

Determinación de la toxicidad de los lixiviados generados por los residuos sólidos municipales de Valladolid, Yucatán

Determination of the toxicity of leachates generated by municipal solid waste of Valladolid, Yucatan

Jennifer Guadalupe Ronquillo Gonzalez¹, Carlos Alberto Puch Hau¹, Ana Maribel Escalante Mañe², Germán Giacoman Vallejos², Jesús Roberto Pat Canul², Jesús Antonio Santos Tejero¹ y Delghi Yudire Ruiz Patrón^{1*}

¹*Tecnológico Nacional de México campus Valladolid, carretera Valladolid-Tizimín, KM 3.5
Tablaje Catastral No.8850, CP 97780, Valladolid, Yucatán, México.*

²*Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Avenida Industrias no contaminantes
por Anillo periférico Norte s/n, CP 97203, Mérida, Yucatán, México.*

**Corresponding author:
delghi.rp@valladolid.tecnm.mx*

Resumen. El manejo de residuos sólidos en Valladolid, Yucatán, enfrenta graves desafíos debido al crecimiento poblacional y la falta de un sistema adecuado para gestionar los desechos. Esto ha resultado en la acumulación de lixiviados en los vertederos locales, líquidos contaminantes que se infiltran en el suelo, representando un riesgo significativo para la calidad del agua y la seguridad hídrica de la población. El análisis de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados del relleno sanitario de Valladolid, Yucatán, reveló concentraciones de ciertas variables fisicoquímicas por arriba de NOM-001-SEMARNAT-2021, en particular para la Demanda Química de Oxígeno (DQO: 273.6 ± 50.1 mg/L), Nitrógeno Total (19.6 mg/L) y Fósforo Total (13.08 ± 1.5 y 14.1 ± 4.7 mg/L). A pesar de que los valores fisicoquímicos del lixiviado de Valladolid, fueron menores a los determinados en los lixiviados de la ciudad de Mérida, estos representan un riesgo para la seguridad hídrica. Los resultados de este trabajo resaltan la necesidad de implementar estrategias sostenibles para mitigar la contaminación, proteger la biodiversidad y garantizar la salud pública.

Palabras clave: agua residual, contaminación hídrica, residuos sólidos, salud pública.

Abstract. Solid waste management in Valladolid, Yucatán, faces serious challenges due to population growth and the lack of an adequate system for waste management. This has resulted in the accumulation of leachate in local landfills, polluting liquids that infiltrate soil, posing a significant risk to water quality and water safety for the population. Analysis of the physicochemical parameters of leachate from the landfill in Valladolid, Yucatán, revealed concentrations of certain physico-chemical variables above NOM-001-SEMARNAT-2021, in particular for the Chemical Oxygen Demand (COD: 273.6 ± 50.1 mg/L), Total Nitrogen (19.6 mg/L) and Total Phosphorus (13.08 ± 1.5 and 14.1 ± 4.7 mg/L). Although the physicochemical values of leachate from Valladolid were lower than those determined in the leachates from the city of Mérida, they represent a risk to water security. The results of this work highlight the need to implement sustainable strategies to mitigate pollution, protect biodiversity and ensure public health.

Keywords: waste water, water pollution, solid waste, public health.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos municipales se ha convertido en un desafío cada vez más significativo para la sociedad actual, especialmente cuando se trata del constante crecimiento poblacional. Para el caso de la ciudad de Valladolid, en el año 2020 la población fue de 84,460 habitantes, teniendo un crecimiento poblacional del 15.1% en relación al año 2010 (Data México, s. f.).

A medida que la población aumenta, también lo hace la generación de residuos sólidos, lo que provoca un incremento en la producción de lixiviados. Los lixiviados de los residuos sólidos municipales (RSM) son mezclas complejas de contaminantes que pueden infiltrarse en el suelo y deteriorar la calidad del agua, comprometiendo la seguridad hídrica de los habitantes de un país o región (López, 2023). Si estos lixiviados no se manejan de manera adecuada, pueden penetrar en el suelo y contaminar cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos, lo que pone en riesgo la biodiversidad y la salud pública. Valladolid, una ciudad del estado de Yucatán, se encuentra en una situación alarmante en esta problemática. A pesar de ser uno de los municipios con mayor densidad poblacional en la región, carece de un sistema eficiente para la gestión de residuos sólidos, lo que ha llevado a una acumulación preocupante de lixiviados en sus vertederos.

Estos líquidos contienen compuestos orgánicos e inorgánicos y microorganismos patógenos, los cuales representan un grave riesgo de contaminación para el acuífero, la principal reserva hídrica de la zona. Parte de este líquido de igual manera contiene metales pesados, caracterizados por ser persistentes y acumularse en algunas partes del cuerpo, como los riñones y los músculos, generando distintas repercusiones en la salud de los organismos (Escalante-Mañé et al., 2022; Cañizares-Martínez et al., 2024). Con base a lo mencionado anteriormente, el objetivo principal de este trabajo se basa en la caracterización fisicoquímica de los lixiviados generados en la ciudad de Valladolid, Yucatán, con la finalidad de determinar los potenciales riesgos asociados a estas aguas residuales. Esta investigación permitirá preservar los recursos naturales, proteger la salud pública y garantizar la seguridad hídrica para las generaciones presentes y futuras.

II. METODOLOGÍA

A. Área de estudio

La recolección de las muestras del lixiviado se realizó en el basurero municipal desde los depósitos de acumulación de líquidos que se encontraban presentes en el vertedero del municipio de Valladolid, Yucatán (20.6688412, -

88.2236409) ubicado cerca de la calle 54 del Barrio de Sisal.

Se recolectaron dos muestras compuestas (cada una con su respectiva replica), las cuales fueron preservadas en refrigeración a una temperatura de 4-8°C, hasta su análisis en laboratorio.



Figura 1. A) Identificación espacial del relleno Sanitario de Valladolid, Yucatán (Google Earth, 2024). B) Colecta del lixiviado (flecha en color amarillo). Fuente: Elaboración propia.

B. Materiales y equipos

Para la colecta del lixiviado se empleó un embudo, botellas de plástico de 1 L, cinta aislante, cinta blanca, plumón permanente, bolsas, equipo de protección personal (guantes, cubrebocas, bata, zapatos cerrados y lentes). Se colectó aproximadamente un litro de lixiviado de tres distintos depósitos, con la finalidad de obtener una mezcla compuesta. En total, para este estudio dos muestras compuestas fueron obtenidas. Una vez colectadas las muestras, estas fueron conservadas bajo condiciones de refrigeración tal como menciona Escalante-Mañé et al. (2022).

Entre los principales instrumentos utilizados podemos mencionar a un digestor kendall, matraz kendall, horno de secado, balanza analítica, pipeta, capsulas, filtros de fibra de vidrio, pinzas, entre otros.

Evaluación de los parámetros fisicoquímicos

Para la caracterización fisicoquímica se determinó la demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), nitrógeno total Kjeldahl (NKT), nitrógeno amoniacal (NH₃-N), sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos totales disueltos (STD), siguiendo los procedimientos recomendados por los métodos estándar para la examinación de aguas y aguas residuales (APHA-AWWA-WPCF, 2005). Estos análisis fueron llevados a cabo con el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY).

Demanda Química de Oxígeno

La DQO es un parámetro esencial para evaluar el nivel de contaminación orgánica de una muestra de agua. Durante el análisis, se utilizaron dicromato y sulfato de plata como reactivos principales, con el objetivo de oxidar los compuestos orgánicos presentes en las muestras de lixiviados (APHA-AWWA-WPCF, 2005; Escalante-Mañé et al. 2022). Para calcular el valor de la DQO se empleó la ecuación:

$$DQO = \frac{\text{Lectura} - 19.69}{0.319}$$

Sólidos totales

El análisis de sólidos totales es de gran importancia para evaluar la calidad del agua, ya que permite medir la cantidad de materia orgánica e inorgánica presente. Este proceso se realizó utilizando cápsulas, una balanza analítica y un horno de secado. El procedimiento consistió en pesar inicialmente las cápsulas vacías, seguido de la adición de 20 mL de cada muestra, etiquetadas como muestras 1, 2, 3 y 4. Posterior al secado en el horno, se volvieron a pesar para calcular la cantidad de sólidos totales en cada muestra de lixiviado (APHA-AWWA-WPCF, 2005; Escalante-Mañé et al. 2022).

Sólidos suspendidos

El análisis de sólidos suspendidos totales se realizó en un periodo de 1.30 minutos utilizando filtros de fibra de vidrio, un matraz, pinzas y un horno. Las fibras de vidrio fueron pesadas previamente para identificar su masa inicial, y luego se filtraron 50 ml de lixiviado. El proceso de filtración por vacío, duró entre 5 y 7 minutos, dependiendo de la muestra. Finalmente, los filtros fueron secados en el horno durante 1 hora (APHA-AWWA-WPCF, 2005; Escalante-Mañé et al. 2022).

Fosforo total

Para la determinación del fosforo total se utilizó un método similar al del análisis de sólidos suspendidos totales. Después de la digestión de las muestras, se llevaron a cabo mediciones utilizando un digestor Kendall (APHA-AWWA-WPCF, 2005; Escalante-Mañé et al. 2022), y los resultados se calcularon a partir de las lecturas obtenidas, usando la siguiente formula:

$$\text{fosforo} = \frac{\text{lectura} - 0.4762}{0.1083}$$

Nitrógeno amoniacal

Para este análisis, se emplearon diferentes materiales y equipos, tales como, matraces Buchi, vaso de precipitados, probetas, equipo destilador y diversos reactivos, entre los que destacan el ácido bórico, NaOH (hidróxido de sodio) y H₂SO₄ (ácido sulfúrico). El procedimiento se llevó a cabo en varias etapas. En primer lugar, se prepararon los matraces Buchi y se vertieron 50

mL de ácido bórico en un vaso de precipitado, los cuales fueron medidos con precisión en una probeta. Estas soluciones se distribuyeron en los matraces asignados a cada muestra. Luego, se extrajeron 10 mL de lixiviado de cada muestra, los cuales fueron diluidos con 90 mL de agua destilada en los mismos matraces. Posteriormente, todas las muestras fueron procesadas simultáneamente en el equipo destilador durante cinco minutos, para separar el nitrógeno amoniacal. Después de la destilación, se agregó 2 mL de NaOH en una probeta para preparar las muestras para el paso final, que consistió en una titulación con 10 ml de H₂SO₄. El volumen de ácido necesario para neutralizar cada muestra permitió determinar la concentración de nitrógeno amoniacal presente (APHA-AWWA-WPCF, 2005; Escalante-Mañé et al. 2022).

DBO

El procedimiento se llevó a cabo utilizando un equipo de aire conectado a un sistema de agua destilada, en el que se mezcló fosfato de sodio para obtener una solución adecuada. Se emplearon cinco litros de agua destilada en total, repartidos entre las muestras (un litro por muestra). Las mediciones se realizaron utilizando tres botellas de cristal para cada muestra, obteniendo así los valores de oxígeno disuelto inicial (APHA-AWWA-WPCF, 2005; Escalante-Mañé et al. 2022).

Nitrógeno total

Este proceso fue realizado utilizando un conjunto de equipos y reactivos, incluyendo matraces Erlenmeyer, matraces Buchi, tiosulfato y un digestor Kendall. El procedimiento comenzó con la adición de 50 ml de muestra en un matraz Erlenmeyer que contenía ácido bórico. Después se colocó hidróxido amoniacal en un matraz Buchi. Ambos materiales fueron transferidos al digestor Kendall, donde se sometieron a un proceso de digestión para descomponer las sustancias nitrogenadas presentes. Al finalizar el proceso de digestión, se procedió a la titulación de las muestras para medir la cantidad de nitrógeno total presente (APHA-AWWA-WPCF, 2005; Escalante-Mañé et al. 2022).

III. RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica

El lixiviado producido por los residuos sólidos municipales (RSM) en Valladolid, Yucatán, es una mezcla compleja que puede incluir una gran variedad de compuestos químicos. La evaluación individual de cada uno de estos compuestos es impráctica debido a la complejidad y al gran número de sustancias presentes. No obstante, se han realizado estudios de caracterización enfocados en identificar y analizar compuestos específicos que tienen relevancia ambiental.

Según Martínez et al. (2018), la caracterización química de los lixiviados es crucial para entender los riesgos que representan para el medio ambiente y la salud pública, ya

que estos pueden contener contaminantes que afectan los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Estos estudios permiten obtener una comprensión más detallada y precisa de los posibles riesgos que los lixiviados pueden representar para el medio ambiente en la región de Valladolid, Yucatán. La identificación de estos compuestos es fundamental para desarrollar estrategias de gestión y mitigación que protejan los recursos naturales locales y la salud pública.

En la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en las muestras de lixiviados, obteniendo valores que van desde 29.184 mg/L hasta 323.855 mg/L.

Tabla 1. Demanda Química de Oxígeno de los lixiviados de los residuos sólidos municipales de la ciudad de Valladolid, Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Replicas	Resultado
1	Replica 1	29.184 mg/L
	Replica 2	35.454 mg/L
2	Replica 3	323.855 mg/L
	Replica 4	223.542 mg/l

Con respecto a los sólidos totales, los resultados son presentados en la Tabla 2. Los pesos obtenidos en las muestras analizadas estuvieron dentro de un rango de 73.3 a 93.0 g. En el caso de los sólidos suspendidos las concentraciones fueron menores en relación a los sólidos totales, pero similares entre las muestras analizadas (Tabla 3).

Esto indica una importante presencia de materiales disueltos y suspendidos en los lixiviados, lo que puede afectar la calidad del agua y el suelo donde estos residuos son depositados.

Tabla 2. Sólidos totales determinados en las muestras de lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid, Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Réplicas	Sólidos totales (g)
1	Réplica 1	73.35
	Réplica 2	93.01
2	Réplica 3	73.59
	Réplica 4	82.94

La Tabla 3 muestra la cantidad de sólidos suspendidos, es decir, partículas que flotan en los líquidos en las distintas muestras de lixiviados de residuos sólidos. Los resultados son muy parecidos entre las réplicas, lo que significa que no hubo grandes diferencias en la cantidad de estas partículas de las muestras evaluadas.

Tabla 3. Sólidos suspendidos determinados en las muestras de lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid, Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Réplicas	Sólidos suspendidos (g)
1	Réplica 1	0.917
	Réplica 2	0.917
2	Réplica 3	0.922
	Réplica 4	0.920

En la Tabla 4 se muestra la presencia de fósforo en los lixiviados, el cual puede tener implicaciones significativas para el medio ambiente, especialmente en cuerpos de agua ya que contribuye a la eutrofización. Las concentraciones del fósforo estuvieron en un rango entre 9.44 y 18.95 mg/L.

Tabla 4. Fosforo total determinado en las muestras de los lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid, Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Réplicas	Fosforo total (mg/L)
1	Réplica 1	11.56 mg
	Réplica 2	14.61 mg
2	Réplica 3	18.95 mg
	Réplica 4	9.44 mg

Los resultados de la Tabla 5 muestran niveles de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) que podrían contribuir a la contaminación y alteración de los ecosistemas acuáticos, afectando tanto la biodiversidad como la calidad del agua. Los valores detectados fueron desde 8.3 hasta 12.1 ml. Las concentraciones más bajas fueron observadas en la muestra 1.

Tabla 5. Nitrógeno amoniacal (N-NH₃) determinado en las muestras de los lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid, Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Replicas	Lixiviado (ml)	N-NH ₃ (mg/L)
1	Réplica 1	10	8.3
	Réplica 2	10	8.5
2	Réplica 3	10	12.1
	Réplica 4	10	13

En relación a la DBO, los resultados se presentan en la Tabla 6. Los valores obtenidos van en una escala de 1.75 mg/L a 4.50 mg/L.

Tabla 6. Demanda biológica de oxígeno (DBO), determinado en las muestras de los lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid, Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Réplicas	DBO
1	Réplica 1	2.54
	Réplica 2	1.75
2	Réplica 3	4.12
	Réplica 4	4.50

En la Tabla 7 se puede observar los resultados de nitrógeno total, cabe mencionar que es un nutriente esencial, pero en cantidades excesivas puede provocar disminución de oxígeno lo que afectaría al entorno natural.

Los resultados muestran la concentración de nitrógeno total en las cuatro muestras de lixiviados recolectadas varían de 12.6 mg/L a 20.6 mg/L. Esto indica diferencias en los niveles de nitrógeno en las distintas áreas muestreadas.

Estas variaciones pueden deberse a diferencias en la composición de los residuos sólidos o en el proceso de descomposición de los mismos.

Tabla 7. Nitrógeno total determinado en las muestras de los lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid, Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Réplicas	Nitrógeno Total (mg/L)
1	Réplica 1	15.0
	Réplica 2	12.6
2	Réplica 3	18.6
	Réplica 4	20.6

Los resultados presentados en la Tabla 8 permiten comparar las concentraciones promedio de diversos parámetros medidos en las muestras de lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid y Mérida, en relación con los límites establecidos por la normatividad mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021). En cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los valores obtenidos en Valladolid muestran una variabilidad considerable entre las dos muestras, con 32.3 mg/L en la Muestra 1 y 273.6 mg/L en la Muestra 2. Aunque estos valores son significativamente más bajos que los reportados en Mérida, donde se alcanza un promedio de 14,600 mg/L (Escalante-Mañé et al. 2022), ambos resultados de Valladolid superan el límite máximo permisible establecido por la normatividad mexicana, que es de 60 mg/L. Este dato sugiere que, aunque la concentración de DQO es mucho menor en Valladolid en comparación con Mérida, aún existe un riesgo de contaminación, lo que resalta la necesidad de un mejor control de los lixiviados en la zona. En relación con la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), los resultados en Valladolid son bastante consistentes entre las dos muestras, con valores varían entre 1.75 mg/L a 4.5 mg/L, mientras que en Mérida se observa un valor mucho más elevado de 109.8 mg/L. Los valores más bajos en Valladolid sugieren que los lixiviados en esta ciudad tienen una menor carga de materia orgánica biodegradable en comparación con Mérida. El análisis de Nitrógeno Total (NT) revela que en Valladolid se observan concentraciones de 13.8 mg/L y 19.6 mg/L, valores cercanos al límite máximo permitido de 15 mg/L. En contraste, los resultados de Mérida son muy altos, alcanzando los 4,671 mg/L, lo que representa un riesgo de contaminación en la región. Aunque Valladolid presenta valores más bajos en comparación con Mérida, la superación del límite normativo en algunas muestras también es motivo de preocupación. En cuanto al Fósforo Total (FT), los valores reportados en Valladolid (13.08 mg/L y 14.1 mg/L) también superan el límite máximo permitido, que es de 5 mg/L, lo que sugiere una alta concentración de fósforo en los lixiviados. Este contaminante, junto con el nitrógeno, es un factor clave en la eutrofización de cuerpos de agua, lo que puede generar graves efectos en la biodiversidad acuática. Los

valores de Mérida, aunque mucho más altos (41.8 mg/L), destacan aún más la diferencia en el manejo y control de los lixiviados entre ambas ciudades. Por otro lado, en cuanto a los Sólidos Suspendidos (SS), los valores obtenidos en Valladolid son bastante bajos y consistentes, con 0.9 mg/L en ambas muestras, estando por debajo del límite permitido de 20 mg/L. Esto sugiere que, al menos en este parámetro, los lixiviados de Valladolid no presentan una carga significativa de partículas suspendidas que puedan afectar la calidad del agua o el suelo. En Mérida no se dispone de datos sobre este parámetro, lo que dificulta una comparación directa. Finalmente, en relación al Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃), los valores de Valladolid (8.4 mg/L y 12.5 mg/L), estos valores sugieren la presencia de compuestos amoniacales, que podrían tener impactos negativos si no se gestionan adecuadamente.

Tabla 8. Valores promedios determinados en las muestras de lixiviados de los residuos sólidos municipales de Valladolid en comparación de los resultados del relleno sanitario de Mérida. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Valladolid		Mérida	LMP México
	(en este estudio)		(Escalante-Mañe et al., 2022)	
	Muestra 1	Muestra 2		
DQO (mg/L)	32.3±3.1	273.6±50.1	14600± 150	60
DBO (mg/L)	7.2± 0.1	2.1 ± 0.3	4.3± 0.19	*
NT	13.8±1.2	19.6±1	4671 ± 67	15
FT	13.08±1.5	14.1±4.7	41.8 ± 0.1	5
ST	83.17±9.8	78.2±4.6	26392.0±151.8	*
SS	0.9±0	0.9 ±0.001	520.0±20.0	20
N-NH ₃	8.4±0.1	12.5±0.4	4239±6.9	*

Nota: Valor promedio (n=2, ± desviación estándar) de la calidad del lixiviado del relleno sanitario de Valladolid, Yucatán y los estándares nacionales para aguas residuales. (NOM-001-SEMARNAT-2021).

DBO (demanda biológica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), N.T (nitrógeno total), F.T (fosforo total), S.P (Sólidos suspendidos), S.T (Sólidos totales) y N.A (nitrógeno amoniacal). * Datos no obtenidos de la normatividad.

IV. DISCUSIÓN

Los lixiviados del relleno sanitario de Valladolid, Yucatán, demuestran importantes riesgos para el medio ambiente y la salud pública debido a sus elevados niveles de

contaminantes, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el nitrógeno y el fósforo, que exceden los límites permitidos por la normativa mexicana. Estos datos demuestran la necesidad de un programa de gestión de residuos sólidos en la zona, con la finalidad de reducir el impacto negativo a la calidad del agua dulce. Aunque en comparación con el relleno sanitario de Mérida, los lixiviados de Valladolid presentan concentraciones más bajas de contaminantes orgánicos, el riesgo sigue siendo considerable si no se toman acciones inmediatas. La acumulación de estos contaminantes puede provocar eutrofización y dañar la biodiversidad acuática. Es crucial, por tanto, implementar soluciones más sostenibles y fortalecer la gestión de residuos en Valladolid para salvaguardar tanto la salud pública como los recursos hídricos.

También existen estudios en otras regiones de México que han investigado la composición y toxicidad de los lixiviados generados en rellenos sanitarios, lo que permite ampliar el panorama sobre los riesgos ambientales asociados a este tipo de residuos. Por ejemplo, en el estudio realizado por Alcalde et al. (2019) en el relleno sanitario de Guadalajara, se observó que los lixiviados presentaban concentraciones significativamente altas de contaminantes como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el Nitrógeno Total (N.T), superando en varios casos los valores encontrados en los rellenos sanitarios de Valladolid y Mérida. Esto indica que los lixiviados no solo varían dentro del estado de Yucatán, sino que las características y magnitud de la contaminación pueden ser sustancialmente diferentes en otras ciudades, en función de los tipos de residuos generados y las condiciones específicas de cada relleno sanitario. De manera similar, investigaciones en otras partes del mundo también han confirmado la heterogeneidad en la calidad de los lixiviados, como lo reportan Zhao et al. (2017) en su estudio de lixiviados en China, donde las altas concentraciones de nitrógeno y materia orgánica fueron identificadas como amenazas significativas para los cuerpos de agua locales. Esto indica la importancia de considerar no solo los parámetros normativos locales, sino también las características particulares de cada sitio de disposición final de residuos, dado que los lixiviados son influenciados por factores como el clima, la composición de los residuos y las prácticas de manejo en cada región.

V. CONCLUSIONES

La investigación sobre los lixiviados del relleno sanitario de Valladolid, Yucatán, ha evidenciado la presencia de contaminantes, lo que implica riesgos significativos para la calidad del agua y la salud pública. Estos resultados reflejan la necesidad de mejorar la gestión de residuos en la región con el propósito de mitigar los efectos de la contaminación, especialmente de los recursos hídricos subterráneos que se encuentran en Yucatán. El presente

estudio ofrece una base para futuras investigaciones, enfocadas en el monitoreo continuo de la calidad del lixiviado y el desarrollo de estrategias más sostenibles de manejo de residuos. Esto permitirá no solo prevenir mayores daños ambientales, sino también fortalecer las políticas de protección de los recursos hídricos que se encuentre en la región.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Tecnológico Nacional de México con número de proyecto 20048.24-PD, otorgado a Carlos A. Puch Hau. Se agradece a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, por las facilidades brindadas para el procesamiento de las muestras de lixiviado.

REFERENCIAS

APHA-AWWA-WPCF (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation: Washington DC.

Alcalde, R., Sánchez, L., & Pérez, J. (2019). Caracterización fisicoquímica de lixiviados en el relleno sanitario de Guadalajara, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 32(4), 89-104.

Beddows, P., et al. (2007) "Los cenotes de la península de Yucatán", *Arqueología Mexicana* N° 83, pp 32-35.

Cañizares-Martínez, M. A., Quintanilla-Mena, M. A., Améndola-Pimenta, M., Rodríguez-Canul, R., Arcega-Cabrera, F., Del Río-García, M., Ceja-Moreno, V., Aguirre-Macedo, M. L., & Puch-Hau, C. A. (2024). Multiple-Integrated Biomarker Indexes to Assess the Responses of the Flatfish *Achirus lineatus* during Exposure to Light Crude Oil Water Accommodated Fraction. *Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology*, 113(5). <https://doi.org/10.1007/s00128-024-03967-x>

Ensañat, F. et al (2020) "Percepción de congestión y dimensión social de la capacidad de carga en cenotes de Yucatán", *Cuadernos de Turismo*, N° 45, pp. 93-112.

Escalante-Mañé, A.M., Hernández-Nuñez, E., Méndez-Novelo, R.I. et al. Exposure to Landfill Leachates Affects the Embryonic Development of Zebrafish, *Danio rerio*: A Case Study in Yucatan, Mexico. *Bull Environ Contam Toxicol* 108, 526–531 (2022).

Escalante-Mañé, A., Méndez-Novelo, R., Giacomán-Vallejos, G., González-Sánchez, A., Romo-Alvarado, J., Collí-Dulá, R., Quintal-Franco, C., & Puch-Hau, C. (2022). Enhanced removal of persistent contaminants and toxicity reduction through the application of a triple-stage fenton process to sanitary landfill leachates from Yucatan, Mexico. *Química Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170866>

López Arellano, G. I. (2023). Toxicidad de los lixiviados de residuos sólidos municipales: una amenaza para la seguridad hídrica en Yucatán. *Experiencias científicas, tecnológicas y de innovación (ECTI)*.

Martínez, R., Pérez, A., & Sánchez, T. (2018). Caracterización de lixiviados generados en rellenos sanitarios y su relación con la calidad del agua subterránea. *Ecología y Sociedad*, 23(4), 15-28.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Valladolid: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública Data México. (s. f.). Data México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/valladolid?redirect=true#:~:text=Acerca%20de%20Valladolid&text=En%202020%2C%201a%20poblaci%C3%B3n%20en,6.47%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%20anterior>.

Zhao, Y., Lu, W., Wang, H., & Zhang, X. (2017). Long-term monitoring and prediction of leachate characteristics in a large landfill: A case study in China. *Waste Management*, 63, 329-340.