



**MEDIO AMBIENTE**

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**IMTA**

INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

# **CC2304.1 Evaluación de procesos no convencionales para el tratamiento de lixiviados provenientes de un relleno sanitario**

## **Informe final**

COORDINACIÓN DE CALIDAD Y ECOLOGÍA DEL AGUA  
SUBCOORDINACIÓN DE SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y  
REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

JEFE DE PROYECTO

Liliana García Sánchez

PARTICIPANTES

Edson Baltazar Estrada Arriaga

Axel Falcón Rojas

Alberto González Sánchez

Carlos David Silva Luna

Areli Gómez Rojas

Karla Ivonne Espinoza Guerrero

COLABORADORES

Ulises Duvan Rodríguez Díaz

Netzer Sinue Castillo Ocampo

Eva Montserrat Arizmendi Jaimes

2023



## INDICE

1. Antecedentes	3
2. Justificación	4
3. Objetivo	4
4. Metodología	5
4.1 Base de datos	5
4.2 Caracterización de lixiviados	6
4.3 Pretratamientos fisicoquímicos	8
4.4 Tratamiento biológico	10
4.5 Sistema de pulimento	11
4.6 Tratamiento de residuo envejecido	13
5. Resultados	15
5.1 Base de datos	15
5.2 Caracterización de lixiviados	19
5.3 Pretratamientos fisicoquímicos	21
5.4 Tratamiento biológico	23
5.5 Sistema de pulimento	25
5.6 Tratamiento de residuo envejecido	29
6. Conclusiones	31
7. Bibliografía	32



## **1. Antecedentes**

México enfrenta el reto de atender una serie de problemas ambientales relacionados con los objetivos acordados en el seno de las Naciones Unidas en el que se comprometió a avanzar hacia un desarrollo sostenible con un horizonte al año 2030. Estos problemas podrían constituir serios obstáculos para alcanzar la sustentabilidad en el futuro, entre ellos, el cambio climático, la pérdida de los ecosistemas terrestres y acuáticos y de su biodiversidad, la escasez y contaminación de los recursos hídricos y los problemas de calidad del aire (Semarnat, 2015).

Existe una crisis ambiental en términos de cantidad y calidad del agua, a causa de la generación y disposición de residuos, el incremento de la población, la industrialización, los altos niveles de vida, el calentamiento global, el desarrollo y el comportamiento antrópico. En cuanto a la disposición de residuos sólidos a menudo se presentan problemas como resultado de la degradación de la materia orgánica y de la presencia de otros compuestos presentes en los residuos que son depositados en los rellenos sanitarios. Dichos problemas son originados por la generación de gases y líquidos, los primeros son formados a partir de la descomposición de los ácidos orgánicos (biogás) y los segundos, conocidos como lixiviados, presentan altas concentraciones de ácidos orgánicos y materia disuelta. Además, los lixiviados poseen elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) dando lugar a una alta conductividad y un alto contenido de metales pesados como el cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn) cuyas concentraciones pueden sobrepasar los límites de toxicidad (Lapeyre et al. 2019). Los lixiviados pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositaron, dando lugar a la contaminación del suelo y a cuerpos de agua receptores, provocando su deterioro y representando un riesgo potencial a los organismos vivos y a la salud humana.



## **2. Justificación**

El crecimiento de la población ha provocado un aumento desmedido en la generación de desperdicios, basura o residuos, convirtiéndose en un fuerte problema a nivel regional y mundial. Estos desperdicios son trasladados y depositados en sitios de disposición final, en los cuales existe una combinación de residuos, lo que genera una mezcla entre componentes orgánicos e inorgánicos que por la reacción, arrastre o filtrado genera un líquido contaminante denominado lixiviado. En la actualidad existen 2,203 sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial en México, de los cuales el 86% no cuenta con un sistema o plan de tratamiento de los lixiviados generados (INEGI, 2019). Incluso los sitios de disposición final de residuos diseñados y construidos conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial no están exentos de presentar riesgo de infiltración de lixiviados al subsuelo. De esta forma, a través de los escurrimientos superficiales y subterráneos, el lixiviado producto del sitio de disposición final podría llegar a aguas subterráneas o superficiales, dañando el ecosistema acuático y generando un desequilibrio ecológico.

Para el tratamiento de los lixiviados se utilizan sistemas tanto fisicoquímicos como biológicos, sin embargo, los procesos son evaluados de forma aislada sin presentar un tratamiento general para la remoción de la mayor parte de los contaminantes presentes, entre los que se encuentran contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbianos. Por otro lado, a escala real generalmente se utiliza la recirculación y tratamiento combinado de lixiviados con aguas residuales domésticas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), lo cual no permite eliminar de forma adecuada los contaminantes presentes en los lixiviados, solo los concentra o los diluye.

Es por ello que el propósito del presente estudio es evaluar sistemas de tratamiento tanto fisicoquímicos como biológicos que permitan formar un tren de tratamiento para remover los contaminantes presentes en lixiviados.

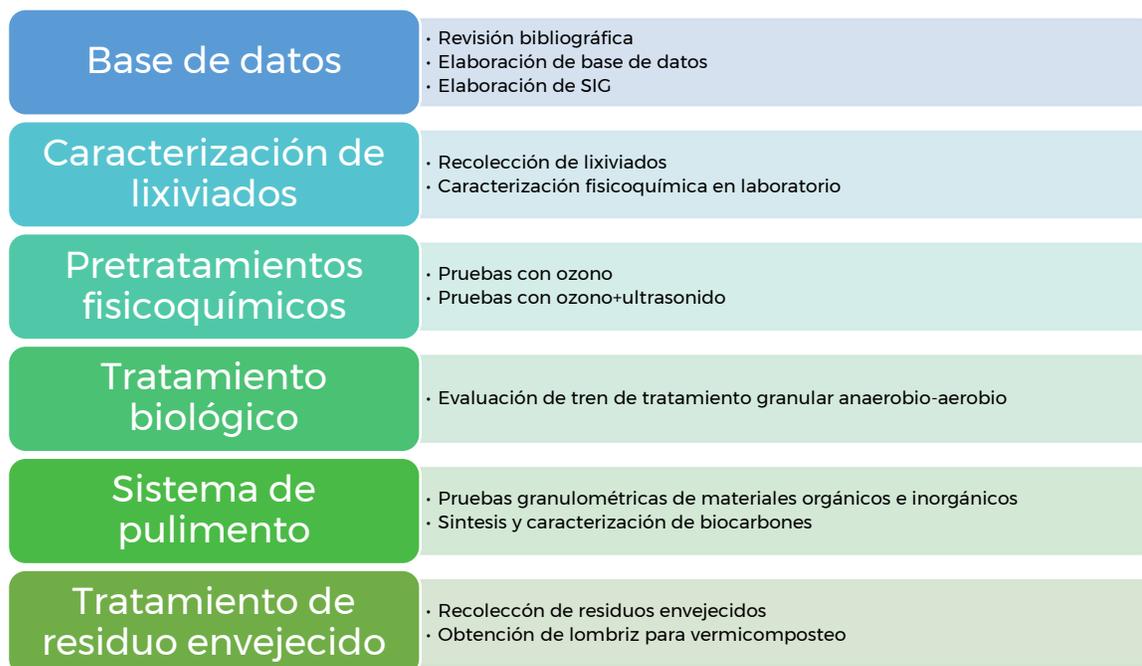
## **3. Objetivo**

Remover materia orgánica, nutrientes, metales pesados y toxicidad presentes en lixiviados mediante un tren de tratamiento no convencional.



## 4. Metodología

La metodología se llevó a cabo en seis etapas experimentales, tal como se muestra en la Figura 1.



*Figura 1 Planteamiento metodológico*

A continuación se desglosa cada etapa.

### 4.1. Base de datos

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica en revistas, tesis y libros sobre las características de los lixiviados provenientes de rellenos sanitarios, tiraderos de basura y basureros municipales en México. La revisión consistió en los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros de lixiviados en revisión bibliográfica

Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades
pH	Unidades	DQO	mg/L	Arsénico	mg/L	Grasas y aceites	mg/L
Conductividad	mS/cm	DQO soluble	mg/L	Cadmio	mg/L	Carbono total	mg/L
SDT	ppm	Fracción biodegradable	-	Cobre	mg/L	Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L
Nitrógeno amoniacal	mg N-NH <sub>3</sub> /L	NT	mg/L	Cromo	mg/L	Dureza de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L
N orgánico	mg/L	Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	Hierro	mg/L	Cloruros (Cl)	mg/L
NTK	mg/L	PT	mg/L	Manganeso	mg/L	Cobalto	mg/L
P total	mg/L	SST	mg/L	Mercurio	mg/L	Ortofosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L
Sulfatos	mg/L	SSV	mg/L	Níquel	mg/L	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L
Nitratos	mg/L	ST	mg/L	Plomo	mg/L	Sulfuros (S <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L
Nitritos	mg/L	STV	mg/L	Zinc	mg/L	Turbiedad	NTU
Ortofosfatos	mg/L	STF	mg/L	COT	mg/L	Dureza total	mg/L
DBO <sub>5</sub>	mg/L	Toxicidad	UT	SAAM	mg/L	Alcalinidad	mg/L

Por otro lado, se revisó la base de datos de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos de INEGI y se depuró para no duplicar sitios. Con la información del INEGI y la información recopilada en la revisión bibliográfica se elaboró un Sistema de Información Geográfica que contiene los sitios de disposición y sus características.

## 4.2. Caracterización de lixiviados

Se recolectaron lixiviados provenientes de los rellenos sanitarios La Cañada, Bordo Poniente, Regional Yecapixtla y Rancho Coronel, ubicados en Ixtapaluca (Estado de México), Texcoco (Estado de México), Yecapixtla (Morelos) y Tlaltizapán (Morelos), respectivamente (Figura 2).



a)



b)



c)



*Figura 2 Recolección de lixiviados en a) La Cañada, b) Bordo Poniente, c) Rancho Coronel*

Para la caracterización de los lixiviados se determinaron los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, nitratos, sólidos, nitrógeno amoniacal, entre otros, aplicando las técnicas analíticas establecidas por el Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2017), como se muestra en la Tabla 2.

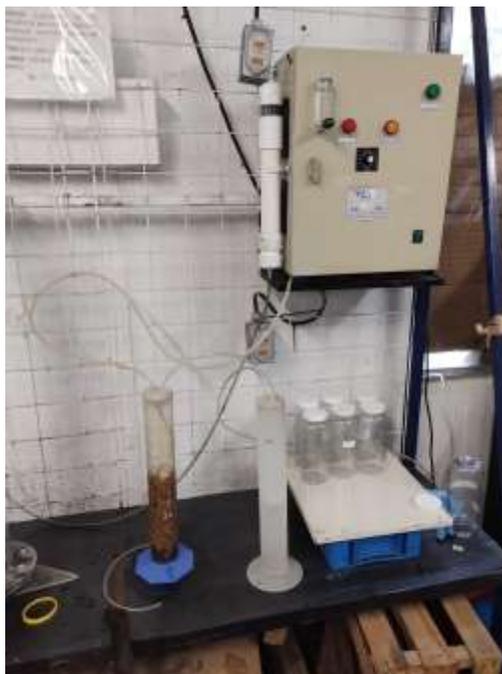
*Tabla 2 Parámetros para la caracterización fisicoquímica de lixiviados*

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica</b>
DQO	APHA, 2017
DBO <sub>5</sub>	Potenciométrico
pH	APHA, 2017
Alcalinidad	APHA, 2017
Nitrógeno amoniacal	APHA, 2017
Nitratos	APHA, 2017
Nitritos	APHA, 2017
ST	APHA, 2017
STV	APHA, 2017
STF	APHA, 2017
SST	APHA, 2017
SSV	APHA, 2017
SSF	APHA, 2017
Color aparente	Potenciométrico
Color verdadero	Potenciométrico

### **4.3. Pretratamientos fisicoquímicos**

Se evaluaron dos pretratamientos fisicoquímicos: ozono y ozono+ultrasonido con lixiviado proveniente de los rellenos sanitarios Bordo Poniente y La Cañada. Antes de iniciar los experimentos se ajustó el pH del lixiviado con óxido de calcio (o hidróxido de sodio) o ácido nítrico (o ácido sulfúrico) al 10%, según sea el caso para llevar el lixiviado a pH de 3, 7 y 11; condiciones a las que se realizaría la experimentación.

Para los experimentos con ozono se utilizó un ozonador marca Ozone Ecological Equipments con difusor en forma de barra para suministrar ozono a una tasa de 2 L/min en un reactor (probeta) de 1 L llenado al 50%. El reactor contenía en su interior empaque plásticos con la finalidad de mejorar la difusión del ozono (Figura 3). Para eliminar el ozono residual se conectó al reactor una probeta con yoduro de potasio. Se evaluaron los diferentes niveles de pH.



*Figura 3 Montaje experimental de pruebas con ozono*

Para los experimentos con ozono+US (ultrasonido) se utilizó un homogeneizador ultrasónico marca Hanchen modelo FS-1200 a 20 kHz, al 40% de potencia con un tiempo de sonicación de 10 min (50 s de sonicación y 10 s de descanso). Se colocaron 500 mL de lixiviado en un vaso de precipitado de 2 L al interior del ultrasonido. El ozono fue suministrado al vaso por medio de una manguera conectada al ozonador (marca Ozone Ecological Equipments) y a través de un difusor de piedra porosa. El vaso se introdujo en un baño de hielo dentro del ultrasonido para controlar la temperatura del lixiviado (Figura 4).

Para la caracterización del lixiviado en el efluente de ambos experimentos se determinó DQO, color aparente y fracción biodegradable ( $DBO_5$ ) de acuerdo con los métodos APHA (2017).

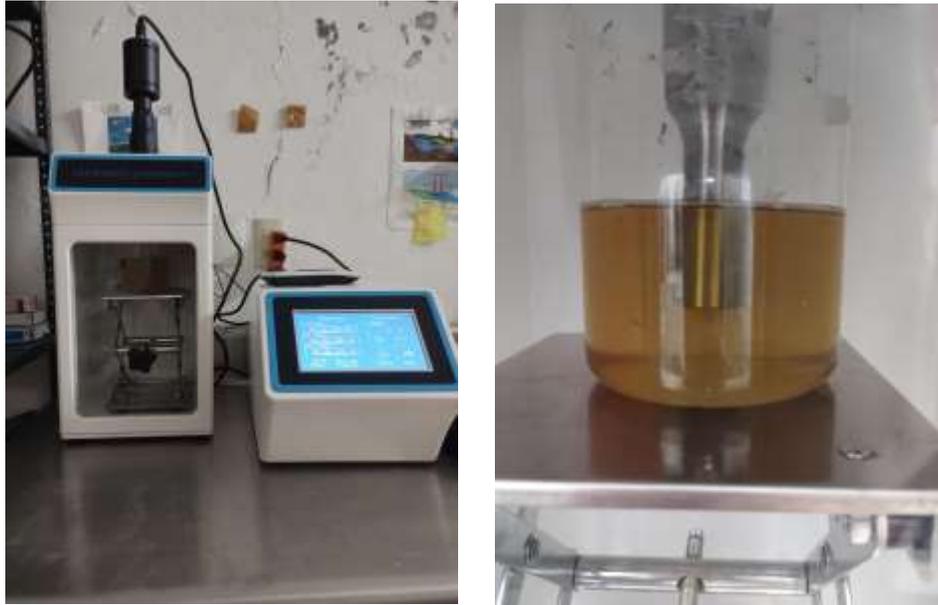


Figura 4 Montaje experimental de pruebas con ozono+US

#### 4.4. Tratamiento biológico

Se continuo operando un sistema de tratamiento granular a escala laboratorio conformados por un reactor anaerobio granular tipo UASB (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, por sus siglas en inglés) y un reactor aerobio granular tipo SBR (Reactor de Secuencia en Batch, por sus siglas en inglés) para el tratamiento de lixiviados provenientes del Relleno Sanitario la Perseverancia. Los reactores consistieron en cilíndricos de acrílico de 9.5 cm de diámetro y 45 cm de altura, con un volumen total de 3.19 L y un volumen útil de 2.52 L (Figura 5).

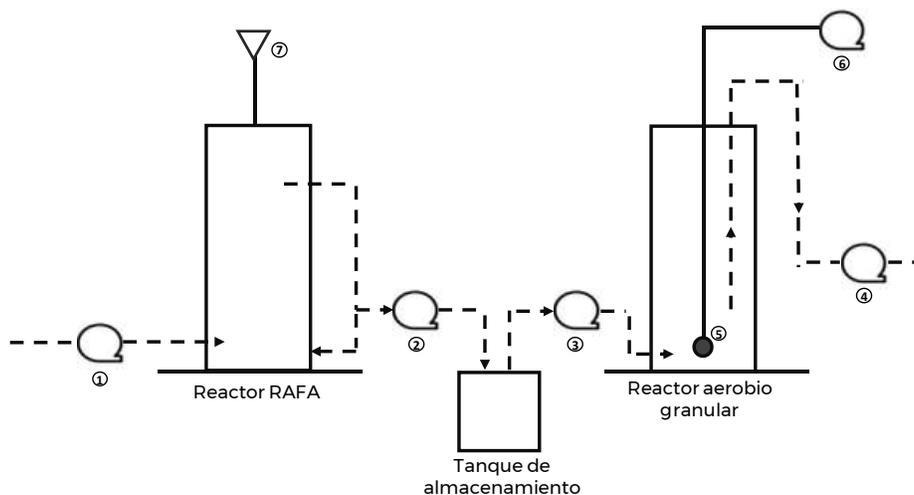


Figura 5 Esquema del tren de tratamiento biológico granular (1= influente; 2=efluente del reactor RAFA; 2= Influyente del reactor aerobio; 4= Efluente; 5= Difusor de aire; 6= Compresor de aire; 7= Salida de biogás).

El reactor UASB operó a 35°C, un TRH de 1 d y una velocidad ascensional de 1 m/h a través de la recirculación del efluente. El reactor SBR operó con ciclos de 4 h a temperatura ambiente. En la Tabla 3 se muestran las características de los experimentos realizados.

*Tabla 3 Experimentos en el sistema granular UASB-SBR*

Experimento	Carga orgánica volumétrica (kg DQO/m <sup>3</sup> d)	TRH (d)	Dilución lixiviado (%)
1	1	1	5
2	2.5	1	12.5
3	1	2	5
4	2.5	2	12.5

Durante la evaluación del tren de tratamiento se monitoreo la materia orgánica medida como DQO (APHA, 2017) y la toxicidad (OECD, 1998).

#### 4.5. Sistema de pulimento

Se realizó un análisis granulométrico para determinar el diámetro, área superficial y número de partículas de los siguientes materiales filtrantes que serán utilizados como material de empaque en biofiltros para el tratamiento de lixiviados pretratados: tezontle, composta/tezontle (50:50%, v:v) y turba/tezontle (50:50%, v:v). Para ello se realizó una técnica de análisis granulométrico estándar para suelos (McCabe et al. 2002). Se utilizó un agitador de tamices marca RETSCH modelo 1210040121I. Se utilizaron las mallas 4, 6, 8, 10 y 12 para realizar el tamizado de los materiales (Figura 6). El tamizado se realizó a una velocidad de 60 rpm hasta tamizar todo el material.



*Tamizado por mallas 4,6,8,10,12*



*60 rpm*

*Figura 6 Tamiz de pruebas físicas*

Se utilizaron las fórmulas que se detallan a continuación para realizar el análisis granulométrico de cada uno de los materiales filtrantes.



Dividiendo el volumen total de la muestra entre el número de partículas de la mezcla se obtiene el volumen promedio de una partícula. El diámetro de dicha partícula es el diámetro medio de volumen y se obtiene a partir de la relación:

$$D_v = \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}^3}} \right]^{1/3}$$

Donde:

$X_i$ = Fracción de masa en un determinado incremento.

$n$ = Número de incrementos.

$D_{pi}$ =Diámetro promedio de las partículas, tomado como media aritmética de los diámetros mayor y menor en el incremento.

El tamaño promedio de las partículas para una mezcla de las mismas se identifica de varias formas diferentes. El más usado es el diámetro medio volumen superficie que está relacionado con el área de la superficie específica. Y está definida con la siguiente ecuación:

$$D_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}}}$$

El diámetro medio de masa se obtiene a partir de la ecuación:

$$D_w = \sum_{i=1}^n X_i D_{pi}$$

Para poder calcular a partir del análisis diferencial, el número de partículas en una mezcla, se utiliza la siguiente ecuación, a fin de calcular el número de partículas en cada fracción y la población total en una unidad de masa de muestra, se obtiene sumando todas las fracciones.

$$N_w = \frac{1}{aP_p} \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}^3}$$

Donde:

$a$ = Factor volumétrico de forma

$P_p$ = Densidad de las partículas

Si se conoce la densidad  $P_p$  y la esfericidad  $\Phi$ , de las partículas es posible calcular el área de la superficie de las partículas en cada fracción a partir de la ecuación, y sumando los



resultados de todas las fracciones para obtener la superficie específica. Si su densidad y esfericidad son constante  $A_w$  viene dada por:

$$A_w = \frac{6}{\Phi_s P_p} \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}}$$

Donde:

$P_p$ =Densidad

$\Phi$ = Esfericidad

Por otro lado, la síntesis de biocarbón para ser utilizado posteriormente para el tratamiento de lixiviados, se realizó mediante pirólisis en reactores hidrotermales a dos diferentes temperaturas: 450 y 550 °C (Gao et al. 2021; Qu et al. 2021). Los reactores se colocaron en horno eléctrico. Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante FTIR utilizando espectrofotómetro IR, así como espectroscopía foto electrónica de rayos x (XPS) para analizar la estructura y la composición, cualitativa y cuantitativa, de los biocarbones sintetizados. De esta manera, se pudo evaluar la temperatura que favorecía el proceso de síntesis de biocarbón a partir de los materiales propuestos.

#### **4.6. Tratamiento de residuo envejecido**

Se recolectaron residuos envejecidos provenientes de los rellenos sanitarios La Cañada y Regional Yecapixtla, ubicados en Ixtapaluca (Estado de México) y Yecapixtla (Morelos (Figura 7)).





Figura 7 Recolección de residuos envejecidos en La Cañada

Para la caracterización de los residuos sólidos se determinarán los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, nitratos, sólidos, nitrógeno amoniacal, entre otros, aplicando las técnicas analíticas establecidas por el Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2017).

Por otro lado, se recolectaron aproximadamente 40 kg de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en una PTAR en Puebla para ser utilizada en pruebas de tratabilidad del residuo envejecido.

Las lombrices se mantuvieron en un vermicompostero en el Instituto con la finalidad de verificar la sobrevivencia y adaptación a las condiciones ambientales del sitio experimental. Para ello, se adicionó a los vermicomposteros 240 kg de lodo residual proveniente de una PTAR. Los vermicomposteros se mantuvieron con una humedad del 60% aproximadamente a través de riegos diarios. Después de dos meses se realizaron observaciones a través de un microscopio estereoscópico.



## **5. Resultados**

### **5.1. Base de datos**

Con la información obtenida en la revisión bibliográfica realizada sobre las características de los lixiviados en México y la caracterización realizada en el presente proyecto y los anteriores del grupo de trabajo del IMTA, se elaboró una base de datos en Excel (Tabla 4).



Tabla 4 Ejemplo de parte de la base de datos elaborada con la revisión bibliográfica

	Nombre	La Perseverancia	Bordo Poniente	Cuetzalan	Guadalupe Victoria	Tetlama		
	Ubicación	Cuatla, Morelos	Texcoco, Edo. Méx.	Cuetzalan del Progreso, Puebla	Mexicali, Baja California	Temixco, Morelos	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	Mérida, Yucatán
	Tipo sitio	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Basurero municipal	Relleno sanitario	Tiradero	Sitio de disposición final	Relleno sanitario
Parámetro	Unidades	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
pH	Unidades	8.48	9.06	7.2	7.1	8.04±0.17	8.556	8.4
Conductividad	mS/cm	34.6	27.73	0.68	15.4			
SDT	ppm	-	-	-	7.7			
DBO <sub>5</sub>	mg/L	686	315	309	5	1500±500	926.8	1652
DQO	mg/L	23,000	3,313	289	172.5	14680±3225	6177.8	5764
Arsénico	mg/L	0.1132	0.0137	0.0682		0.233±0.224		
Cadmio	mg/L	<0.030	<0.030	<0.030		0.433±0.057		
Cobre	mg/L	0.216	0.099	<0.050			0.1900	
Cromo	mg/L	0.930	0.170	<0.10		<0.1	2.7270	
Hierro	mg/L	49.17	2.79	74.03		65±5	21.16	
Manganeso	mg/L	2.701	0.078	1.260		<0.1		
Mercurio	mg/L	0.0050	<0.0005	0.0010		33.27±105.57		
	Nombre	La Perseverancia	Bordo Poniente	Cuetzalan	Guadalupe Victoria	Tetlama		



	Ubicación	Cuatla, Morelos	Texcoco, Edo. Méx.	Cuetzalan del Progreso, Puebla	Mexicali, Baja California	Temixco, Morelos	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	Mérida, Yucatán
	Tipo sitio	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Basurero municipal	Relleno sanitario	Tiradero	Sitio de disposición final	Relleno sanitario
Parámetro	Unidades	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Níquel	mg/L	1.50	0.35	<0.10		<0.1	1.6400	
Plomo	mg/L	0.23	0.16	<0.10		19.59±18.54	1.8510	
Zinc	mg/L	0.83	0.23	0.10		0.333±0.057	3.43	
Observaciones					Muestra tomada al borde del vertedero a una profundidad de 6 m		Datos de 2008, valores promedio	Valores promedio
Referencia		García-Sánchez et al. 2022	García-Sánchez et al. 2023	García-Sánchez et al. 2024	Reyes-López et al. 2008	Vedrenne et al. 2012	Nájera et al. 2010	Méndez et al. 2004



Con la información anterior y la ubicación de los sitios de disposición final así como sus características, obtenidos de la base de datos del INEGI, se elaboró un Sistema de Información Geográfica (SIG), tal como se muestra en la Figura 8 y Figura 9, en el que se encuentran identificados los sitios de disposición de residuos sólidos urbanos junto con sus características y las características de los lixiviados generados.

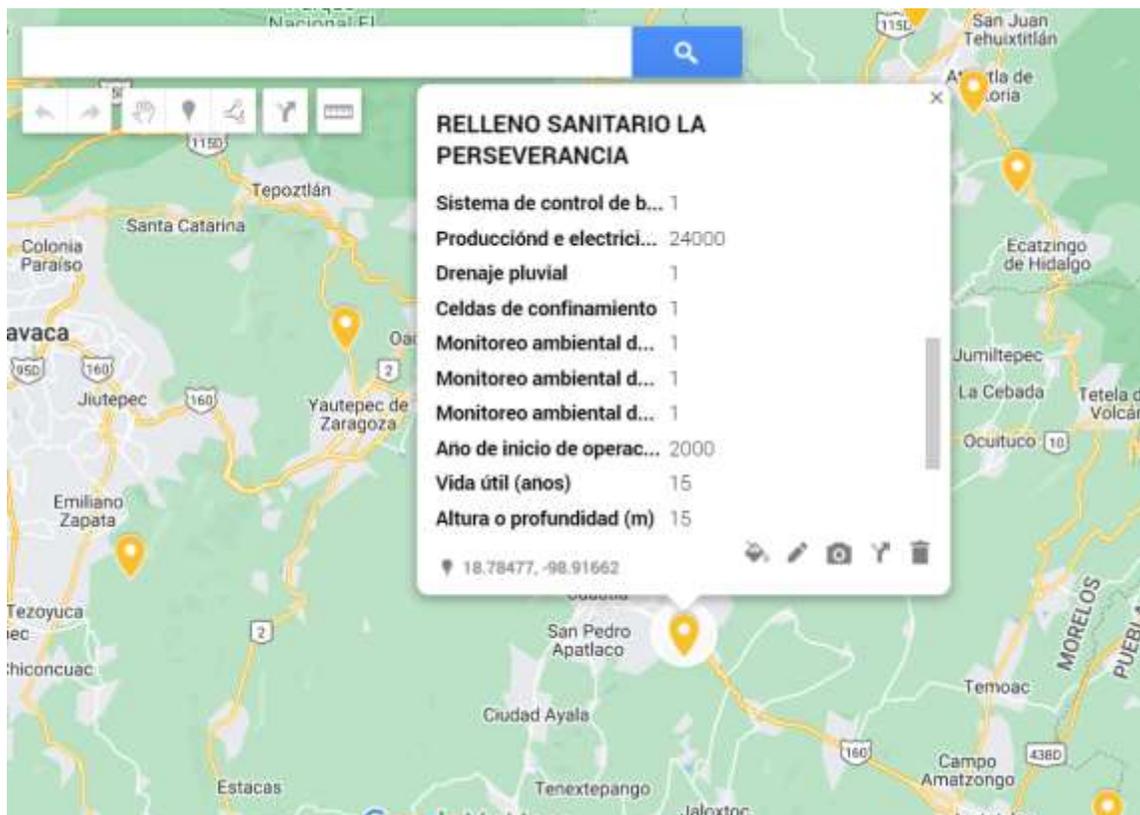


Figura 8 Características del sitio de disposición final

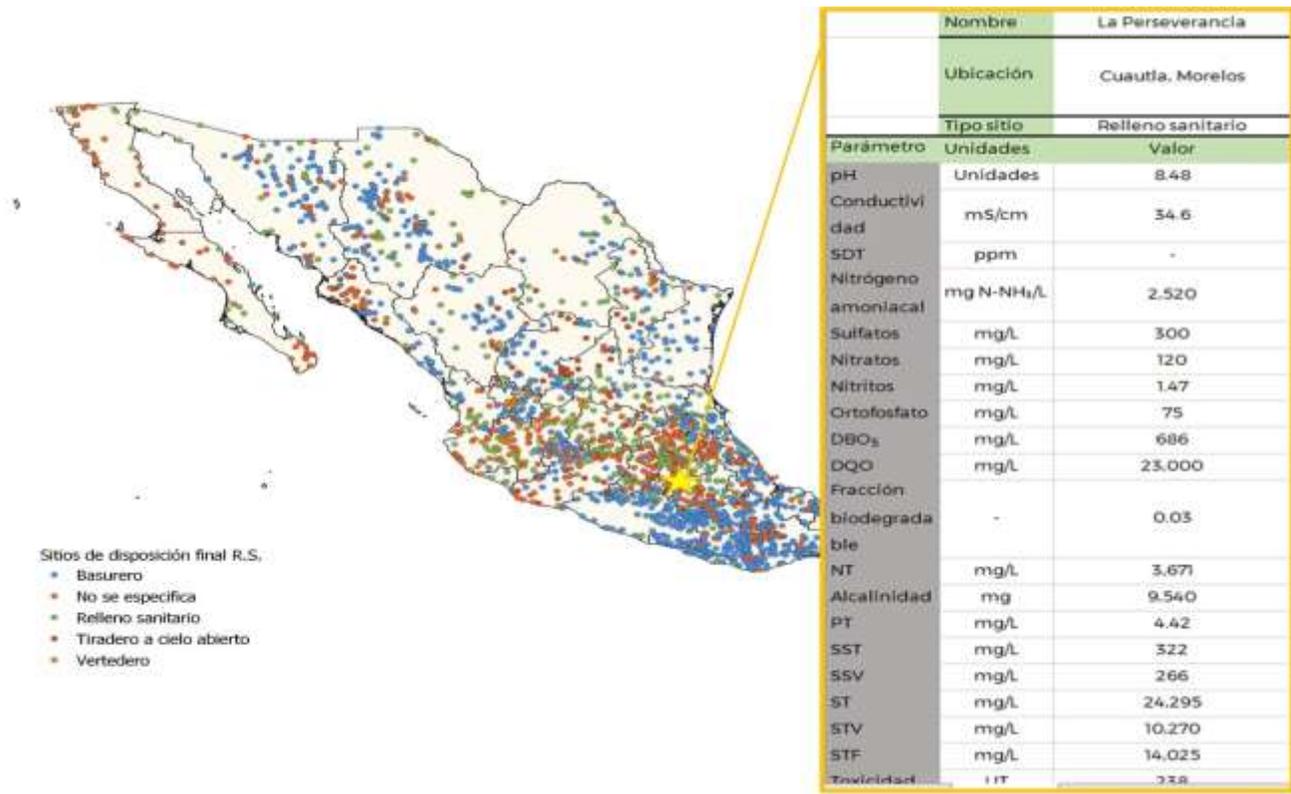


Figura 9 Características de lixiviado en el SIG

## 5.2. Caracterización de lixiviados

El Relleno Sanitario (RESA) Bordo poniente fue clausurado entre 1990 y 1992, se encuentra localizado en los límites de la CDMX y el Estado de México, en cercanía de la autopista Peñol- Texcoco. De acuerdo con personal del relleno, el RESA Bordo Poniente recibió residuos por varios años de la CDMX y actualmente el sitio está bajo proceso de remediación, sin embargo, el tratamiento actual solo consiste en la recirculación del lixiviado.

El RESA La Cañada se encuentra activo y recibe diariamente 2,600 toneladas de residuos por día, atendiendo a la población de CDMX, Valle de Chalco e Ixtapaluca. La celda de donde se tomó la muestra fue la #9 con al menos 30 m de profundidad, la cual tiene año y medio de antigüedad. En La Cañada los residuos se depositan directamente en cada celda, donde se compactan con la maquinaria “pata de cabra” y la única separación de basura que se efectúa es la división de los residuos vegetales de parques y jardines de Ixtapaluca. Los lixiviados generados en cada celda se recirculan o se evaporan en una laguna para tal propósito. El lixiviado en exceso se usa para regar caminos y evitar el levantamiento de partículas dentro del relleno.

Respecto a Rancho Coronel, ubicado en el municipio de Tlaltizapán en el estado de Morelos, este está activo recibiendo 100 toneladas diarias. La antigüedad de sus celdas es de

aproximadamente 15 años y actualmente se está llevando a cabo la construcción de nuevas celdas con geomembrana. Este RESA recibe residuos de tres municipios de Morelos: Tlaltizapán (45 a 50 toneladas diarias), Zacatepec (25 a 30 toneladas diarias) y Tlaquiltenango (30 toneladas diarias). En Rancho Coronel se realiza la separación de residuos antes de disponerse, donde se segmenta el pet, vinil, soplado, archivo, chatarra, cristal, cobre, bronce, además de hallarse pepenadores en el sitio que ayudan con estas tareas. Las celdas de este RESA tienen aproximadamente de 80 a 100 m de largo y de 30 a 35 m de ancho. El RESA tiene una laguna de lixiviados donde estos se acumulan y cada tiempo que llega a un nivel. Los lixiviados se bombean para su recirculación a las celdas.

Con respecto al RESA de Yecapixtla, no se obtuvo información en el sitio.

En la Tabla 5 se muestran las características de los lixiviados recolectados en los rellenos sanitarios La Cañada, Bordo Poniente, Regional Yecapixtla y Rancho Coronel.

Se puede observar que las concentraciones más elevadas de contaminantes se encontraron en el relleno sanitario La Cañada, mientras que las más bajas se encontraron en Rancho Coronel. Se observa también que la relación  $DBO_5/DQO$  en todos los casos es menor a 0.3, lo que indica una baja biodegradabilidad de los lixiviados.

Los lixiviados presentaron concentraciones de DQO en un rango entre 1,174 a 14,146 mg/L; sólidos entre 7,233 a 21,120 mg/L y nitrógeno amoniacal entre 733 a 1,546 mg/L.

*Tabla 5 Parámetros para la caracterización fisicoquímica de lixiviados*

Parámetro	Unidades	La Cañada	Bordo Poniente	Regional Yecapixtla	Rancho Coronel
DQO	mg/L	14,146±1,678	5,168±1,357	4,654	1,174±203
$DBO_5$	mg/L	1,314±66	100±17	726	49±25
pH	Unidades	8.04	8.1	9.6	7.58
Alcalinidad	mg $CaCO_3/L$	10,472±1,711	12,458±62		422±52
Nitrógeno amoniacal	mg N- $NH_3/L$	733±58	1,547±6	3,325	2,250±40
Nitratos	mg/L	28±3	33±4	10.75	197±6
Nitritos	mg/L	0.67±0.23	0.18±0.14		48±2
ST	mg/L	13,587±411	21,120±520		7,233±176
STV	mg/L	2,910±231	3,755±165		2,910±231
STF	mg/L	4,323±176	17,365±355		4,323±176
SST	mg/L	627±214	350±36	171	190±35
SSV	mg/L	363±85	83±29		47±45
SSF	mg/L	263±85	267±40		143±25
Color aparente	UPtCo	16,433±3,853	3,597±25		1,913±90
Color verdadero	UPtCo	9,900±111	2,770±10		1,797±64
Relación $DBO_5/DQO$		0.092	0.0194	0.156	0.0414



### 5.3. Pretratamientos fisicoquímicos

Los resultados de las pruebas con ozono y ozono+ultrasonido mostraron una remoción de color aparente en todos los casos (Figura 10), presentando mayores remociones para los dos tratamientos en el lixiviado de Bordo Poniente, con valores en un rango entre 46 a 78% en los tres pH evaluados. Para el lixiviado de La Cañada la remoción de color máxima se alcanzó con ozono a un pH de 3 (33%). Como puede observarse en la Figura 11 a simple vista se presenta un cambio en la coloración del lixiviado al disminuir el pH y después del tratamiento se observa que la coloración cambia.

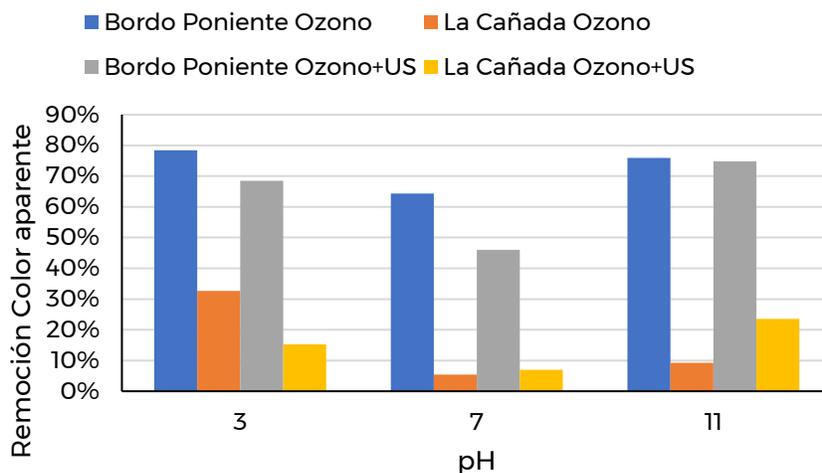


Figura 10 Remoción de color aparente en pretratamientos fisicoquímicos



Figura 11 Coloración de lixiviados antes y después del pretratamiento con ozono y ozono+ultrasonido

Se encontró que para el lixiviado proveniente de Bordo Poniente se presenta una mayor concentración de DQO en el efluente de ambos sistemas (ozono y ozono+US), mientras que para el lixiviado proveniente de La Cañada se presentan remociones en un rango entre 2 a 23% con ambos pretratamientos. Los resultados mostraron que para el lixiviado de La Cañada ninguno de los pretratamientos utilizados incrementa la relación  $DBO_5/DQO$ , mientras que para el lixiviado de Bordo Poniente si se presenta un incremento en la biodegradabilidad (relación  $DBO_5/DQO$ ) para los pH de 3 y 7 con el pretratamiento con ozono (Figura 12 y Figura 13).

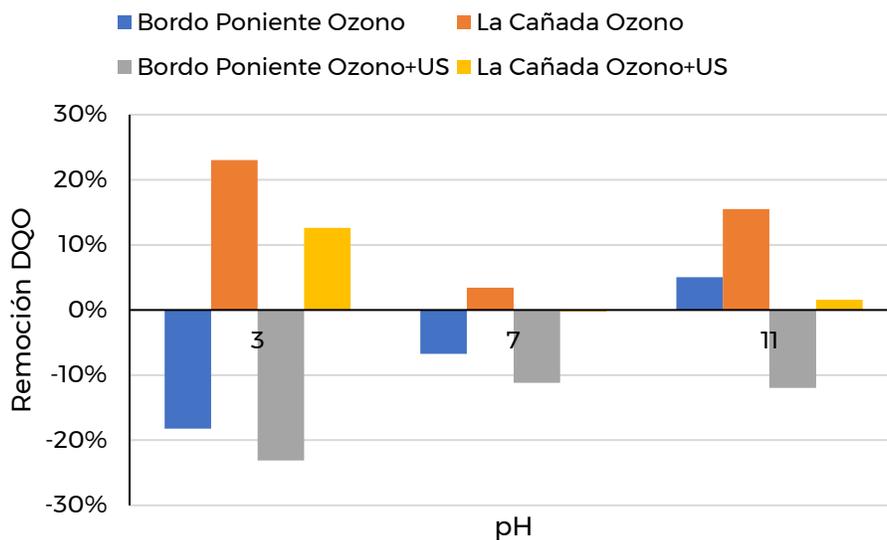


Figura 12 Remoción de DQO en lixiviados con pretratamiento

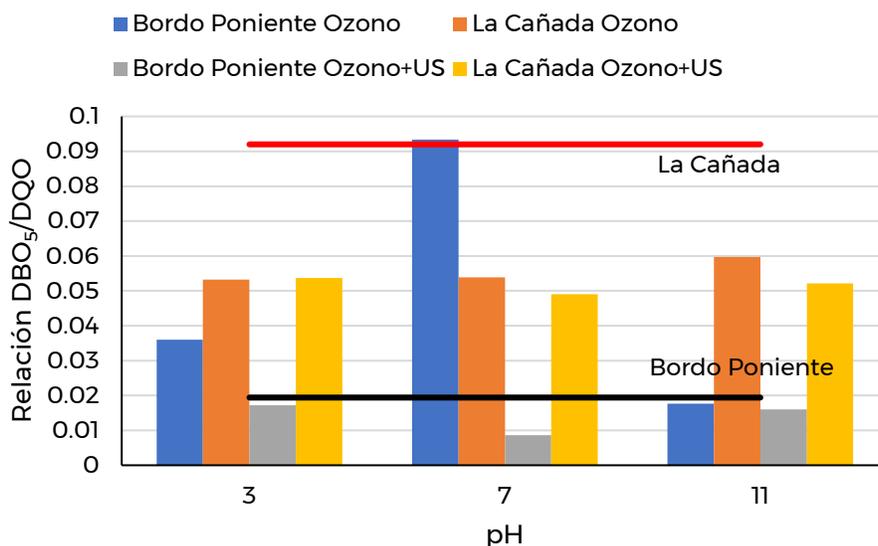


Figura 13 Biodegradabilidad en lixiviados pretratados

## 5.4. Tratamiento biológico

La eficiencia del tren de tratamiento granular anaerobio-aerobio (UASB-SBR) fue evaluada a través de cuatro experimentos en los que se modificó la carga orgánica (1 y 2.5 kg DQO m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>) y el tiempo de residencia hidráulica (1 y 2 d). Se utilizó como parámetro de respuesta la

remoción de materia orgánica (DQO) y la reducción de la toxicidad aguda utilizando como organismo de prueba *Danio rerio* en pruebas de exposición de 72 h.

El análisis estadístico se muestra en la Figura 14, en el cual se mostró una remoción promedio de la DQO en el efluente medio para los experimentos 1 al 4 de 7.45, 8.08, 15.88 y 12.97 %, respectivamente, en los cuales se observa una mayor remoción en el experimento 3, por lo que, con el análisis de varianza ( $p < 0.05$ ) demostró diferencias significativas entre los experimentos, al contrastarlos con los demás experimentos, teniendo remociones a considerar.

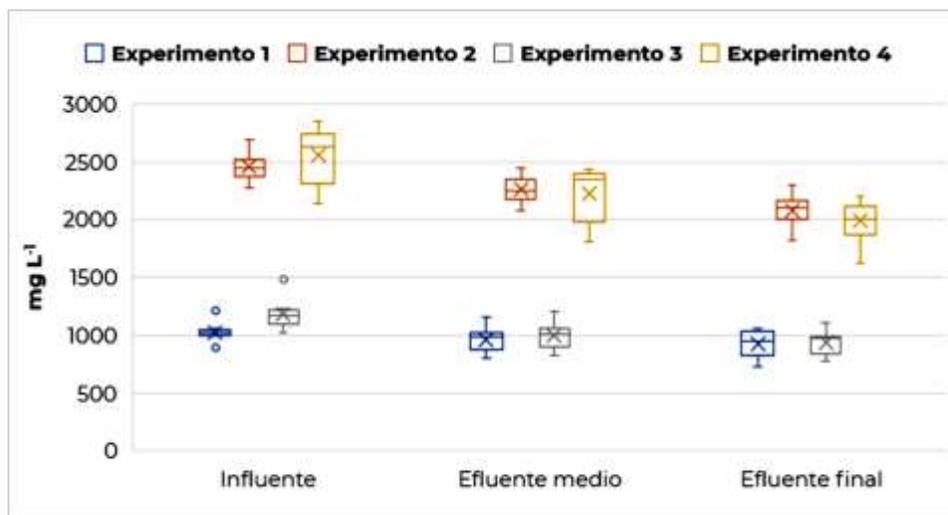


Figura 14 Análisis de varianza de la remoción de DQO entre los diferentes experimentos

De acuerdo a los resultados, se encontró que en el experimento 4, operado con un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 2 d y una carga orgánica volumétrica de  $2.5 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , se obtuvieron las mayores remociones de DQO ( $21.83 \pm 6.20\%$ ). Para el resto de los experimentos 1, 2 y 3, se obtuvieron remociones de  $13.11 \pm 5.74$ ,  $15.44 \pm 4.45$  y  $21.23 \pm 5.73 \%$ , correspondientes a los experimentos mencionados.

En cuanto a la toxicidad, al utilizar *Danio rerio* como organismo de prueba, se obtuvieron concentraciones letales medias (CL50-72 h) en el efluente del tratamiento de 4.77 y 21.9 [%] (v/v), respectivamente para el experimento 2 (TRH de 1 d y carga orgánica de  $2.5 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ) y 4 (TRH de 2 d y carga orgánica de  $2.5 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ), mientras que para el experimento 1 (TRH de 1 d y carga orgánica de  $1 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ) y 3 (TRH de 2 d y carga orgánica de  $1 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ), no se obtuvo un valor de CL50-72 h, indicando que no existe mortalidad para este organismo en el influente, sin embargo observaciones adicionales efectuadas sobre la condición de los juveniles para todos los experimentos, mostraron daños en tejido, e inmovilidad (Figura 15).

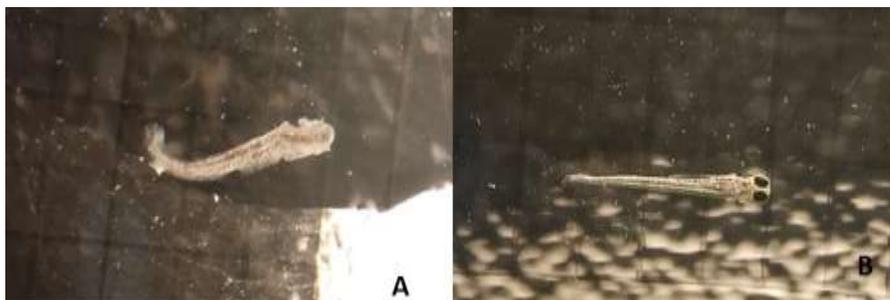
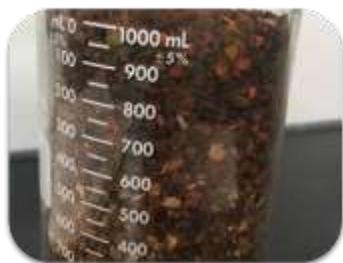


Figura 15 a) *Danio rerio* a 72 h de exposición a diferentes concentraciones de lixiviado, b) *Danio rerio* control negativo

## 5.5. Sistema de pulimento

Se realizó un análisis granulométrico de diferentes materiales (tezontle, composta/tezontle, turba/tezontle) para ser utilizados posteriormente como material de empaque en biofiltros para el tratamiento de lixiviados pretratados.

Los materiales fueron tamizados para tener tamaños de partícula uniforme (Figura 16).



*Composta/tezontle*



*Tezontle*



*Turba/tezontle*

Figura 16 Medios filtrantes tamizados

Una vez tamizados los materiales, fueron pesados (el material retenido en cada malla del tamiz) y con esos resultados se evaluaron las formulas del análisis granulométrico. Los resultados se muestran en la Tabla 6. De acuerdo a las formulas mencionadas en la metodología se utilizó una esfericidad ( $\phi$ ) de 0.5, este valor es un intermedio ya que no hay valores exactos en la literatura para los materiales que se utilizaron. También se utilizó el factor volumétrico de forma ( $\alpha$ ) con valor de 1 que es el que se utiliza para materiales inorgánicos, puesto que no existen datos para materiales orgánicos.

*Tabla 6 Resultados del análisis granulométrico*

<b>Parámetro</b>	<b>Significado</b>	<b>Tezontle</b>	<b>Composta/tezontle</b>	<b>Turba/Tezontle</b>
$A_w$ (mm <sup>2</sup> /g)	Superficie específica	3369	4211	4413
$N_w$ (partículas/g)	Número de partículas en la mezcla.	20	27	28
$D_v$ (mm)	Diámetro medio de volumen	3.92	3.90	3.96
$D_s$ (mm)	Diámetro medio-volumen superficie	4.18	4.49	4.78
$D_w$ (mm)	Diámetro medio de masa	3.73	3.37	3.19
$\rho$ (g/L)	Densidad promedio	857.47	680.31	594.54

Se puede observar en la Tabla que el medio filtrante con mayor superficie específica y número de partículas es la mezcla Turba/tezontle. Esto significa que la turba mezclada con el tezontle permite incrementar la porosidad promedio de la mezcla, esto es gracias a la alta porosidad de la turba (hasta del 95%) (Garzón-Zúñiga, 2001). Los diámetros de los tres materiales filtrantes son similares con valores en un rango entre 3 y 4 mm. El material que presenta mayor densidad es el tezontle, mientras que las mezclas Composta/Tezontle y Turba/Tezontle presentan una densidad menor ya que los materiales orgánicos son más porosos.

Se realizó un análisis diferencial (Figura 17) y un análisis acumulativo (Figura 18) del tamaño de partícula de los materiales filtrantes utilizados. Se observa en la figura que la mayor parte de la fracción retenida para los 3 medios filtrantes, se encuentra en el tamaño de partícula de 3 mm. En general, para los tres materiales filtrantes el tamaño de partícula oscilo entre 1.7 a 4 mm, lo cual indica que los materiales fueron homogéneos. Los resultados del análisis acumulativo mostraron nuevamente que el tamaño de partícula predominante en los tres materiales filtrantes fue de 3 a 4 mm, indicando nuevamente que los materiales presentan un tamaño de partícula homogéneo.

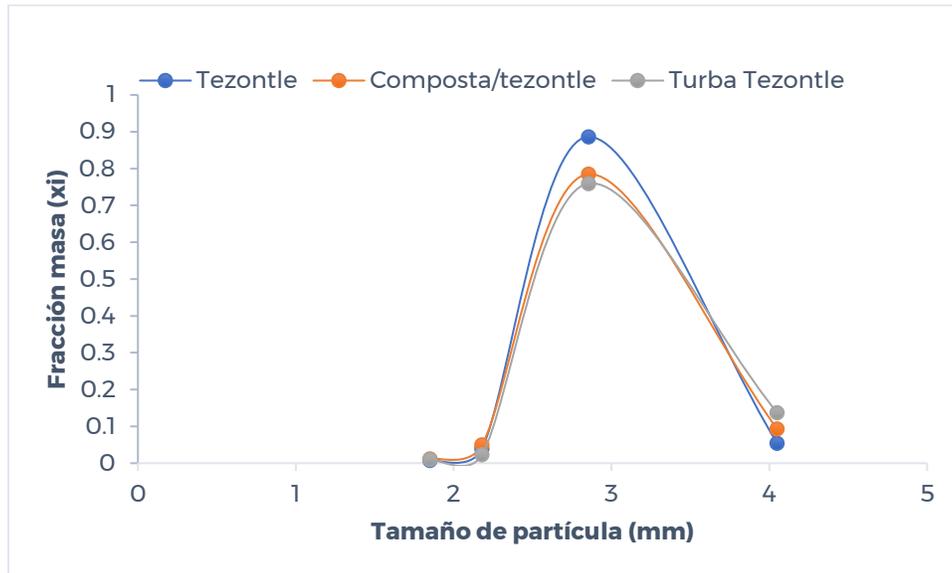


Figura 17 Análisis diferencial de los medio filtrantes

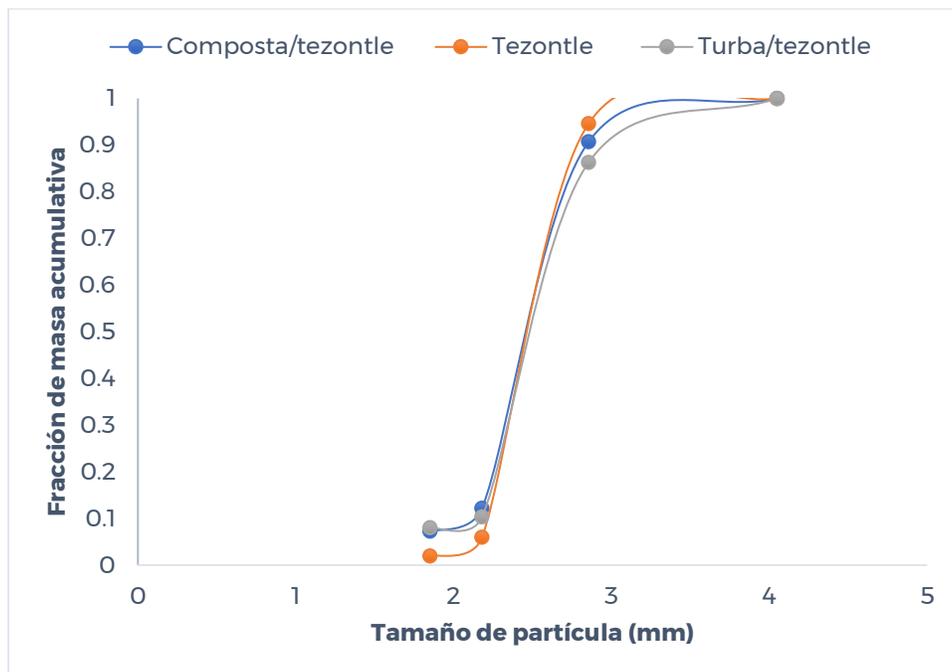


Figura 18 Análisis acumulativo de los medio filtrantes

Con respecto a los biocarbones sintetizados para su posterior uso para el tratamiento de lixiviados se caracterizaron mediante XPS y FTIR. En la Figura 19 se muestran los biocarbones sintetizados.

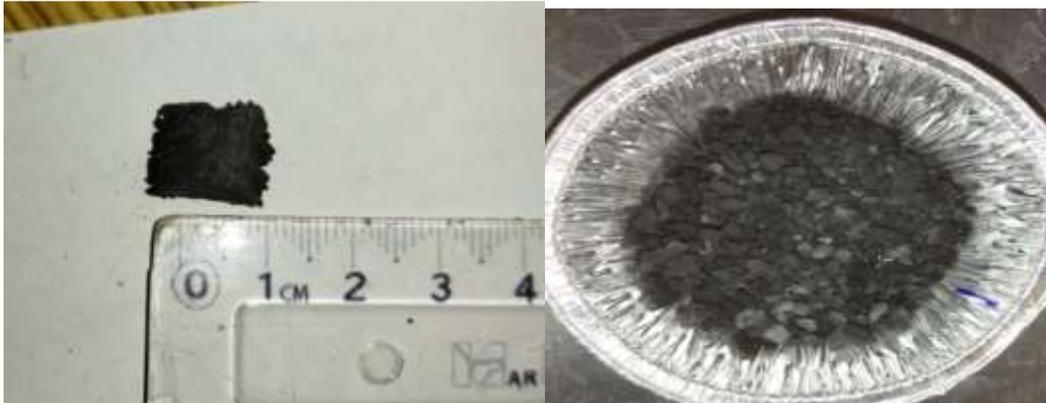


Figura 19 Biocarbón sintetizado a partir de olote de maíz y de cachaza de caña

En la Figura 20 y Figura 21 se observan los espectros de los biocarbones sintetizados. En general, el biocarbón con propiedades magnéticas de sargazo y el biocarbón de cachaza de caña tienen mayor capacidad de sorción, entre los materiales evaluados.

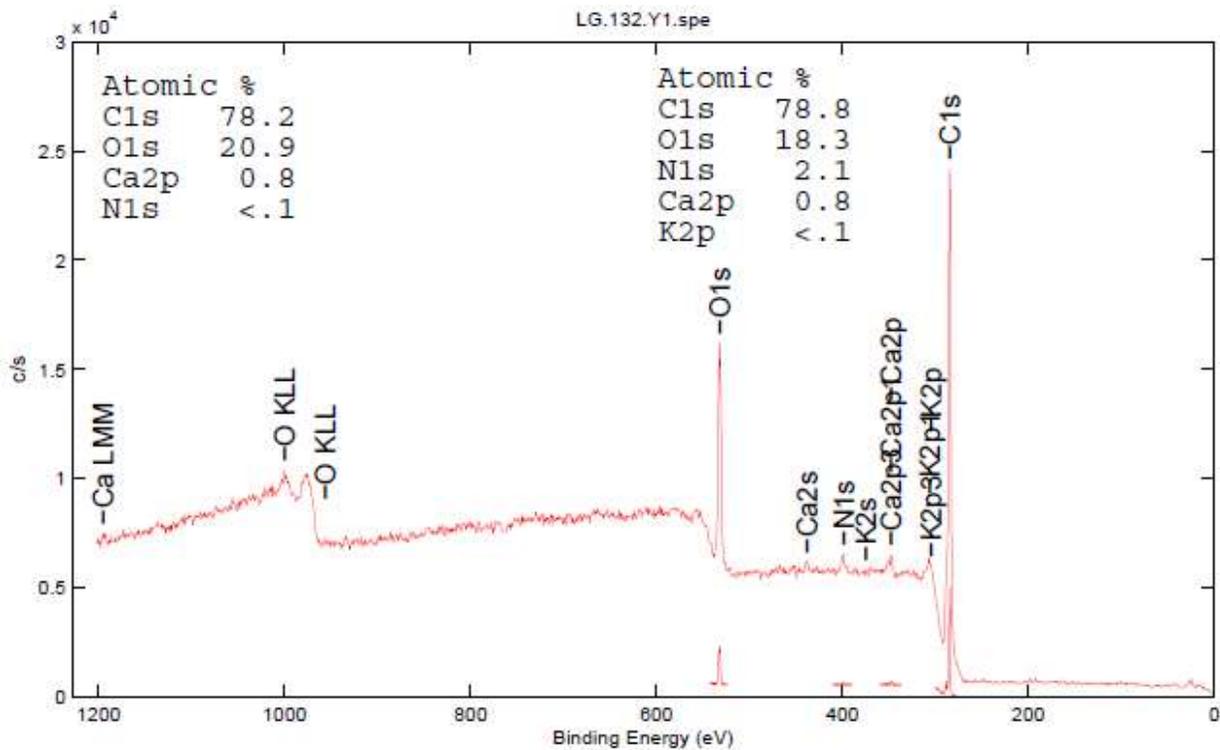


Figura 20 Espectro XPS de biocarbón de sargazo

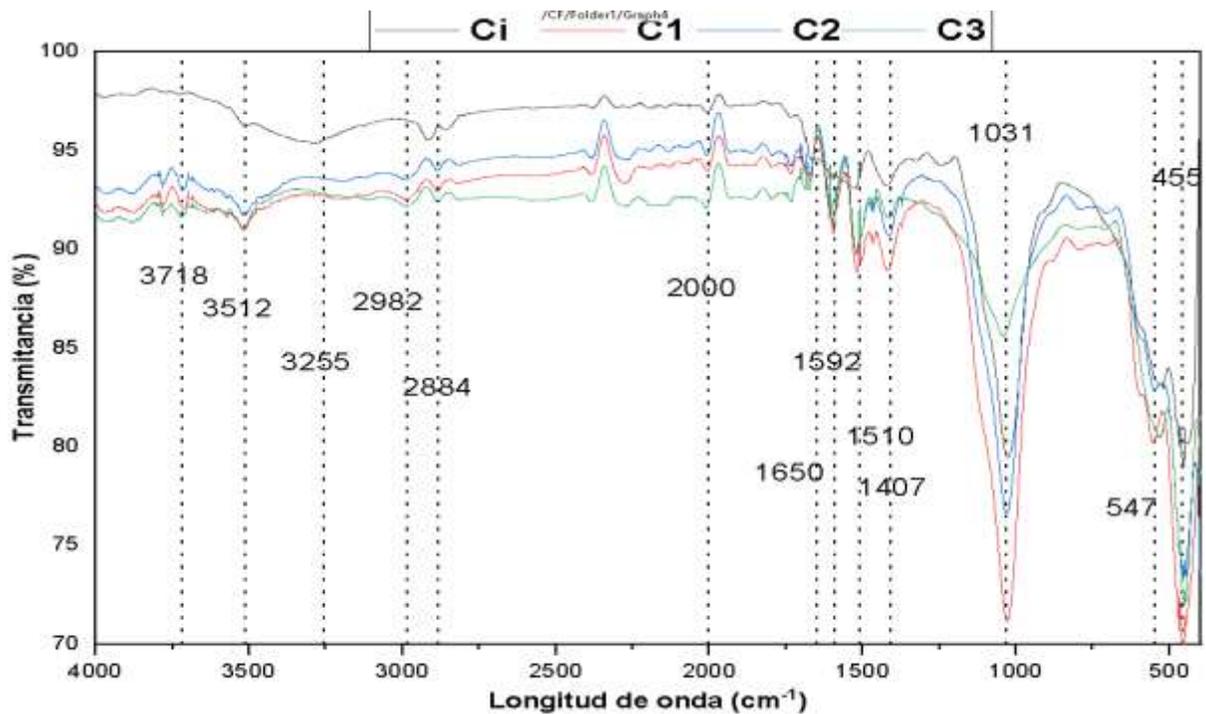


Figura 21 Espectro FTIR de los materiales sintetizados

## 5.6. Tratamiento de residuo envejecido

Se obtuvo una muestra de 40 kg de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) de una PTAR en Puebla para ser utilizada en las pruebas de tratabilidad de residuo envejecido. Se realizaron observaciones al microscopio y seguimiento para verificar la sobrevivencia y adaptación a las condiciones ambientales del sitio experimental.

Se pudo observar al microscopio (Figura 22) algunos signos claros de adaptación de la lombriz al medio y condiciones del sitio experimental, entre ellos un crecimiento sostenido, capacidad de reproducción, aparición de capullos y presencia de nuevas descendientes (cocones), además se de una coloración característica y cambios en la consistencia del sustrato por la actividad de las lombrices.



*Figura 22 Observaciones de lombriz en el microscopio*

Se recolectaron residuos envejecidos de los rellenos sanitarios La Cañada y Yecapixtla, al momento se encuentran en la etapa de caracterización para su posterior uso en el proceso de Vermicomposteo.



## **6. Conclusiones**

Los resultados obtenidos indican que las características de los lixiviados caracterizados no coinciden con la descripción de lo reportado en la bibliografía debido a que para algunos parámetros se considerarían maduros y para otros jóvenes o estabilizados, esto se puede deber a que en México no se realiza una separación de los residuos adecuada, lo que impactaría en la concentración de los contaminantes presentes en los lixiviados.

Los resultados de toxicidad mostraron que se requieren pruebas de toxicidad crónica para verificar el impacto que tienen los lixiviados en el medio ambiente y en la salud humana.

Se requiere continuar con las investigaciones para determinar el mejor tren de tratamiento para lixiviados y residuos envejecidos provenientes de sitios de disposición de residuos sólidos urbanos.



## 7. Bibliografía

- APHA (2017). American Public Health Association, & American Water Works Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. In Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Gao L., Li Z., Yi W., Li Y., Zhang P., Zhang A., Wang L. Impacts of pyrolysis temperature on lead adsorption by cotton stalk-derived biochar and related mechanisms. *J Environ Chem Eng.* 2021; 9 (4).
- García-Sánchez L., Estrada-Arriaga E. B., Falcón-Rojas A., Silva L. C., Gómez R. A. (2022) TC2204.1 Evaluación de procesos no convencionales para el tratamiento de lixiviados provenientes de un relleno sanitario. Informe final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Garzón-Zúñiga M. A. 2001. Mécanismes d'enlèvement de l'azote u lisier de porc par biofiltration aérée sur tourbe. Tesis de Doctorado. Université Laval. Quebec. Canadá.
- INEGI (2019). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México: Resultados generales. [en línea]. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/09/09/2020>.
- Lapeyre Cerna, M. E., & Pequeño Otoyá, J. P. (2019). Efecto de la oxidación fenton sobre la materia orgánica de los lixiviados de la infraestructura y disposición final de residuos sólidos de Cajamarca, 2019.
- McCabe W., Smith J., Harriott P. (2002) Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 867-869.
- Méndez N. R., Castillo B. E., Sauri R. M., Quintal F. C., Giacoman V. G., Jiménez M. B. (2004). Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería.* 8 (2): 155-163.
- Nájera H., Castañón J., Figueroa J., Rojas-Valencia M. (2010). Treatment of leachates from the landfill in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Mexico. Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste. Venice, Italy.
- Qu J., Wang Y., Tian X., Zhao J., Deng F., Tao Y., Jiang Q., Wang L., Zhang Y. KOH-activated porous biochar with high specific surface area for adsorptive removal chromium (VI) and naphthalene from water. *J Hazard Mat.* 2021; 401.
- Reyes-López J., Ramírez-Hernández J., Lázaro-Mancilla O., Carreón-Díazconti C., Martín-Loeches M. (2008). Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in México. *Waste management* 28: 33-39.
- SEMARNAT, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015). Informe de la Situación del Medio ambiente en México.
- Vedrenne M., Vasquez-Medrano R., Prato-García D., Frontana-Uribe B., Ibanez J. (2012). Characterization and detoxification of a manure landfill leachate using a combined coagulation-flocculation/photo Fenton treatment. *Journal of Hazardous Materials.* 205-206: 208-215.