sub>3</sub>). Estos dos grupos de bacterias quimiolitotróficas operan en secuencia. La desnitrificación es el segundo paso en la eliminación de nitrógeno en esta etapa se contempla la reducción de nitratos en gas de nitrógeno en gran parte inerte (N<sub>2</sub>). Este proceso es realizado por una gran variedad de especies bacterianas como Pseudomonas, Alcaligenes, Acinetobacter, Clostridium, etc. Utilizan el nitrato como un aceptor de electrones en el lugar del oxígeno durante la respiración o cuando el oxígeno está ausente modifican el sistema del citocromo y utilizan nitrato. (Duan et al., 2020; Tałataj et al., 2019)

En resumen, en el amoníaco (NH<sub>3</sub>-N) se oxida primero a nitrito (NO<sub>2</sub>-N), seguido de la oxidación de nitrito a nitrato (NO<sub>3</sub>-N) y la producción final de gas nitrógeno (N<sub>2</sub>) (Duan et al., 2020)

Si el pH es superior a 6,5, el proceso de nitrificación parcial puede ser inhibido, mientras que el pH de mayor 8,5 puede afectar el proceso de nitrificación parcial y aumentar el consumo de alcalinidad. (Duan et al., 2020)

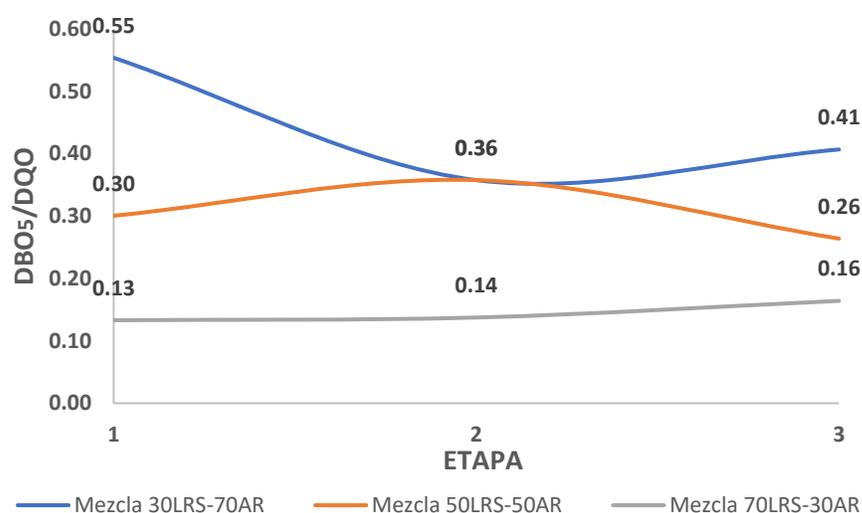
En particular, el lixiviado con una alta concentración de nitrógeno amoniacal llega provocar inhibición microbiana (Rocha Lebron et al., 2021).

#### **6.7.12 Fosforo**

Las remociones de PT fueron de 67%, 60%, 50% y 55% con *Dietes sp.* (lirio persa), *Tulbaghia violácea* (ajo silvestre), *Lavandula officinalis* (lavanda) y *Equisetum arvense* (cola de caballo), respectivamente, esta se ve beneficiada por la sedimentación, adsorción, almacenamiento de sedimento y procesos biológicos que tienen lugar en el Humedal. Las remociones de PT se ven probablemente beneficiadas por el crecimiento de la planta (Yalcuk & Ugurlu, 2009).

## 6.8 ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD (IB) DE LOS LIXIVIADOS POR ETAPA

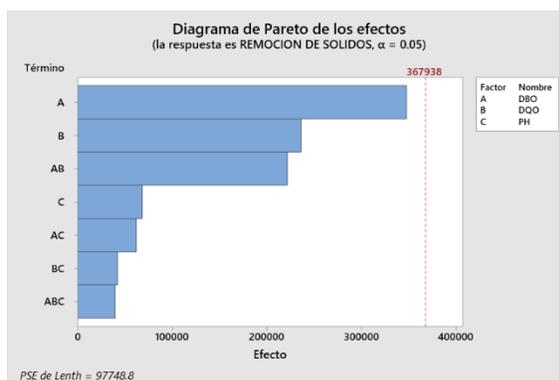
El índice de biodegradabilidad nos indica en términos generales que tanta materia orgánica contiene el agua a tratar, entre más cercano a cero sea el valor, indica que el líquido a tratar cuenta con más materia no biodegradable, complicando con ello la degradación de contaminantes. En la **Figura 22**, se observa una disminución de este índice en las 3 mezclas, esto indica que el sistema biológico sirvió para remover la mayor parte de materia degradable en las mezclas, sin embargo, las la parte no degradable no tuvo un impacto importante.



**Figura 22** índice de biodegradabilidad de las mezclas etapa 1, de los efluentes del reactor de cada mezcla, etapa 2, y de los efluentes de los humedales, etapa 3.

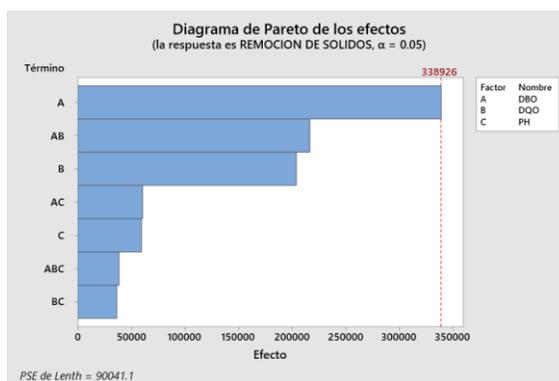
## 6.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En la mezcla 30-70 se observa en el diagrama de Pareto, **Figura 23**, que la variable significativa es el parámetro de  $DBO_5$ . Ya que con respecto a las SST se observa una disminución de 94%, con lo cual cumple la NOM-003-SEMARNAT-1997. Esto es posible, ya que recibe una menor cantidad de lixiviado con respecto al agua residual, con ello se acepta este sistema para la mezcla de 30% LRS con 70% AR, también cabe destacar que el agua residual hace el efecto de dilución sobre el agua de lixiviado.



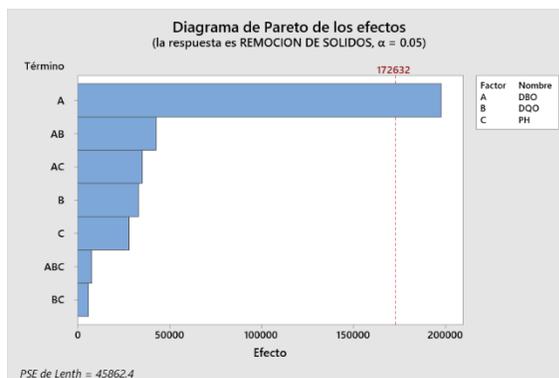
**Figura 23** Diagrama de Pareto de la Mezcla 30% LRS-70% AR.

En la mezcla 50 LRS -50 AR se observa en el diagrama de Pareto, **Figura 24**, que la variable significativa también es el parámetro de DBO<sub>5</sub>. Ya que con respecto a la variable de SST hay una disminución del 87%, comparando esto con la NOM-003-SEMARNAT-1997 El sistema no cumple, sin embargo, con mejoras de filtrado podría llegar a cumplir, sin embargo, con otros parámetros como DQO, Color verdadero, entre otros el sistema ya no es factible



**Figura 24** Diagrama de Pareto de la Mezcla 50% LRS-50% AR.

En la mezcla 70 LRS- 30 AR, se observa en el diagrama de Pareto, **Figura 25**, que la variable significativa es el parámetro DBO<sub>5</sub>. Hay una disminución de SST del 71%, sin embargo no es suficiente para cumplir la NOM-003-SEMARNAt-1997, esto se debe a la elevada concentración de DQO, es decir, una concentración elevada de materia inorgánica no biodegradable.



**Figura 25** Diagrama de Pareto de la Mezcla 70% LRS-30% AR.

## 7 CONCLUSIONES

Independientemente de la edad del vertedero, el lixiviado contiene una gran cantidad y variedad de contaminantes que son tóxicos y provocan alteraciones negativas ecología. La relación  $DBO_5/DQO$  en los rellenos sanitarios disminuye con el tiempo porque la porción no biodegradable de DQO permanecerá sin cambios en este proceso.

El sistema biológico no es recomendable para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario viejos, esto por lo mencionado anteriormente, la parte biodegradable para este punto ya habrá sido removida, quedando mayormente la materia orgánica y no orgánica no biodegradable, sin embargo, el presente trabajo da información de las remociones que se pueden tener el sistema compuesto biológico y en casos como el relleno sanitario con el que se trabajó sería una opción para disminuir el impacto que se tiene en los alrededores, ya que en este tipo de casos no hay ningún tipo de control ambiental por lo tanto tampoco hay una inversión para sistemas más eficientes como los fisicoquímicos.

De los resultados obtenidos, las mejores remociones se obtuvieron con la mezcla 30% lixiviado de relleno sanitario y 70% agua residual, favorecido por la carga orgánica biodegradable que tiene el agua residual con una degradación de hasta 96% de  $DBO_5$ , 82% de DQO, 73% de NT y 57% de PT.

La vegetación en el HAFH, las dos plantas con mejores remociones de color fueron: *Dietes sp.* (lirio persa) y *Tulbaghia violácea* (ajo silvestre), con un porcentaje de 53% ambas. Esto indica que hubo una remoción de materia orgánica y de sólidos totales.

## 8 REFERENCIAS

- Al-Amshawee, S., Yunus, M. Y. B. M., Yunus, R. B. M., & Lynam, J. G. (2020). Zero waste system comprised of fixed bed biofilm reactor, ozone oxidation, and electro dialysis desalination for wastewater sustainability. *Journal of Water Process Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101593>
- Alarjani, K. M., Almutairi, A. M., Flanet Raj, S. R., Rajaselvam, J., Chang, S. W., & Ravindran, B. (2021). Biofilm producing indigenous bacteria isolated from municipal sludge and their nutrient removal ability in moving bed biofilm reactor from the wastewater. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(9), 4994–5001. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.084>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. In *Ecological Engineering* (Vol. 146). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>
- Bandala, E. R., Liu, A., Wijesiri, B., Zeidman, A. B., & Goonetilleke, A. (2021). Emerging materials and technologies for landfill leachate treatment: A critical review. *Environmental Pollution*, 291(September), 118133. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118133>
- Begum, S., Anupoju, G. R., Sridhar, S., Bhargava, S. K., Jegatheesan, V., & Eshtiaghi, N. (2018). Evaluation of single and two stage anaerobic digestion of

landfill leachate: Effect of pH and initial organic loading rate on volatile fatty acid (VFA) and biogas production. *Bioresource Technology*, 251, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.069>

Breitenmoser, L., Cuadrado Quesada, G., N, A., Bassi, N., Dkhar, N. B., Phukan, M., Kumar, S., Naga Babu, A., Kierstein, A., Campling, P., & Hooijmans, C. M. (2022). Perceived drivers and barriers in the governance of wastewater treatment and reuse in India: Insights from a two-round Delphi study. *Resources, Conservation and Recycling*, 182(October 2021), 106285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106285>

Cano, V., Vich, D. V., Andrade, H. H. B., Salinas, D. T. P., & Nolasco, M. A. (2020). Nitrification in multistage horizontal flow treatment wetlands for landfill leachate treatment. *Science of the Total Environment*, 704, 135376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135376>

Cárdenas-Ferrer, M. T., Santos-Herrero, R. F., Contreras-Moya, A. M., Rosa-Domínguez, E., & Correa -Cortés, Y. (2020). *Diseño de una planta para el tratamiento del lixiviado en Vertedero de Sagua La Grande Design of a plant for the treatment of leachate in Sagua la Grande Landfill*. 20(2). <https://orcid.org/0000-0002-0361-2526>

Chen, W., Zhuo, X., He, C., Shi, Q., & Li, Q. (2020). Molecular investigation into the transformation of dissolved organic matter in mature landfill leachate during treatment in a combined membrane bioreactor-reverse osmosis process. *Journal of Hazardous Materials*, 397. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122759>

CONAGUA. (2022). *Lineamientos técnicos: Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales a nivel vivienda en zona rural*. 1–40. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152777/LINEAMIENTOS\\_TRATAMIENTO\\_AGUAS\\_NIVEL\\_VIVIENDA.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152777/LINEAMIENTOS_TRATAMIENTO_AGUAS_NIVEL_VIVIENDA.pdf)

- Dinh, N. T., Nguyen, T. H., Mungray, A. K., Duong, L. D., Phuong, N. T., Nguyen, D. D., Chung, W. J., Chang, S. W., & Tuan, P. D. (2021). Biological treatment of saline domestic wastewater by using a down-flow hanging sponge reactor. *Chemosphere*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131101>
- Duan, Y., Liu, Y., Zhang, M., Li, Y., Zhu, W., Hao, M., & Ma, S. (2020). Start-up and operational performance of the partial nitrification process in a sequencing batch reactor (SBR) coupled with a micro-aeration system. *Bioresource Technology*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122311>
- Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., Lokuge, W., Aravinthan, T., & Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 173). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>
- Gaballah, M. S., Abdelwahab, O., Barakat, K. M., & Stefanakis, A. I. (2022). A pilot system integrating a settling technique and a horizontal subsurface flow constructed wetland for the treatment of polluted lake water. *Chemosphere*, 295, 133844. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.133844>
- Grosser, A., Neczaj, E., Madela, M., & Celary, P. (2019). Ultrasound-assisted treatment of landfill leachate in a sequencing batch reactor. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030516>
- Gu, Z., Chen, W., Wang, F., & Li, Q. (2020). A pilot-scale comparative study of bioreactor landfills for leachate decontamination and municipal solid waste stabilization. *Waste Management*, 103, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.023>
- Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Lawal, I. M., Abubakar, S., Hassan, I., Zubairu, I., Umaru, I., Abdurrasheed, A. S., Adam, A. A., Ghaleb, A. A. S., Almahbashi, N. M. Y., Al-dhawi, S., & Noor, A. (2021). Sequencing batch reactor technology for

- landfill leachate treatment : A state-of-the-art review. *Journal of Environmental Management*, 282(September 2020), 111946. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111946>
- Leonel, L. P., & Tonetti, A. L. (2021). Wastewater reuse for crop irrigation: Crop yield, soil and human health implications based on giardiasis epidemiology. In *Science of the Total Environment* (Vol. 775). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145833>
- Li, M., Su, J., Li, Y., Ali, A., Yang, S., & Zhang, S. (2021). Suspended membrane bioreactor with extracellular polymeric substances as reserve carbon source for low carbon to nitrogen ratio wastewater: Performance and microbial community composition. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(9), 1870–1879. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0841-1>
- Lou, Z., Song, Y., Shao, B., Hu, J., Wang, J., & Yu, J. (2021). Pre-electrochemical treatment combined with fixed bed biofilm reactor for pyridine wastewater treatment: From performance to microbial community analysis. *Bioresource Technology*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124110>
- Mandal, P., Dubey, B. K., & Gupta, A. K. (2017). Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: Drawbacks, challenges and future scope. *Waste Management*, 69, 250–273. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.034>
- Medina Valderrama, C. J., Montero del Águila, E. M., & Cruz Pio, L. E. (2016). Optimización del proceso de Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 82(4), 454–466. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2016000400007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2016000400007&script=sci_arttext)
- Mirghorayshi, M., Zinatizadeh, A. A., & van Loosdrecht, M. (2021). Simultaneous biodegradability enhancement and high-efficient nitrogen removal in an innovative single stage anaerobic/anoxic/aerobic hybrid airlift bioreactor

- (HALBR) for composting leachate treatment: Process modeling and optimization. *Chemical Engineering Journal*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127019>
- Moraes Costa, A., Greice de Souza Marotta Alfaia, R., & Carbonelli Campos, J. (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, 232(November 2018), 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.006>
- Natasha, Shahid, M., Khalid, S., Niazi, N. K., Murtaza, B., Ahmad, N., Farooq, A., Zakir, A., Imran, M., & Abbas, G. (2021). Health risks of arsenic buildup in soil and food crops after wastewater irrigation. *Science of the Total Environment*, 772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145266>
- Naveen, B. P., Mahapatra, D. M., Sitharam, T. G., Sivapullaiah, P. V., & Ramachandra, T. V. (2017). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. In *Environmental Pollution* (Vol. 220, pp. 1–12). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.002>
- NOM-003-SEMARNAT-1997. (1997). *NOM-003-SEMARNAT-1997 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.*
- Okhravi, S., Eslamian, S., & Fathianpour, N. (2018). Assessing the effects of flow distribution on the internal hydraulic behavior of a constructed horizontal subsurface flow wetland using a numerical model and a tracer study. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18, 264–273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.07.002>
- Onu, M. A., Ayeleru, O. O., Oboirien, B., & Olubambi, P. A. (2023). Challenges of wastewater generation and management in sub-Saharan Africa: A Review. *Environmental Challenges*, 100686. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100686>

- Pourbavarsad, M. S., Jalalieh, B. J., Harkins, C., Sevanthi, R., & Jackson, W. A. (2021). Nitrogen oxidation and carbon removal from high strength nitrogen habitation wastewater with nitrification in membrane aerated biological reactors. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106271>
- Quadri, M. Wasif., & Dohare, Devendra. (2021). Site selection and designing of landfill using Nexus approach. *Energy Nexus*, 3, 100019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100019>
- Ren, T., Perdana, M. C., Kříženecká, S., Sochacki, A., & Vymazal, J. (2023). Constructed wetlands for the treatment of household organic micropollutants with contrasting degradation behaviour: Partially-saturated systems as a performance all-rounder. *Chemosphere*, 314, 137645. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137645>
- Rocha Lebron, Y. A., Rezende Moreira, V., Luiza Brasil, Y., Rezende Silva, A. F., de Souza Santos, L. V., Celina Lange, L., & Santos Amaral, M. C. (2021). A survey on experiences in leachate treatment: Common practices, differences worldwide and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 288(April). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112475>
- Saadoun, L., Campitelli, A., Kannengiesser, J., Stanojkovski, D., El Alaoui El Fels, A., Mandi, L., & Ouazzani, N. (2022). Acidogenic digestion of organic municipal solid waste in a pilot scale reactor: Effect of waste ratio and leachate recirculation and dilution on hydrolysis and medium chain fatty acid production. *Bioresource Technology Reports*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100872>
- Saxena, V., Padhi, S. K., & Jhunjhunwala, U. (2021). Treatment of domestic sewage and leachate using a moving bed hybrid bioreactor. *Environmental Technology and Innovation*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101998>

- SEMARNAT. (2004). NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. In *Diario Oficial de la Federación* (Vol. 6). [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004)
- Sharma, J., Kumar, V., Kumar, S. S., Malyan, S. K., Mathimani, T., Bishnoi, N. R., & Pugazhendhi, A. (2020). Microalgal consortia for municipal wastewater treatment – Lipid augmentation and fatty acid profiling for biodiesel production. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111638>
- Sohail, N. F., Zeshan, Iftikhar, R., & Saleem, S. (2023). Microalgal treatment of high-nutrient wastewater using twin layer cultivation system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109248. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.109248>
- Tałała, I. A., Biedka, P., & Bartkowska, I. (2019). Treatment of landfill leachates with biological pretreatments and reverse osmosis. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 17, Issue 3, pp. 1177–1193). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00860-6>
- Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research*, 203(March), 117525. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>
- Tighiri, H. O., & Erkurt, E. A. (2019). Biotreatment of landfill leachate by microalgae-bacteria consortium in sequencing batch mode and product utilization. *Bioresource Technology*, 286, 121396. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121396>
- Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318>

- Wdowczyk, A., Szymańska-Pulikowska, A., & Gałka, B. (2022). Removal of selected pollutants from landfill leachate in constructed wetlands with different filling. *Bioresource Technology*, 353. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127136>
- Yalcuk, A., & Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology*, 100(9), 2521–2526. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.029>
- Yang, X., He, Q., Liu, T., Zheng, F., Mei, H., Chen, M., Liu, G., Vymazal, J., & Chen, Y. (2022). Impact of microplastics on the treatment performance of constructed wetlands: Based on substrate characteristics and microbial activities. *Water Research*, 217, 118430. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.118430>
- Ye, W., Liu, H., Jiang, M., Lin, J., Ye, K., Fang, S., Xu, Y., Zhao, S., Van der Bruggen, B., & He, Z. (2019). Sustainable management of landfill leachate concentrate through recovering humic substance as liquid fertilizer by loose nanofiltration. *Water Research*, 157, 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.060>
- Zhang, Y., Xi, B., & Tan, W. (2021). Release, transformation, and risk factors of polybrominated diphenyl ethers from landfills to the surrounding environments: A review. *Environment International*, 157, 106780. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106780>
- Zúñiga Hernández, E. M., Ramos López, M. Á., Zavala Gómez, C. E., Campos Guillén, J., Ledesma García, J., Arriaga Hurtado, L. G., Amaro Reyes, A., Sandoval Cárdenas, D. I., & Rodríguez Morales, J. A. (2023). Caracterización de comunidades bacterianas establecidas en un reactor biológico fijo para el tratamiento de efluentes domésticos. *Nova Scientia*, 15(31), 1–23. <https://doi.org/10.21640/ns.v15i31.3095>