

Caracterización fisicoquímica y biológica de los lixiviados procedentes del sitio de disposición final no controlado en Tlapacoyan, Veracruz, México

Physicochemical and biological characterization of leachate from the uncontrolled final disposal site in Tlapacoyan, Veracruz, Mexico

Miguel Ángel López Ramírez¹, Yasser Armando Aburto Gutiérrez², Keila Elena Ocaña Drouaillet³, Castellanos Onorio Olaya Pirene⁴, Fabiola Lango Reynoso⁵, Maribel López Ramírez⁶

Resumen

Uno de los principales problemas en México es la contaminación por lixiviados que se producen en los sitios de disposición final de residuos ya que son altamente tóxicos y dañan a la biota. Esta investigación se centra en determinar las características del lixiviado producido en el sitio de disposición final no controlado del municipio de Tlapacoyan, Veracruz (México).

Como resultado, se determinó que los parámetros que producen daño a la biota son nitrógeno total ($152.759 \text{ mg L}^{-1}$), mercurio (0.006 mg L^{-1}), cadmio (0.003 mg L^{-1}), cobre (0.052 mg L^{-1}), cromo (0.0731 mg L^{-1}), níquel (0.0524 mg L^{-1}), plomo (0.005 mg L^{-1}) y coliformes totales ($> 2\ 400 \text{ NMP}$), al no cumplir al menos una de las normas nacionales e internacionales de límites máximos permisibles. Asimismo, se determinó que el lixiviado producido en este sitio es del tipo maduro y poco biodegradable ($\text{DBO}/\text{DQO}=0.018$), por lo que los métodos típicos o de biorremediación no son recomendables para su tratamiento.

Palabras clave

lixiviados, contaminación, poco biodegradable, parámetros

Abstract

One of the main problems in Mexico is contamination by leachates that are produced in final waste disposal sites, since they are highly toxic and damage the biota. This research focuses on determining the characteristics of the leachate produced in the uncontrolled final disposal site in the municipality of Tlapacoyan, Veracruz (Mexico).

As a result, it was determined that the parameters that cause damage to the biota are total nitrogen ($152.759 \text{ mg L}^{-1}$), mercury (0.006 mg L^{-1}), cadmium (0.003 mg L^{-1}), copper (0.052 mg L^{-1}), chromium (0.0731 mg L^{-1}), nickel (0.0524 mg L^{-1}), lead (0.005 mg L^{-1}) and total coliforms ($> 2\ 400 \text{ MPN}$), as they do not meet at least one of the national and international standards of maximum permissible limits. Likewise, it was determined that the leachate produced at this site is of the mature and poorly biodegradable type ($\text{BOD}/\text{COD}=0.018$), so that the typical or bioremediation methods are not recommended for its treatment.

Keywords

Leachates, contamination, poorly biodegradable, parameters

- 1 Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, Martínez de la Torre – México [malopez@tecmartinez.edu.mx, https://orcid.org/0000-0001-5841-0668].
- 2 Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, Martínez de la Torre – México [170i0035@tecmartinez.edu.mx, https://orcid.org/0000-0003-1550-2495].
- 3 Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, Martínez de la Torre – México [kdrouaillet@tecmartinez.edu.mx, https://orcid.org/0000-0003-0146-4387].
- 4 Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz – México [olaya.co@veracruz.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0003-3510-2640].
- 5 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. México. [fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0001-8359-434X].
- 6 Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz – México [119020912@veracruz.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0002-0986-3238].

1. Introducción

A nivel mundial, el manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) ha representado un problema debido, entre otras cosas, a los altos volúmenes de RSU que genera la ciudadanía. Cuando el manejo de estos es inadecuado, puede afectar a la salud de la población y al medio ambiente (Sáez et al., 2014). México cuenta con 2 439 municipios donde los ayuntamientos tienen la responsabilidad de manejar los RSU. Se estima que, de cada 100 sitios para la disposición de residuos sólidos, 66 son sitios no controlados (tiraderos a cielo abierto) sin ningún control ambiental y 33 son vertederos municipales que funcionan bajo mínimos controles técnico-administrativos y con fallas en la infraestructura para controlar la contaminación ambiental (Salazar-Trujillo, 2016) lo cual afecta, sobre todo, a la tierra, al agua y al aire. Los residuos dispuestos de manera incorrecta producen gases como monóxido y dióxido de carbono, metano y ácido sulfhídrico denominados biogases y demás de un líquido altamente tóxico y de composición variable denominado lixiviado (Vian-Pérez et al., 2019).

Los lixiviados se pueden definir como el líquido que se percola a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos y en suspensión. En la mayoría de los sitios no controlados el lixiviado se forma por fuentes externas (agua de lluvia, infiltración del nivel freático, entre otros.) aunque una parte de estos se forma por la descomposición anaeróbica de los residuos (Tchobanoglous et al., 1994)

Desde el punto de vista de calidad los lixiviados contienen altas cargas de materia orgánica, además de sustancias inorgánicas como metales pesados (con su potencial efecto sobre el ecosistema acuático), alto contenido de sólidos totales y disueltos, de nitrógeno (en su forma amoniacal), alta concentración de cloruros, compuestos orgánicos diversos, así como gran variabilidad de pH. Lo anterior depende de la naturaleza de los desechos (pH, edad, temperatura) y de la fase de estabilización en que se encuentre (El-Fadel et al., 2002).

Aunque la composición química del lixiviado es variable, la cual depende de los tipos de residuos sujetos a la lixiviación, y no es posible hablar de una composición promedio, sí se puede manejar valores típicos a manera de referencia, (tabla 1):

Tabla 1. Valores de referencia de lixiviados

Parámetro	Vertedero nuevo	Vertedero viejo
	Rango (mg L ⁻¹)	Rango (mg L ⁻¹)
DBO ₅	2 000-30 000	100-200
COT	1 500-2 0000	80-160
DQO	3 000-60 000	100-500
SST	200-2 000	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	80-120
Nitrógeno amoniacal	10-800	20-40
Nitratos	5-40	5-10
Fósforo total	5-100	5-10
Ortofosfatos	4-80	4-8
Alcalinidad	1 000-10 000	200-1 000

pH	4.5-7.5	6.6-7.5
Dureza total como CaCO ₃	300-10 000	200-500
Calcio	200-3 000	100-400
Magnesio	50-1 500	50-200
Potasio	200-1 000	50-400
Sodio	200-2 500	100-200
Cloro	200-3 000	100-400
Sulfatos	50-1 000	20-50
Hierro total	50-1 200	20-200

Nota: Adaptado de Tchobanoglous et al. (1994)

En la tabla 1 se aprecia, que el lixiviado tiene concentraciones muy elevadas de sólidos suspendidos y totales, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), carga orgánica total y dureza, entre otros parámetros. Debido a esta carga de elementos contaminantes, el lixiviado representa un peligro potencial cuando el relleno sanitario se construye en una zona con presencia de agua subterránea, especialmente si esta abastece de agua potable a la población aledaña, y si los estratos naturales del terreno son porosos y de bajo intercambio iónico (López-Ramírez, 2018).

El municipio de Tlapacoyan, Veracruz (México), cuenta con un sitio para la disposición de los residuos municipales (figura 1), sin embargo, estos sitios carecen de un control adecuado e ingenieril, ya que no tienen laguna de lixiviados, pozos de venteo o celdas de contención, entre otras instalaciones. La generación de lixiviados convierte a este sitio en un lugar no apto para retener desechos por ubicarse a 200 m del río Alseseca y por su cercanía a zonas agrícolas ubicadas alrededor.

Figura 1. Ubicación del sitio de disposición final no controlado en Tlapacoyan, Veracruz (México)



En este documento se presentan las características fisicoquímicas y biológicas de los lixiviados que se generan allí y que pueden llegar a través de la escorrentía a la zona agrícola y con el paso del tiempo a los cuerpos de agua.

2. Metodología

Características del sitio

Se realizaron muestras simples de los lixiviados procedentes del sitio de disposición final no controlado durante el periodo comprendido entre septiembre y noviembre de 2022, ubicado en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz, México, al costado de la carretera Tlapacoyan-Plan de Arroyos, en la zona 14Q 688 949.04 m E y 2 207 991.00 m N, se encuentra a 200 m del río Alseseca, afluente del río Nautla. Además, está rodeado de suelo, principalmente suelo agrícola destinado a cultivos comerciales de cítricos y musáceas. Una de las principales características que se pueden observar en la figura 2 el sitio destinado para los residuos marca una coloración arenosa rodeada de vegetación.

Figura 2. Sitio de disposición final no controlado en Tlapacoyan, Veracruz (México)



Dicho sitio no tiene ningún control por lo que los residuos se encuentran esparcidos por todo el lugar. Así mismo, se cavan depósitos, a manera de métodos de contención clandestinos, sin membranas de retención (figura 3). En estos depósitos se colocan los desechos, los cuales no son cubiertos; por lo tanto, se generan los lixiviados que esparcen por el sitio y deterioran la biota de los alrededores.

Figura 3. Depósito clandestino del sitio de disposición final no controlado



Características y lavado de los envases

Para el muestreo, se emplearon envases de polietileno de alta densidad, esto para evitar que el envase sea, en su caso, corroído por el lixiviado y al mismo tiempo que este no se contamine con algún residuo que puedan contener los recipientes.

Los envases empleados para las tomas de muestras, fueron previamente lavados con una solución de ácido nítrico (HNO_3) al 2 % para evitar contaminación externa de metales pesados.

Procedimiento de muestreo

La toma de muestras se llevó a cabo siguiendo el proceso establecido en la norma mexicana NMX-AA-003-1980 (1980), adecuándola a las características del sitio, por ejemplo, utilizando un extensor de 1 a 2 m de largo para la toma de muestras profundas.

Métodos de análisis

Respecto los métodos de experimentación de los parámetros se realizaron por triplicado y se analizaron de acuerdo a las siguientes normas establecidos en la tabla 2:

Tabla 2. Metodología aplicada

Parámetro	Normativa
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016 (2016)
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013 (2013)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	NMX-AA-028-SCFI-2001 (2001)
Materia flotante	NMX-AA-006-SCFI-2010 (2010)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	NMX-AA-030/2-SCFI-2011 (2012)
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013 (2014)
Cianuro	NMX-AA-058-SCFI-2001 (2001)
Fosforo	U. S. Environmental Protection Agency ([U. S. EPA] 1993, agosto)
Nitrógeno total	Cálculo
Sólidos suspendidos totales	NMX-AA-034-SCFI-2015 (2015)
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2013 (2013)
Arsénico	NMX-AA-051-SCFI-2016 (2017)
Mercurio	NMX-AA-051-SCFI-2016 (2017)
Cadmio	U. S. EPA (2000, noviembre)
Cobre	U. S. EPA (2000, noviembre)
Cromo	U. S. EPA (2000, noviembre)
Níquel	U. S. EPA (2000, noviembre)
Plomo	U. S. EPA (2000, noviembre)
Zinc	U. S. EPA (2000, noviembre)
Coliformes fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015 (2015)

3. Resultados

Parámetros fisicoquímicos en lixiviados del sitio no controlado

Los resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 3. Resultados de los parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Unidad	R1	R2	R3	Media	Rango
pH	UpH	7.8	7.8	7.8	7.8	0
Temperatura	°C	28	28	28	28	0
Materia flotante	**	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	-
DBO	mg L ⁻¹	24.965	27.541	26.694	26.4	±13.62
DQO	mg L ⁻¹	1 425.680	1 431.520	1 442.952	0	±7.1734
Grasas y aceites	mg L ⁻¹	5.500	5.600	5.529	5.543	±0.0420

Fosforo	mg L ⁻¹	16.598	18.564	16.105	17.089	±1.0622
Nitrógeno total	mg L ⁻¹	152.759	152.759	152.759	152.759	-
Sólidos suspendidos totales	mg L ⁻¹	33.569	36.127	35.304	35.0	±1.0662
Sólidos sedimentables	mg L ⁻¹	0.5	0.5	0.5	0.5	-

De acuerdo con las medias de los resultados se comparó si los parámetros se encuentran dentro de los límites nacionales respecto a las normativas mexicanas estipuladas en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (1996), la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales para garantizar la protección de la vida acuática y la calidad del suelo agrícola y en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (1997), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público ya que el sitio de disposición final se encuentra ubicado cerca de las zonas agrícolas, por lo que puede darse un contacto humano indirecto. Esta norma contempla los parámetros mínimos para este caso. Al mismo tiempo se analizaron los resultados con los límites permisibles establecidos en la norma internacional U.S. EPA (2022) para garantizar la vida acuática. Es importante mencionar que los lixiviados se pueden escurrir y llegar al río Alseeca, y poner en riesgo la biota, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Límites máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Unidad	Resultado medio	LMP vida acuática	LMP suelo agrícola	LMP contacto indirecto	LMP U.S. EPA
pH	UpH	7.8	5-10	5-10	5-10	5-10
Temperatura	°C	28	40	40	N. A.	40
Materia flotante	**	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
DBO	mg L ⁻¹	26.4	30	30	N. A.	30
DQO	mg L ⁻¹	1 433.384	-	-	-	-
Grasas y aceites	mg L ⁻¹	5.543	15	15	15	15
Fósforo	mg L ⁻¹	17.089	5	5	N. A.	20
Nitrógeno total	mg L ⁻¹	152.759	15	15	N. A.	40
Sólidos suspendidos totales	mg L ⁻¹	35.0	40	40	N. A.	30
Sólidos sedimentables	mg L ⁻¹	0.5	1	1	N. A.	1

Nota: LMP (límite máximo permisible)

En la tabla 4, los parámetros de pH, temperatura, materia flotante, DBO y grasas y aceites cumplen con las normativas nacionales (NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996) e internacionales (U. S. EPA, 2022). El parámetro de fósforo total no cumple con los límites para garantizar la vida acuática de acuerdo con la normativa mexicana; sin embargo, para suelo agrícola y contacto indirecto no está incluido. En cuanto a la U.S. EPA, dependiendo del sitio y la capacidad de clorofila nos indica es la adecuada. Respecto al nitrógeno total, este cumple con el límite de suelo

agrícola; no obstante, no garantiza la vida acuática ni la salud de los seres humanos y, al igual que el fósforo total la U.S. EPA maneja que dependiendo de la cantidad de clorofila se podría determinar si la cantidad del nitrógeno es óptimo. El factor de sólidos suspendidos totales cumple con la norma mexicana para la vida acuática y suelos agrícolas, sin embargo, no garantiza la salud del ser humano incumple con la norma internacional. Por último, los sólidos sedimentables cumplen con las normativas mexicanas e internacionales. La DQO no es contemplada en ninguna de las normativas mencionadas.

Parámetros metales pesados en lixiviados del sitio no controlado

Respecto a los metales pesados se obtuvieron los siguientes resultados por triplicado (tabla 5):

Tabla 5. Resultados de los parámetros metales pesados

Parámetro	Unidad	R1	R2	R3	Media	Rango
Arsénico	mg L ⁻¹	0.134	0.135	0.131	0.133	±0.0017
Mercurio	mg L ⁻¹	0.006	0.006	0.006	0.006	0
Cadmio	mg L ⁻¹	0.0033	0.0028	0.0029	0.003	±0.0002
Cobre	mg L ⁻¹	0.0561	0.0534	0.0465	0.052	±0.0040
Cromo	mg L ⁻¹	0.0731	0.0721	0.0741	0.0731	±0.0008
Níquel	mg L ⁻¹	0.0519	0.0532	0.0521	0.0524	±0.0006
Plomo	mg L ⁻¹	0.005	0.005	0.005	0.005	0
Zinc	mg L ⁻¹	0.0654	0.0627	0.0663	0.0648	±2.5710
Cianuro	mg L ⁻¹	0.0200	0.0185	0.0215	0.0200	±0.0012

A continuación, se presentan los límites máximos permisibles con base en las normas mencionadas:

Tabla 6. Límites máximos permisibles de los parámetros metales pesados

Parámetro	Unidad	Resultado medio	LMP vida acuática	LMP suelo agrícola	LMP contacto indirecto	LMP U.S. EPA
Arsénico	mg L ⁻¹	0.133	0.005	0.005	0.01	0.15
Mercurio	mg L ⁻¹	0.006	0.1	0.05	0.02	0.00077
Cadmio	mg L ⁻¹	0.003	4	4	4	0.00072
Cobre	mg L ⁻¹	0.052	0.5	0.5	1	0.5
Cromo	mg L ⁻¹	0.0731	2	4	2	0.0110
Níquel	mg L ⁻¹	0.0524	0.02	5	0.5	0.0520
Plomo	mg L ⁻¹	0.005	10	10	10	0.0025
Zinc	mg L ⁻¹	0.0648	0.005	0.005	0.01	0.12
Cianuro	mg L ⁻¹	0.0200	1	2.0000	1.0000	0.0052

Nota: LMP (límite máximo permisible)

De los resultados de medias en metales pesados se establece lo siguiente:

1. Los resultados de los metales pesados cianuro y zinc cumplen con las normas nacionales e internacionales, por lo tanto, garantizan la vida acuática, el contacto indirecto con el ser humano y suelo agrícola
2. Los resultados de los metales mercurio, cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo a pesar de cumplir con la normativa nacional, no cumple con la U.S. EPA, por lo que no garantizan la vida acuática dentro de los estándares internacionales.

Parámetro coliformes fecales

Se llevo a cabo la experimentación para determinar el número más probable (NMP) y se obtuvo el siguiente resultado (tabla 7):

Tabla 7. Resultados coliformes fecales

Parámetro	Unidad	R1	R2	R3	Media	Rango
Coliformes fecales	NMP 100 mL ⁻¹	>2 400	>2 400	>2 400	>2 400	N. A.

Respecto a la normativa nacional e internacional en la tabla 8, se observa que la cantidad de coliformes fecales no cumple con ninguna de las normativas lo cual representa un riesgo para la salud por la propagación de enfermedades infecciosas, en especial para quienes realizan actividades en el río (Cortés-Lara, 2003).

Tabla 8. Límites máximos permisibles para coliformes fecales

Parámetro	Unidad	Resultado medio	LMP vida acuática	LMP suelo agrícola	LMP contacto indirecto	LMP U.S. EPA
Coliformes totales	NMP 100 mL ⁻¹	>2 400	2 000	2 000	1 000	200

Nota: LMP (límite máximo permisible)

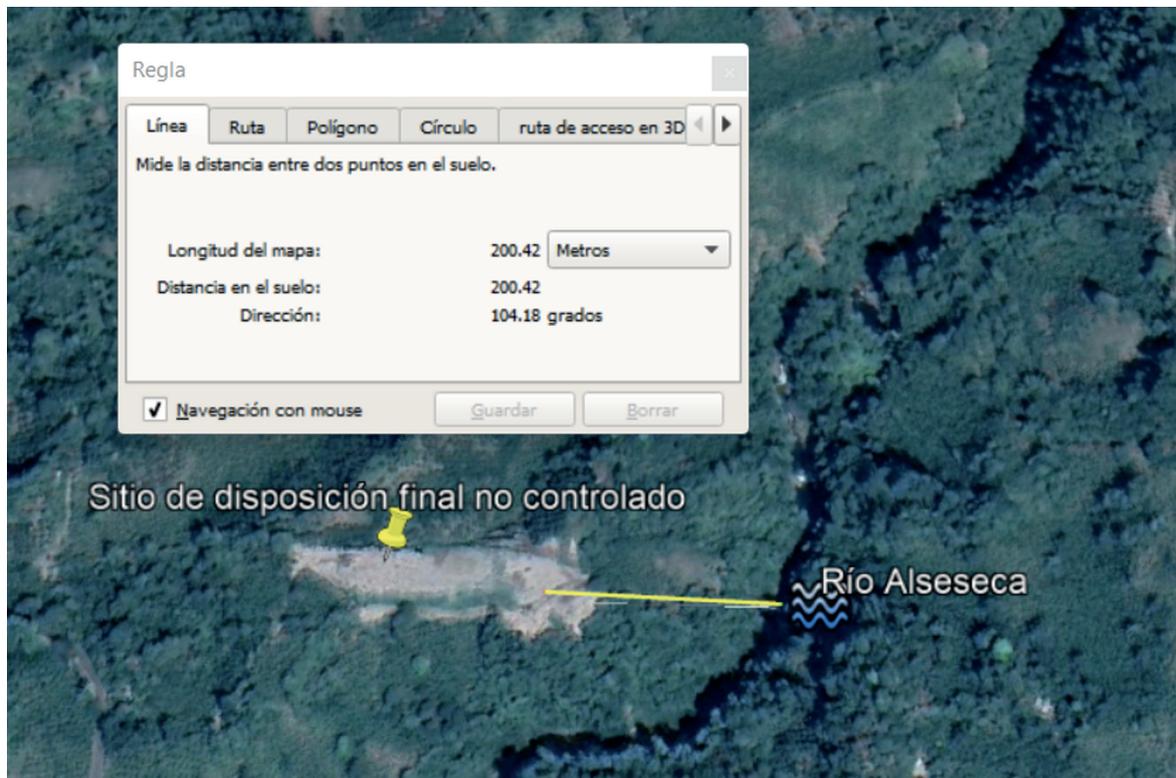
4. Discusión

Respecto a la ubicación del sitio López-Ramírez et al. (2020) menciona criterios adaptados a partir de una matriz de Leopold modificada, mediante la cual se evalúan parámetros de bienestar, salud, ambiente y salud para la ubicación del sitio. Además, estos parámetros se encuentran apegados a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (2004), que indica las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

El sitio de disposición final no controlado incumple con las especificaciones tales como el acondicionamiento del sitio, lo cual se puede corroborar por la nula preparación, distancia agrícola de 50 m (figura 1 y 3). Así mismo, en la figura 4 se puede ver que se encuentra rodeado de zona agrícola, por lo cual incumplen también con este requisito y distancia a cuerpos de agua mayores a 300 m, además de que el sitio se encuentra a 200 m del río Alseseca. Estos factores

son importantes para tomar decisiones, pues es posible que se presente un impacto ambiental en la zona que ocasione degradación de los suelos y contaminación del río.

Figura 4. Distancia en relación con el río Alseseca



De acuerdo con la caracterización de los parámetros fisicoquímicos analizados durante esta investigación, lixiviados producidos en el sitio no controlado son del tipo maduro o envejecido. Estos datos también fueron reportados por Méndez et al. (2004), Ntampou et al. (2006), Nájera et al. (2009, septiembre 24-25) y Ubaldo-Vázquez et al. (2014). Los autores obtuvieron índices de biodegradabilidad (DQO/DBO) menores a 0.28, es decir, 15 veces mayor al obtenido en este trabajo (DQO/DBO=0.018) lo cual indica que deben emplearse procesos químicos como tratamientos para aumentar dicho valor y poder facilitar un postratamiento biológico como el uso de humedales artificiales o biorremediación.

Conforme a los metales pesados, se obtuvieron resultados por debajo de las normas mexicanas y similares a los obtenidos por Susunaga Miranda et al. (2021) en el relleno controlado de Veracruz, lo cual quiere decir que, a pesar de encontrarse en disminución por ser un lixiviado del tipo maduro, el impacto ambiental puede llegar a los bienes nacionales cercanos. Los autores proponen dar un tratamiento de barreras sílicas, las cuales retienen los metales pesados y evitan su migración. Con respecto a este estudio, no existen obras de ingeniería, y la migración de lixiviados es paulatina. Además, el sitio de estudio se encuentra ubicado en zonas agrícolas y cerca de un bien nacional hídrico, por lo tanto, incumple con la distancia mínima requerida.

En cuanto a los coliformes fecales, estos incumplen las normativas y ponen en riesgo la vida acuática, la zona agrícola y la salud humana. Así mismo, Mora Molina y Calvo Brenes (2010) y Molina-Bolívar y Jiménez-Pitre (2017), establecen que los líquidos con presencia de una alta

cantidad de coliformes fecales (superior a 1 000 NMP 100 mL⁻¹) son indicadores de contaminación, cuyo contenido puede inhabilitar el uso de los ríos, como en este caso, donde el sitio está ubicado a 200 m del río Alseseca y causar enfermedades de origen hídrico.

5. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados de la caracterización de los lixiviados producidos en el sitio de disposición final no controlado, y comparado con el resultado de diversos autores, se concluye que el sitio de disposición del municipio de Tlapacoyan se encuentra en fase de envejecimiento o maduración, porque las concentraciones de los contaminantes están dentro de los parámetros establecidos por Tchobanoglous et al. (1994).

En cuanto al cumplimiento de las normativas, se pudo constatar que se cumplen en su mayoría con las normas oficiales mexicanas; sin embargo, al compararlas con la norma U.S. EPA para la protección de la vida acuática, dicho lixiviado está por encima de los límites máximos permisibles, lo cual pone en riesgo por escorrentía al río Alseseca, debido a que se ubica a 200 m de distancia del sitio. Las normas oficiales mexicanas de especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial establecen que la distancia mínima requerida para este tipo de cuerpos de agua es de 500 m, por lo que se debe hacer obras de ingeniería para impedir que los componentes tóxicos migren y causen un impacto.

Como recomendación se proponen métodos de remediación químicos como los procesos de oxidación avanzada, la electrodiálisis o la oxidación Fenton, debido a que el índice de biodegradabilidad (DBO/DQO) es menor a 0.28, porque los métodos típicos o uso de humedales no son recomendados para los lixiviados del tipo maduro como tratamiento principal. En adición, se recomienda la clausura inmediata del sitio porque no cumple con las características mínimas para ser un sitio de disposición final, por poner en riesgo el ambiente y la salud de la población.

Referencias

- Cortés-Lara, M. C. (2003). Importancia de los coliformes fecales como indicadores de contaminación en la franja litoral de Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit. *Rev. Biomed*, (14), 121-123. <https://acortar.link/JsPfp9>
- El-Fadel, M., Bou-Zeid, E., Chahine, W., & Alayli, B. (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management*, 22(3), 269–282. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00040-X)
- López Ramírez, M. A. (2018). *Diseño de un sistema teórico-experimental de tratamiento de lixiviados del basurero de Veracruz* [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Boca del Río]. <https://acortar.link/Fwo92A>
- López-Ramírez, M. A., Aguilar-Rodríguez, M. R., & Argüelles-López, C. (2020). Evaluación del sitio de disposición final de residuos sólidos en Martínez de la Torre, Veracruz. *RINDERESU*, 5(1), 179–189. <https://bit.ly/3u00r1a>
- Méndez Novelo, R., Castillo Borges, E., Sauri Riancho, M., Quintal Franco, C., Giacomani Vallejos, G., & Jiménez Mejía, B. (2004). Tratamiento físicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería: Revista Académica*, 8(2), 155–163. <https://acortar.link/GD0jqqa>

- Molina-Bolívar, G., & Jiménez-Pitre, I. (2017). Análisis de la contaminación por coliformes termotolerantes en el estuario del río Ranchería, La Guajira (Colombia). *Boletín Científico: Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 21(2), 41–50. <https://bit.ly/34PhwCu>
- Mora Molina, J., & Calvo Brenes, G. (2010). Estado actual de contaminación con coliformes fecales de los cuerpos de agua de la península de Osa. *Tecnología en Marcha*, 23(5), 34–40. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835746>
- Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., & Rojas-Valencia, M. (2009, septiembre 24–25). Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental, II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. <https://acortar.link/T9dqpg>
- Norma mexicana NMX-AA-003-1980: Aguas residuales.- Muestreo. (1980). <https://acortar.link/lqGrrF>
- Norma oficial mexicana: NOM-001-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. (1997). <https://acortar.link/PSaW2S>
- Norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. (1998). <https://acortar.link/PSaW2S>
- Norma mexicana NMX-AA-058-SCFI-2001: Análisis de aguas - Determinación de cianuros totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-058-SCFI-1982). (2001). <https://acortar.link/yVhjML>
- Norma mexicana NMX-AA-006-SCFI-2010: Análisis de agua - Determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-006-SCFI-2000). (2010). <https://acortar.link/EdCcF5>
- Norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003: Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. (2004). <https://acortar.link/4qcvhF>
- Norma mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011: Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - parte 2 - Determinación del índice de la demanda química de oxígeno - Método de tubo sellado a pequeña escala. (2012). <https://acortar.link/ZvUrmK>
- Norma mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-004-SCFI-2000). (2013). <https://acortar.link/OEoJfP>
- Norma mexicana NMX-AA-005-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-005-SCFI-2000). (2014). <https://bit.ly/3MYm8aF>
- Norma mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-007-SCFI-2000). (2014). <https://acortar.link/nZYFq0>
- Norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015: Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001). (2015). <https://acortar.link/9dsVvX>
- Norma mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015: Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* - Método del número más probable en tubos múltiples (Cancela a la NMX-AA-42-SCFI-1987). (2015). <https://acortar.link/pnJ3Yk>

- Norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016: Análisis de agua.- Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- Método de prueba- (Cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2011). (2016). <https://acortar.link/uqMMfj>
- Norma mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016: Análisis de agua.- Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-051-SCFI-2001). (2017). <https://acortar.link/JHmUm7>
- NMX-AA-028-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-028-1981). (2001). <https://acortar.link/RZr4K1>
- Ntampou, X., Zouboulis, A., & Samaras, P. (2006). Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. *Chemosphere*, 62(5), 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.067>
- Sáez, A., Urdaneta G., & Joheni, A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Revista Omnia*, 20(3), 121–135. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009>
- Salazar Trujillo, A. (2016). *Comportamiento y localización del lixiviado de la celda 1 del basurero municipal de Chihuahua en el acuífero Tabalaopa-Aldama, mediante métodos geofísicos*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua]. Repositorio Informático Institucional. <https://acortar.link/7RjE9I>
- Susunaga Miranda, M. A., Estévez Garrido, B. M., Ortiz Muñoz, B., & Susunaga Estévez, R. M. (2021). Removal of heavy metals (Cr+6, Ni, Zn) from leachates of the sanitary landfill of the city of Veracruz, Mexico with reactive permeable silica sand barriers. *Enfoque UTE*, 12(3), 65–78. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.756>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Integrated solid waste management, engineering principles and management issues*. McGraw Hill.
- Ubaldo-Vázquez, E. C., Nájera-Aguilar, H. A., & Gutiérrez-Hernández, R. F. (2014). Evaluación de la remoción de carga orgánica en lixiviados maduros mediante un sistema acoplado: Coagulación-floculación-oxidación anódica. *Revista AIDIS*, 7(2), 170–178.
- U. S. Environmental Protection Agency. (1993, agosto). *Method 365.1, Revisión 2.0: Determination of phosphorus by semi-automated colorimetry*. <https://acortar.link/yGi4IB>
- U. S. Environmental Protection Agency. (2000, noviembre). *Method 6010C (SW-846): Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry*. <https://acortar.link/y1h1bg>
- U. S. Environmental Protection Agency. (2022). *National recommended water quality criteria - Aquatic life criteria table*. Recuperado el 20 enero 2022 de <https://acortar.link/MDlx5o>
- Vian-Pérez, J., Velasco-Pérez, A., & García-Herrera, T. Residuos sólidos urbanos: Una problemática ambiental y oportunidad energética. *CIENCIAUANL*, (22)97, <https://acortar.link/PTjhp9>