

Lixiviados de desechos municipales y contaminación acuífera. El caso de Mérida, México

Chorume de resíduos urbanos e poluição da água. O caso de Mérida, México

Municipal waste disposal sites, source of leachate contamination. The Merida, Mexico, case

Roger González-Herrera¹, Ana M. Escalante-Mañe², Mirna López-Pacheco, Roger Méndez-Novelo²

¹ Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Coordinación Académica de Hidráulica e Hidrología. Trablaje Catastral. Mérida.

² Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Avenida Industrias no Contaminantes por Periférico Norte. Tablaje Catastral. Mérida.

Cita: González-Herrera R, Escalante-Mañe AM, López-Pacheco M, Méndez-Novelo R. Lixiviados de desechos municipales y contaminación acuífera. El caso de Mérida, México. Rev. Salud ambient. 2025; 25(2):125-138.

Recibido: 20 de junio de 2025. **Aceptado:** 12 de noviembre de 2025. **Publicado:** 15 de diciembre de 2025.

Autor para correspondencia: Roger González-Herrera.
Correo e: roger.gonzalez@correo.uady.mx

Financiación: Ninguna relación financiera, personal o profesional ha influido en el contenido, resultados o conclusiones del trabajo presentado.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés relacionado con la preparación, revisión o publicación del presente artículo.

Declaraciones de autoría: RGH: conceptualización del proyecto; dirección y supervisión del estudio; preparación, revisión y edición del manuscrito; AMES: planteamiento y desarrollo de la idea; búsqueda bibliográfica; revisión del contenido; elaboración del borrador inicial; MLP: revisión y edición del contenido; investigación bibliográfica; RIMN: dirección y supervisión del estudio; revisión y edición del manuscrito.

Resumen

El acelerado crecimiento demográfico y los cambios en los hábitos de consumo de la población han incrementado la cantidad de desechos municipales que son recolectados y depositados en sitios de disposición final sin ningún tipo de tratamiento o selección de la fracción sólida. Como resultado de esta inadecuada gestión de residuos se favorece la generación de emisiones nocivas al ambiente, entre las que se encuentran los lixiviados, los cuales son líquidos tóxicos resultantes de la liberación de humedad proveniente de la descomposición de la fracción orgánica de los desechos y la percolación del agua de las precipitaciones pluviales a través de ellos que disuelven y arrastran contaminantes. Aunque la composición de los lixiviados depende de diferentes factores, en general se caracterizan por contener materia orgánica disuelta, metales pesados, macrocomponentes inorgánicos y compuestos orgánicos xenobióticos. Estos lixiviados han sido identificados como fuentes potenciales de contaminación de aguas subterráneas, ya que pueden infiltrarse a través del suelo y subsuelo causando la contaminación de extensas áreas del acuífero subyacente.

En este trabajo, se presenta una revisión de los contaminantes presentes en la composición de los lixiviados generados por desechos municipales, ejemplificando la contaminación del agua subterránea considerando la situación de la ciudad de Mérida, Yucatán, México, como caso de estudio. Se realiza una revisión de los procesos de migración y atenuación de los contaminantes en el acuífero, finalizando con propuestas y recomendaciones para la realización de análisis de riesgo por fuga de lixiviado de sitios de disposición de residuos sólidos municipales.

Palabras clave: agua subterránea; gestión de residuos sólidos municipales; contaminación de acuíferos; sitios de disposición final; impacto ambiental; lixiviado.

Resumo

O rápido crescimento populacional e as mudanças nos hábitos de consumo aumentaram a quantidade de resíduos urbanos coletados e depositados em aterros sanitários sem qualquer tratamento ou triagem de resíduos sólidos. Como resultado dessa gestão inadequada de resíduos, são geradas emissões nocivas ao meio ambiente, incluindo chorume. Estes são líquidos tóxicos

resultantes da liberação de umidade da decomposição da fração orgânica dos resíduos e da percolação da água da chuva através deles, dissolvendo e carreando poluentes. Embora a composição dos chorume dependa de vários fatores, eles são geralmente caracterizados por matéria orgânica dissolvida, metais pesados, macrocomponentes inorgânicos e compostos orgânicos xenobióticos. Esses chorume têm sido identificados como potenciais fontes de contaminação de águas subterrâneas, pois podem infiltrar-se pelo solo e subsolo, contaminando grandes áreas do aquífero subjacente.

Este artigo apresenta uma revisão dos contaminantes presentes na composição do chorume gerado por resíduos urbanos, utilizando a contaminação de águas subterrâneas como exemplo, considerando a situação da cidade de Mérida, Yucatán, México, como estudo de caso. É realizada uma revisão dos processos de migração e atenuação de contaminantes no aquífero, concluindo com propostas e recomendações para a realização de análises de risco de vazamento de chorume em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

Palavras-chave: águas subterrâneas; gestão de resíduos sólidos urbanos; contaminação de aquíferos; locais de disposição final; impacto ambiental; chorume.

Abstract

The accelerated demographic growth and changes in the population's consumption habits have increased the amount of municipal waste that is collected and deposited in final disposal sites without any type of treatment or selection of the solid fraction. As a result of this inadequate waste management, the generation of harmful emissions into the environment is favored, among which are leachates, which are toxic liquids resulting from the release of moisture from the organic fraction decomposition of the waste and the percolation of water from rainfall through them that dissolves and carries contaminants. Although the composition of leachate depends on different factors, in general they are characterized by containing dissolved organic matter, heavy metals, inorganic macro components and xenobiotic organic compounds. These leachates have been identified as potential sources of groundwater contamination, as they can infiltrate through the soil and subsoil causing contamination of extensive areas of the underlying aquifer.

In this work, a review of the contaminants in the composition of leachates, generated by municipal waste, is presented, exemplifying groundwater contamination considering the situation of the city of Mérida, Yucatán, Mexico, as a case study. A review of the migration and attenuation processes of contaminants in the aquifer is carried out, ending with proposals and recommendations for carrying out risk analysis due to leachate leakage from municipal solid waste disposal sites.

Keywords: groundwater; municipal solid waste management; aquifer contamination; final disposal sites; environmental impact; leachate.

INTRODUCCIÓN

Los procesos productivos y de consumo originan la extracción de recursos de la naturaleza y la generación de diferentes tipos de desechos que poseen propiedades físicas y químicas muy heterogéneas; estos desechos reflejan la utilización imperfecta de los recursos naturales e implican su agotamiento y contaminación más allá de los límites del crecimiento^{1,2}. El crecimiento poblacional ($\approx 7,8$ miles de millones de personas en el mundo)³ y económico, la urbanización, la industrialización y los cambios en los hábitos de consumo de la sociedad actual han incrementado la generación de residuos que deterioran la calidad del ambiente, así como la salud de los organismos vivos⁴⁻⁷.

Un residuo se define como aquel material producido por actividades antrópicas, que no tiene utilidad ni valor económico para el propietario o poseedor, por lo que es desechado⁸; los residuos sólidos que son gestionados por los municipios como un servicio público

son considerados como residuos sólidos municipales (RSM)⁹. Las fuentes de generación de los RSM pueden ser diversas como: residencial (casa habitación), comercial (oficinas, restaurantes, tiendas), institucional (hospitales, universidades, escuelas), industrial (área administrativa de fábricas y residuos no peligrosos) y área pública (calles, parques). La generación de residuos está asociada con el nivel económico de la sociedad¹⁰.

De continuar las tendencias actuales de generación de residuos sólidos, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) prevé que, con base en las proyecciones de crecimiento poblacional y los patrones de consumo actuales, para el 2050 la generación total mundial de RSM pasará de los 2 126 millones de toneladas que habían en 2020 a 3 782 millones de toneladas¹¹ (figura 1) lo cual es una problemática de magnitudes inmensas que impactará de manera prioritaria a los países en desarrollo que no cuentan con los recursos materiales, económicos y humanos para su gestión¹²⁻¹⁴.

Figura 1. Proyecciones de la generación de residuos sólidos municipales a escala global para los años 2030, 2040 y 2050, si no se toman acciones de urgencia (modificado de UNEP, 2024)

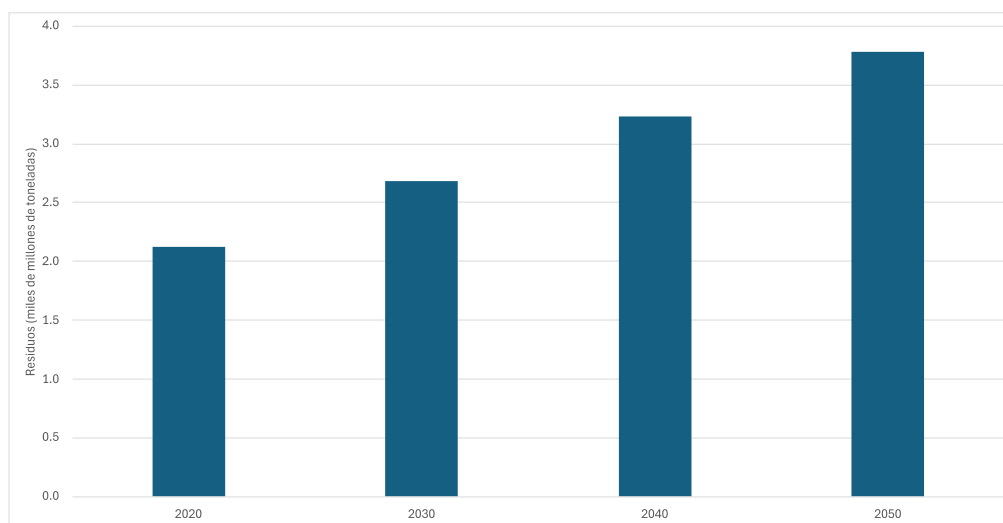
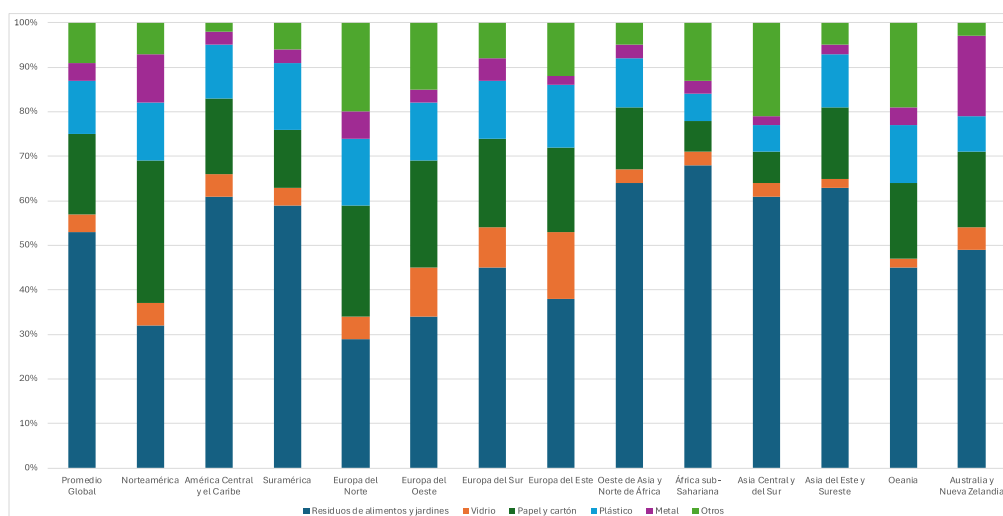


Figura 2. Composición de los residuos sólidos municipales a escala global y regional. "Otros" incluye artículos como textiles, madera, cuero y productos domésticos y de higiene personal (modificado de UNEP, 2024)



A escala mundial se estima que la generación de residuos sólidos municipales (RSM) excede los dos mil millones de toneladas al año. En los países o regiones con la mayor producción hay una baja generación de residuos per cápita. En promedio, en los países desarrollados se generan de 521,95 a 759,2 kg/hab/año y en los países en vías de desarrollo entre 109,5 y 525,6 kg/hab/año¹¹. Más de la mitad de estos residuos se compone de materia orgánica pero la composición varía según el nivel de los ingresos del país, así como otros factores culturales y de consumo (figura 2). Se han realizado proyecciones de los cambios de composición de los RSM y no se esperan grandes cambios en los patrones actuales¹⁴.

1. SITIOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS

El destino final de los residuos sólidos urbanos en la mayoría de los países en desarrollo son los tiraderos a cielo abierto, incineración y rellenos sanitarios frecuentemente manejados o diseñados de forma incorrecta o que han llegado a su capacidad máxima¹⁵⁻²⁰.

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería para la disposición de residuos sólidos que utiliza un diseño tecnológico para controlar y minimizar los impactos potenciales al medio ambiente. Normalmente se encuentra al nivel de suelo o contenido en lugares

excavados previa cuidadosa selección, diseño y preparación del sitio más adecuado para ubicarlo²¹⁻²³. La idea del relleno sanitario es confinar el residuo, reducirlo a su menor volumen posible y cubrirlo con suelo compactado para evitar insectos, malos olores, ratas; y evitar la percolación al agua subterránea^{24,25}. Con este propósito, en el relleno sanitario se incorporan medidas de protección al ambiente, incluido un revestimiento inferior y una cubierta superior de superficie, así como un sistema de recolección de lixiviados y gases^{26, 27}. Por sus ventajas, como su capacidad de manejar altos volúmenes de residuos, baja inversión inicial y requisitos técnicos mínimos, el relleno sanitario es muy popular en los países desarrollados²⁸; no obstante, las diversas ventajas que tienen, su operación es un factor crítico para la sostenibilidad ambiental²⁹. Según Iravanian y Ravari⁴, el mayor desafío de los rellenos sanitarios son los lixiviados.

Los lixiviados captados son transportados a los depósitos de almacenamiento desde donde se bombean hacia las instalaciones para su tratamiento³⁰. El método para manejar el lixiviado determinará el riesgo asociado con la contaminación del acuífero subyacente. Algunas alternativas de manejo son: la descarga a un sistema de tratamiento de aguas residuales fuera del sitio, la evaporación natural o inducida, la recirculación y el tratamiento en el terreno³¹. Debido a que la cantidad generada es una función directa de la cantidad de agua externa que entra al sitio de disposición, es importante prevenir y controlar las fugas ya que en época de lluvias y/o fenómenos meteorológicos extremos existe el riesgo de desbordamiento si se rebasa la capacidad de las lagunas de evaporación del sitio³². Asimismo, si no se realiza una correcta cubierta e impermeabilización de las celdas existe también el riesgo de escape de lixiviados³⁰. Cabe señalar que el riesgo de contaminación por

infiltración existe incluso en los sitios que cuentan con geomembranas protectoras puesto que eventualmente estas pueden presentar fallas³³⁻³⁸.

Finalmente, la aplicación de tratamientos adicionales para la descontaminación de los lixiviados hasta alcanzar estándares de calidad química y biológica suficientes que permitan su descarga segura al medio ambiente es necesaria y altamente deseable^{39, 40}.

2. LIXIVIADOS

Un lixiviado se define como el líquido que se genera por el contenido de humedad de los residuos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en fase de descomposición facilitando la transferencia de contaminantes de la fase sólida a la líquida y convirtiéndose en efluentes líquidos con alta carga contaminante⁴¹. La apariencia física de los lixiviados de un sitio de relleno sanitario típico es de color café o negruzco y el olor es penetrante y ofensivo³¹; son una fuente importante de contaminación³⁰ para los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos (figura 3) causando afectaciones a la salud a través de la cadena alimentaria, incluyendo a los humanos⁴².

Los lixiviados se componen de una miríada de contaminantes; sin embargo, a pesar de su heterogeneidad, tienen la misma composición química básica caracterizada por cuatro grupos: materia orgánica disuelta (p. ej., aminoácidos, ácidos grasos volátiles, ácidos hidrofílicos, y compuestos más refractarios como ácidos fúlvicos y húmicos), metales pesados (p. ej., Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+}), macro componentes

Figura 3. Migración del lixiviado generado en un sitio de disposición de residuos, contaminando los cuerpos de agua y la cadena alimenticia (modificado de Wijekoon et al., 2022)



inorgánicos (p. ej., Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} y Cl^-), y compuestos orgánicos xenobióticos (p. ej., hidrocarburos aromáticos, benceno, tolueno, fenoles, alifáticos clorados y ftalatos)^{43,44}. Recientemente, sustancias químicas predominantemente no reguladas han llamado la atención como contaminantes emergentes los cuales han sido identificados en los lixiviados de sitios de disposición de residuos (p. ej., microplásticos, nanomateriales diseñados, farmacéuticos, químicos industriales y agroquímicos)⁴⁵⁻⁴⁸.

La composición del lixiviado es altamente variable debido a que depende de diversos factores como los cambios climáticos estacionales, el volumen de precipitación e infiltración, el tipo y composición del residuo dispuesto, la solubilidad de los contaminantes, el grado de descomposición de los residuos, la cubierta vegetal, el pretratamiento, el nivel de compactación de

los residuos y la edad del relleno⁴⁸⁻⁵¹. Esta última es un factor determinante en la composición del lixiviado ya que su calidad cambia al pasar por las diferentes fases de estabilización (p. ej., etapa aerobia, ácida anaerobia, metanogénica y estabilización)^{44,52,53}; el contenido de contaminantes es usualmente mayor en los lixiviados recién formados y disminuye con el paso del tiempo^{54,55}. Los lixiviados de menos de 5 años se consideran jóvenes, mientras que los que exceden los 10 años se consideran maduros. Los lixiviados que provienen de celdas entre 5 y 10 años se consideran intermedios⁴¹. Como se puede observar en la tabla 1, los parámetros físicoquímicos que se utilizan comúnmente para caracterizar la calidad del lixiviado cambian significativamente conforme aumenta la edad⁴⁴. Por ejemplo, en los lixiviados maduros los metales pesados disminuyen por el aumento del pH mientras que la materia orgánica fácilmente biodegradable se reduce y el nitrógeno amoniacal aumenta⁵⁴.

Tabla 1. Clasificación del lixiviado, de acuerdo con la edad de un sitio de disposición de residuos

Parámetro	Unidad	Edad		
		Joven (< 5 años)	Intermedio (5 - 10 años)	Maduro (> 10 años)
pH		< 6,5	6,5 - 7,5	> 7.5
DQO	mg/L	>10 000	4 000 - 10 000	< 4 000
DBO ₅ /DQO		0,5 - 1,0	0,1 - 0,5	< 0,1
Compuestos orgánicos		80 % AGV	5 - 30 % AGV + AGH AGH	AGH
NH ₃ -N	mg/L	< 400	ND	> 400
COT/DQO		< 0.3	0,3 - 0,5	> 0.5
Nitrógeno Kjeldahl	g/L	0,1 - 0,2	ND	ND
Metales pesados	mg/L	Bajo a medio	Bajo	Bajo
Biodegradabilidad		Importante	Medio	Bajo

AGV: ácidos grasos volátiles; AGH: ácidos húmicos y fúlvicos; ND: No disponible.

Fuente: Aziz y Ramli, 2018.

2.1 Toxicidad del lixiviado

Se han hallado cerca de 1 000 químicos orgánicos en aguas subterráneas contaminadas por lixiviados de los sitios de disposición final de desechos, como resultado de la migración y transporte de estos. Más de 200 compuestos orgánicos han sido identificados como frecuentes y pueden ser considerados como contaminantes de agua subterránea con casi 35 compuestos con potencial de causar daño al ambiente y la salud del ser humano³¹. La evaluación de riesgos de los lixiviados de sitios de disposición de residuos se basa tradicionalmente en la evaluación de sustancias químicas mediante análisis químico. Aunque el enfoque es importante, presenta algunas limitaciones como el hecho de que algunos

contaminantes químicos presentes en los lixiviados están debajo de los límites de detección del análisis químico⁵⁶; a pesar de ello, estas bajas concentraciones no eliminan la amenaza ambiental que estos representan ya que muchas sustancias que puede asumirse que son peligrosas lo son aún en pequeñas cantidades y frecuentemente tienen efectos negativos causados por sus múltiples interacciones antagónicas, sinérgicas y aditivas en los organismos vivos⁵⁷. Además, estas técnicas químicas no permiten predecir los efectos de los contaminantes en los ecosistemas receptores y pueden ser prohibitivamente costosas⁵⁸. Estudios toxicológicos de las respuestas de organismos biológicos modelos expuestos a los efectos de sustancias tóxicas puede proporcionar información importante que complementa

los análisis químicos estándar. A diferencia del análisis químico, la prueba biológica de toxicidad puede incluir efectos biológicos de todos los compuestos presentes, así como su disponibilidad biológica³².

3. OBJETIVO

Analizar los principales contaminantes presentes en los lixiviados generados por residuos sólidos municipales, tomando como caso de estudio la ciudad de Mérida, Yucatán, México, con el fin de comprender su impacto en la contaminación del agua subterránea. Se examinan los procesos de migración y atenuación de estos contaminantes en el acuífero para, con base en ello, recomendar acciones para proponer lineamientos para la evaluación de riesgos asociados a posibles fugas de lixiviados en sitios de disposición final.

MATERIAL Y MÉTODOS

En México, según datos presentados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se generaron alrededor de 44 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU), lo que equivale a cerca de 120 128 mil toneladas diarias⁵⁹. Se estima que el promedio nacional de generación de residuos sólidos urbanos es de 0,944 kg/hab/día; de la cantidad de RSU que es enviada a disposición final, el 40,21 % es dispuesta en sitios que cumplen todas las características básicas de infraestructura y de operación consideradas en la Cédula de Recolección de Datos del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales, el 4,28 % se depositan en sitios de disposición final que no cumplen ninguna de las características señaladas en el censo citado⁶⁰.

La forma de manejo de lixiviados que se aplica comúnmente en los sitios de disposición final de residuos de México y en Latinoamérica es la evaporación natural por radiación solar mediante la utilización de estanques o lagunas de evaporación; estos pueden rebasar su capacidad, principalmente en épocas de lluvias, incrementando la posibilidad de contaminación de suelos y acuíferos. Estos últimos pueden ser la fuente principal para abastecimiento de agua. Se conoce poco sobre los efectos a la salud debido a la exposición a la mezcla de las sustancias tóxicas presentes en los lixiviados cuando éstas alcanzan los cuerpos de agua. Reconociendo la importancia de medir la toxicidad como un parámetro integrador relevante, recientemente la determinación de la toxicidad aguda ha sido incorporada en la normatividad mexicana para descarga de aguas residuales (NOM-001 SEMARNAT-2021)³⁹. Asimismo, esta normatividad reconoce la importancia del ecosistema cárstico, el cual, por la característica permeable de la roca subyacente y la rápida filtración del líquido a través de ellas, hace que este ecosistema sea muy vulnerable a la contaminación proveniente de las descargas de aguas

residuales y a la contaminación directa de los acuíferos y establece límites máximos de descarga más estrictos.

Con base en lo anterior, se realizó una revisión de la literatura mencionando a los contaminantes presentes en la composición de los lixiviados generados por desechos municipales; asimismo, se llevó a cabo una revisión y análisis de los procesos de migración y atenuación de los contaminantes en el subsuelo, que permitan generar propuestas y recomendaciones para la realización de análisis de riesgo a la contaminación del acuífero subyacente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para propósitos de ejemplificar la situación con datos de campo apropiados, en este trabajo se presenta como caso de estudio la contaminación del agua subterránea de la ciudad de Mérida, Yucatán, México, por lixiviados de desechos sólidos urbanos.

1. SITIOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En la ciudad de Mérida existía un sitio de disposición de basura, superficial, sin control alguno, que afectaba al manto acuífero por la exposición de lixiviados en la superficie, falta de un drenaje controlado de los gases, así como por la presencia de animales y vectores de enfermedades además asentamientos humanos informales en la periferia (figura 4). Este sitio transgredía las normas ambientales y sanitarias mexicanas como la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003⁶¹.

Figura 4. Ex basurero municipal de la ciudad de Mérida



En este contexto y con la finalidad de resolver los graves problemas ambientales y sociales relacionados con el sitio de disposición de residuos no controlado, se licitó en el ámbito nacional un proyecto de relleno sanitario para la localidad comenzando su construcción y puesta en marcha en 1997.

El sitio seleccionado para la construcción del relleno sanitario se ubica aproximadamente a 8 km en dirección oeste del centro de la ciudad de Mérida, fuera del anillo periférico de la ciudad, adyacente a las plantas de composta y separación. Como justificación para la elección del lugar se consideraron los siguientes aspectos: se determinó un área global dentro del municipio para preseleccionar los sitios probables del proyecto; para realizar esto se tomaron en cuenta los diversos factores especificados en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales⁶¹. Dada la uniformidad morfológica en la estructura del subsuelo que existe en toda la superficie del municipio, uno de los principales criterios que se utilizó para la selección del área global fue la dirección del flujo del agua subterránea en el acuífero, así como las distancias de la zona de captación de agua potable y a las áreas naturales protegidas. Por lo tanto, la ubicación seleccionada fue la situada fuera del anillo periférico de la ciudad, al oeste y noroeste del municipio de Mérida. Dentro del área global el sitio elegido mostró ser la mejor opción debido a que los vientos dominantes proceden del este y del sureste, la dirección de flujo de agua subterránea es del sureste al noroeste y cumple con todos los criterios establecidos en la norma ya referida con excepción de las características del subsuelo, ya que el tránsito de infiltración natural es mayor a lo establecido en la normatividad aunque, y de acuerdo a lo que la misma norma permite, se puede garantizar mediante obras de ingeniería que no exista conexión con los acuíferos subterráneos.

Inicialmente, la zona de atención del relleno sanitario de Mérida contó con 700 000 habitantes con una población flotante relativamente alta de 200 000 habitantes. En su primera etapa el sitio tenía una capacidad total de 3 260 000 toneladas. A la fecha, esta primera etapa se encuentra clausurada al haber alcanzado su capacidad máxima, así como haberse cumplido el plazo originalmente estimado para su operación (1997-2012). Se encuentra en operación, aledaña a la primera, una segunda etapa con una capacidad total de 5 069 000 toneladas y cuyo plazo de funcionamiento se prevé para otros 15 años (2012-2027). El relleno sanitario de la ciudad de Mérida es el único sitio oficial y autorizado para la disposición final de los desechos sólidos generados en la ciudad y se ubica en una zona que presenta características geológicas uniformes con predominio de rocas calizas y una morfología tipo planicie. De las 45 ha con que cuenta en su segunda etapa se emplean 28 ha para la disposición de los residuos sólidos con el método de área en pirámide de 30 metros de altura⁶². Además, se utiliza una sucesión de capas de polietileno de alta densidad con la finalidad de impermeabilizar el suelo soporte y evitar la infiltración de lixiviados hacia el manto acuífero. El material filtrante se construyó con capas de 15 cm. de grava para facilitar el drenaje de los lixiviados, los cuales se evacuan mediante

tuberías perforadas de polietileno de 6" de diámetro. Así, los lixiviados procedentes de los once cárcamos de las celdas que conforman el relleno sanitario se transportan a las ocho lagunas de evaporación, las cuales han sido diseñadas con un sistema de triple impermeabilización, para posteriormente permitir la evaporación de los lixiviados y realizar la recirculación de estos en el relleno.

Cabe señalar que, desde su puesta en marcha en 1997, el relleno sanitario de la ciudad de Mérida ha aumentado su volumen de operación de manera sostenida y creciente a través del tiempo con el consecuente aumento del volumen de lixiviados contaminantes que se generan y que necesitan ser tratados para evitar la contaminación del manto freático el cual, por las características hidrogeológicas de la región, es muy vulnerable a la contaminación debido a que el suelo está conformado de rocas calcáreas, lo que da lugar a fracturas y fisuras haciéndolo altamente permeable; el nivel freático del acuífero se encuentra a menos de 8 m de profundidad de la superficie del terreno por lo que una infiltración ocurriría rápidamente hasta alcanzar el acuífero, el cual es la principal fuente de abastecimiento de agua para los habitantes de la ciudad⁶³, con las posibles afectaciones ambientales⁶⁴.

2. EL LIXIVIADO

Con cierta periodicidad, investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán monitorean con fines académicos el lixiviado crudo

Figura 5. Muestreo de lixiviado en el relleno sanitario de Mérida, Yucatán



de lagunas de evaporación del sitio de disposición final de residuos municipales de la ciudad de Mérida, colectando muestras simples de forma manual (figura 5).

Las muestras se conservan en el cuarto frío a una temperatura de 4-8 °C. Se determinan los parámetros más relevantes para caracterizar el lixiviado y se determina el índice de biodegradabilidad (IB). Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.

No existe una separación entre los lixiviados nuevos y los lixiviados viejos que ingresan a las lagunas de evaporación por lo que se mezclan haciendo variar la calidad del lixiviado. Como se puede observar en la tabla 2 al comparar los resultados de distintos muestreos, los valores de los parámetros analizados son semejantes, con ligeras variaciones según el periodo de muestreo⁶⁵⁻⁷¹. Algunas de las diferencias de estos estudios con otros realizados en el relleno sanitario de la ciudad de Mérida se deben a la época en que se realizó el muestreo: en temporada de lluvias, secas o ambos.

Tabla 2. Calidad del lixiviado crudo del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, México

Parámetro (Unidades)	2002	2006	2011	2012	2015	2018
pH (-)	8,4	8,5	8,3	8,3	8,3	8,4
Temperatura (°C)			24,3	24,3	26,9	
Conductividad eléctrica (µS/cm)		21 830	23 100	24 900	13 165	14 407
DBO ₅ (mg/L)	1 652	646	942	342	329	455
DQO (mg/L)	5 764	9 080	10 434	12 680	6 319	8 925
IB (DBO ₅ /DQO)	0,28	0,07	0,09	0,026	0,05	0,05
Sólidos totales, ST (mg/L)	12 812		19 128		10 403	26 368
Sólidos suspendidos totales, SST (mg/L)	73		357	192	24,78	520
NT (mg/L)			2 159	12 312	4 990	1 100
N – NH ₃ (mg/L)	1 481		1 825		1 140,5	648
Alcalinidad, como CaCO ₃ , (mg/L)		6112			9 316	
Color (U – Pt – Co)			13 500	13 287		14 300
COT (mg/L)						2 381
Cromo (µg/L)						1 961
Plomo (µg/L)						74
Cadmio (µg/L)						3
Toxicidad (UT)						15,07 <i>Daphnia</i>

3. EL ACUÍFERO SUBYACENTE

En general, los lixiviados de los sitios de disposición de residuos tienen altas concentraciones de materia orgánica disuelta y macrocomponentes inorgánicos. La concentración de estos componentes se encuentra típicamente de 1 000 a 5 000 veces más alta que las concentraciones del agua subterránea⁷².

Todos los compuestos del lixiviado cuando entran al acuífero se diluyen ya que el lixiviado se mezcla

con el agua subterránea. Por tanto, es indispensable conocer los procesos que gobiernan el flujo de agua en el acuífero. Es importante señalar que la migración del lixiviado debe ser vista en términos de una pluma tridimensional dentro de la estructura geológica, donde los gradientes, permeabilidades y barreras físicas (por el estrato geológico, infiltración, ríos, pozos de extracción, etc.) determinan la posición y velocidad de migración de la pluma. Los gradientes locales del nivel freático debajo y alrededor del sitio de disposición de residuos pueden probablemente variar de los gradientes generales ya que localmente puede existir una hidrogeología

diferente en el área circundante. Este fenómeno fue documentado estacionalmente, en épocas de lluvias y estiaje, en el acuífero cárstico de Yucatán en la zona donde encontraba el basurero municipal y por donde se encuentra actualmente el relleno sanitario de Mérida, Yucatán⁷³. También ha sido observado en forma especial en la primavera y verano en el relleno sanitario Borden, Canadá, cuyo acuífero es de areniscas⁷⁴. El nivel freático en el relleno sanitario de Grindsted, Dinamarca fue monitoreado con 150 piezómetros en ocho ocasiones diferentes, en dos y medio periodos; se observaron cambios estacionales de los gradientes hidráulicos. Los mapas de equipotenciales revelaron una variación estacional significativa con respecto a las direcciones de flujo dependiendo de la estación⁷⁵.

Otros aspectos que se deben tener en cuenta para efectos de dilución de la pluma de contaminación son la viscosidad y densidad del lixiviado. La viscosidad teóricamente debería disminuir la velocidad del flujo; sin embargo, se ha observado que este parámetro no tiene una influencia significativa⁷⁶. Por el contrario, la densidad es un parámetro importante ya que puede afectar la posición vertical de la pluma. Es necesario un mejor entendimiento de los efectos de las densidades de los lixiviados a nivel de campo ya que es difícil separar los efectos del gradiente hidráulico, de la densidad, porque depende de la magnitud de cada uno la cual a su vez puede variar de manera estacional.

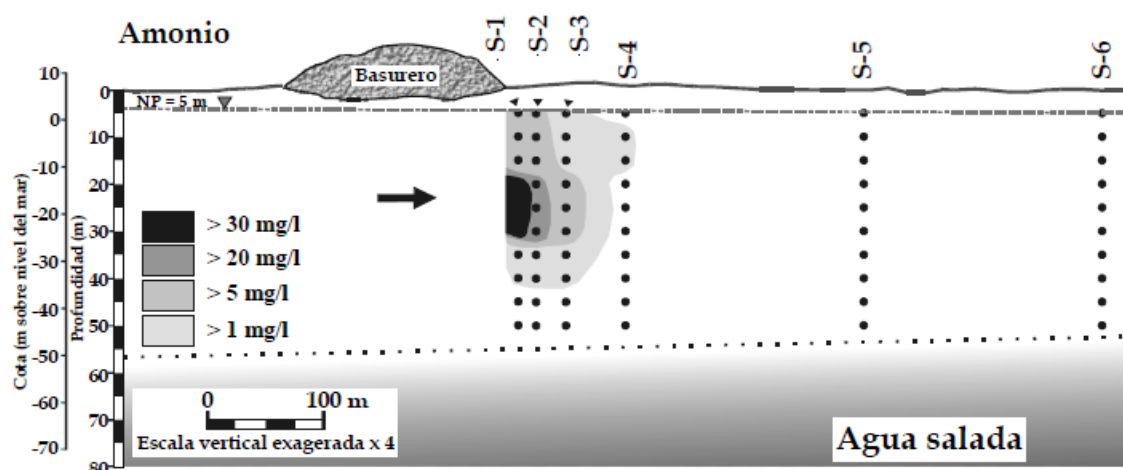
La dispersión es un parámetro muy importante en el transporte de solutos en el acuífero. A nivel de campo es difícil medir la dispersividad, así que frecuentemente se utiliza como parámetro de calibración en los modelos matemáticos en los casos que no se cuenta con suficiente información de la distribución espacial de la conductividad hidráulica; su variación refleja la influencia de la heterogeneidad del acuífero en diferentes sitios.

La dispersividad longitudinal es primordial porque influye en la concentración en el frente de la pluma de contaminación; junto con la dispersividad transversal gobiernan la dispersión de la pluma^{77,78}. Esto significa que en los acuíferos homogéneos la dispersión tiene un efecto limitado; sin embargo, la mayor parte de los acuíferos tienen una cantidad sustancial de heterogeneidades a pequeña escala, o localmente, lo cual proporciona condiciones suficientes y apropiadas para el transporte de contaminantes^{72,79}.

La entrada de lixiviados altamente reductores, ricos en materia orgánica y NH_4 , al acuífero, frecuentemente oxidado, conlleva la creación de un ambiente redox complejo donde se forman diferentes zonas a lo largo de la pluma que se traslapan permitiendo una intrincada serie de reacciones simultáneas, aunque un proceso sea dominante en términos de tasa de reacción. Entre los procesos importantes se incluyen a la biodegradación de la materia orgánica, los procesos redox abióticos, disolución/precipitación de minerales, acomplejamiento, intercambio iónico y sorción. Los contaminantes pueden ser atenuados por estos procesos dependiendo de la biogeoquímica del acuífero.

Cabe señalar que cuando el acuífero está conformado por roca fracturada tal como la roca caliza, las plumas pueden migrar muy lejos limitando las reacciones de amortiguamiento redox. Sin embargo, en estudios realizados en el ex basurero de Mérida se observó que, de las especies de nitrógeno, el NH_4^+ desaparece a los 100 metros (figura 6; punto S-4)⁸⁰; solo cuando se pasa de condiciones reducidas a oxidantes el amonio se oxida a NO_3^- . El amonio es un contaminante persistente en las plumas de los lixiviados ya que permanece a altas concentraciones en los lixiviados por un tiempo prolongado; al parecer es atenuado por oxidación en la parte anaeróbica de la pluma, pero los mecanismos no están claros y necesitan ser investigados.

Figura 6. Pluma de NH_4^+ , formada por la contaminación del lixiviado, debajo del ex basurero de Mérida



Fuente: González et al., 2004

Las reacciones redox que atenúan a cada tipo de contaminante varían. Para la materia orgánica disuelta y los compuestos orgánicos xenobióticos, el proceso de sorción tiene una menor importancia como mecanismo de atenuación; sin embargo, pudiese ejercer un ligero efecto de retardo. Por otra parte, aunque la degradación que se realiza en la fase ácida del lixiviado tiene un efecto sustancial sobre la materia orgánica en el agua subterránea, la materia orgánica se degrada ligeramente en la zona anaeróbica de la pluma. El metano constituye un caso especial puesto que es altamente volátil y por lo tanto escapa fácilmente.

Los macrocomponentes inorgánicos pueden ser atenuados por procesos redox de intercambio iónico y precipitación; sin embargo, en aguas altamente contaminadas el proceso de acomplejamiento puede ocurrir incrementando la solubilidad y movilidad de metales pesados y cationes.

La comprensión de la atenuación de los contaminantes en los acuíferos es fundamental para la evaluación de los riesgos ambientales asociados a la entrada de lixiviado al agua subterránea, para la interpretación coherente de las muestras de agua provenientes de los pozos de monitoreo y para determinar las acciones de remediación apropiadas incluyendo el monitoreo de la atenuación natural y el establecimiento de zonas de seguridad para la explotación del acuífero. La atenuación natural provoca reducción en la toxicidad de los contaminantes y en el riesgo humano y ecológico, pero rara vez se toma ventaja de ella cuando se trata de remediación de acuíferos⁸¹.

En el acuífero de Yucatán, México, se realizaron estudios de atenuación natural de la pluma de contaminación del ex basurero de la ciudad de Mérida y se reportó que la extensión de esta no rebasaba los 1000 m

debido al efecto de dilución de los contaminantes y el proceso dispersivo, ambos gobernados por las condiciones hidrogeológicas del lugar⁸¹. La dispersión propicia la mezcla del lixiviado con el agua subterránea debido al flujo que puede ocurrir en todas direcciones (longitudinal, vertical y transversal); la dilución es un proceso de atenuación importante conforme la pluma de lixiviado migra en el acuífero.

En el caso específico del Mérida, México, se demostró que ocurre un proceso de atenuación de la contaminación en el acuífero por medio de datos históricos del monitoreo del agua subterránea, a profundidad, en el sentido del flujo, estableciendo una relación entre la concentración de los constituyentes con el tiempo⁸¹. Una segunda evidencia de la efectividad consistió en calcular la rapidez de cambio de la atenuación natural; los cálculos de la vida media de la pluma de contaminación indicaron que el lapso en reducir la concentración de los contaminantes

a la mitad se hace más lento con el tiempo, concluyendo que la pluma se encontraba en proceso de decadencia⁸¹.

Es preciso entonces caracterizar a detalle las zonas en las que se encuentran ubicados sitios de disposición de residuos, con el objetivo de entender adecuadamente la migración de la pluma del lixiviado. El flujo del lixiviado es difícil de predecir, la precisión depende de las incertidumbres asociadas con la estimación de varios componentes que llevan a la generación del lixiviado.

Para ayudar al entendimiento y cuantificación del destino, transformación y transporte de la contaminación, a partir de su fuente, al agua subterránea se utilizan modelos de transporte cuyas entradas más importantes son la concentración inicial (en la fuente), la porosidad total del suelo y el coeficiente de partición. Es recomendable, entonces, desarrollar un modelo de transporte de contaminantes de los lixiviados de los sitios de disposición de residuos para poder efectuar un análisis de riesgo y desarrollar alternativas de remediación potenciales de la zona contaminada.

Los modelos conceptuales, matemáticos y numéricos son desarrollados en muchos países para el estudio de la contaminación por lixiviados del agua subterránea ya que se le reconoce como uno de los más serios problemas en cuanto a la operación de los sitios de disposición de desechos. Además, se recomienda prestar atención a un considerable número de sitios que se encuentran ya clausurados pero que fueron construidos sin la protección adecuada de los sistemas ingenieriles modernos. Los lixiviados de esos sitios seguirán generándose por varias décadas³¹.

CONCLUSIONES

Los contaminantes presentes en los lixiviados son una mezcla compleja de sustancias inorgánicas y orgánicas cuya composición es muy heterogénea y variable ya que su generación depende de muchos factores como la época de lluvias o secas que puede tener un efecto directo sobre la dilución o concentración del lixiviado, lo cual deberá ser considerado en el momento de atender una emergencia por derrame accidental con el fin de estimar adecuadamente el volumen y concentración inicial de los contaminantes de mayor importancia. Es muy necesario darle un manejo adecuado al lixiviado con el objetivo de reducir su peligrosidad y su volumen. Por otra parte, el mantenimiento de la integridad de la capa impermeabilizante en las celdas de un sitio de disposición y las lagunas de evaporación es imprescindible ya que constituye la barrera principal que impide la fuga de lixiviados.

La comprensión de la atenuación de los contaminantes en los acuíferos es fundamental para la evaluación de los

riesgos ambientales asociados a la entrada de lixiviado al agua subterránea, para la interpretación coherente de las muestras de agua provenientes de los pozos de monitoreo y para determinar las acciones de remediación apropiadas incluyendo el monitoreo de la atenuación natural y el establecimiento de zonas de seguridad para la explotación del acuífero. Los mecanismos de atenuación son importantes para disminuir las concentraciones de la mayoría de los contaminantes; sin embargo, el nitrógeno amoniacal es un caso especial por su persistencia y efecto tóxico que puede tener sobre la biota. Los efectos en la salud y el ecosistema que pueden provocar los contaminantes de los lixiviados de los sitios de disposición de residuos no se conocen con certeza por las múltiples reacciones antagónicas y sinérgicas, además de los efectos acumulativos y de bioaugmentación, entre otros.

El monitoreo del agua subterránea debajo del sitio y en la zona adyacente deberá realizarse de forma rutinaria con fines de detección oportuna de fugas continuas inadvertidas. Los modelos matemáticos son herramientas de gran valor para la simulación de diferentes escenarios de riesgo ya que aportan información valiosa sobre el flujo y transporte de contaminantes en agua subterránea para condiciones y tiempo específicos.

Para el caso del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, México, los requerimientos establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003 fueron considerados al ubicar el sitio de disposición final de residuos municipales; sin embargo, por las características hidrogeológicas del escenario cárstico donde se encuentra localizado, es indispensable evaluar y lograr el cumplimiento de los parámetros de descarga de aguas residuales incluyendo la medición de la toxicidad.

RECOMENDACIONES

Es necesario que la ciudadanía participe activamente en la gestión integral de residuos sólidos ya que, como generador de la mayor parte de los residuos que ingresan al sitio de disposición, tiene la responsabilidad de aplicar las acciones conducentes a disminuir la generación de basura, así como realizar la separación desde la fuente y así facilitar los procesos de recuperación de materiales como el composteo y reciclaje.

En el relleno sanitario de la ciudad de Mérida, México, se han construido más lagunas de evaporación ya que las existentes rápidamente alcanzan su capacidad máxima de operación recomendada, en función de la tasa de evaporación. Al ubicarse el sitio en una zona tropical, es susceptible a fenómenos meteorológicos como tormentas y huracanes que suponen una precipitación pluvial mayor a la velocidad de evaporación lo que pone en riesgo de derrame por rebose a las lagunas de

evaporación; se recomienda dar tratamientos adicionales al lixiviado para reducir su peligrosidad y volumen. Se recomienda investigar sobre tratamientos al lixiviado que puedan tener un buen resultado costo-beneficio, así como realizar estudios ecotoxicológicos para conocer cuál es la toxicidad del lixiviado crudo y tratado.

Es necesario contar con un diseño confiable en los sitios de disposición final, así como regular de forma más estricta las actividades de los vertederos en función a sus especificaciones. Existen numerosos reportes en la literatura de eventos desastrosos asociados a la falta de diseño y errores de operación de los vertederos como rebasar la capacidad de diseño.

Es importante realizar estudios de actualización sobre el flujo de agua subterránea ya que, aunque se realizaron estudios al respecto, los cambios estacionales y la explotación del acuífero producen cambios que deben documentarse para ubicar la dirección y magnitud de la pluma de contaminación en caso de derrame accidental de lixiviados. Los pozos de monitoreo deberán ser ubicados en las direcciones de flujo adecuadas, de acuerdo con la estación de lluvias o secas; el monitoreo del agua subterránea deberá hacerse a diferentes profundidades, con el fin de detectar el desarrollo de la pluma de contaminación, en caso de que existiera una filtración continua que no haya sido detectada o darse un derrame accidental repentino. En el caso del relleno sanitario de Yucatán el pozo de monitoreo aguas abajo tiene una profundidad de aproximadamente 10 metros ya que fue construido de acuerdo con el proyecto ejecutivo; sin embargo, en un estudio realizado en una zona relativamente cercana se localizó el centro de masa de una pluma de contaminación a una profundidad de 21 m debajo del nivel freático⁸⁰⁻⁸².

Deberán planearse las medidas de mitigación o atención de contingencias en caso de derrame accidental de lixiviados como pozos de extracción con la capacidad suficiente de bombeo y que puede ser obtenida a través de modelos matemáticos con los datos de la zona de riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el personal del Cuerpo Académico de Hidráulica e Hidrología y de Ingeniería Ambiental, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, en cuyas instalaciones se realizó la presente investigación. La Dra. Ana Maribel Pilar Escalante Mañé agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), antes Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), de México, por las becas otorgadas para estudios de posgrado y posdoctoral (CVU: 785662).

BIBLIOGRAFÍA

- Landrigan PJ, Stegeman JJ, Fleming LE, Allemand D, Anderson DM, Backer LC et al. Human health and ocean pollution. *Annals of Global Health*. 2020; 86(1):151-164.
- Marín-Beltrán I, Demaria F, Ofelio C, Serra LM, Turiel A, Ripple WJ, Mukul SA, Costa MC. Scientists' warning against the society of waste. *Science of The Total Environment*. 2022; 811,151359.
- UN (United Nations) Global Population Growth and Sustainable Development. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York: United Nations. 2021. [citado el 12 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.un.org/development/desa/pd/>.
- Iraivanian A, Ravari SO. Types of contamination in landfills and effects on the environment: A review study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 614(1), 012083.
- Parveen N, Singh DV, Azam R. Innovations in recycling for sustainable management of solid wastes. En: *Innovative Waste Management Technologies for Sustainable Development*, Bhat RA, Qadri H, Wani KA, Dar GH, Mehmood MA, Eds. 2020; pp. 177-210. IGI Global.
- Araiza-Aguilar JA, Cram-Heydrich S, Ruiz-Rivera N, Oropeza-Orozco O, Fernández-Lomelín MDP, Rojas-Valencia MN. What does 'risk' mean in municipal solid waste management? *Investigaciones geográficas*. 2021; 105, e60268.
- Khan S, Anjum R, Raza ST, Bazai NA, Ihtisham M. Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives. *Chemosphere*. 2022; 288, Part 1, 132403.
- Arici OK. Geological factors in solid waste landfill site selection. *Advanced Engineering Science*. 2022; 2, 35-43. [citado el 8 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/ades/article/view/61>
- Kawai K, Tasaki T. Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2016; 18(1), 1-13.
- Shekdar AV. Sustainable solid waste management: An integrated approach for Asian countries. *Waste Management*. 2009; 29(4):1438-48.
- UNEP (United Nations Environment Programme). *Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource*. Nairobi. 2024; Disponible en: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>.
- David VE, John Y, Hussain S. Rethinking sustainability: a review of Liberia's municipal solid waste management systems, status, and challenges. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2020; 22(5):1299-317.
- Ferronato N, Torretta V. Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International journal of environmental research and public health*. 2019; 16(6):1060.
- Karak T, Bhagat RM, Bhattacharyya P. Municipal solid waste generation, composition, and management: The world scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2012; 42(15), 1509-630.
- Raviteja KVNS, MunwarBasha B. Probabilistic back analysis of Koshe landfill slope failure. In *Indian Geotechnical Conference*. 2017; December.
- Xu Q, Peng D, Li W, Dong X, Hu W, Tang M, Liu F. The catastrophic landfill flowslide at Hongao dumpsite on 20 December 2015 in Shenzhen, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2017; 17(2):277-90.
- Zhang Z, Wang Y, Fang Y, Pan X, Zhang J, Xu H. Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. *Waste Management Research*. 2020; 38(12): 1389-404.
- Buenrostro O, Bocco G. Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling*. 2003; 39(3):251-63.
- Reneu S, Givaudan J, Poulain S, Dirassouyan F, Moulin P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 150 (3):468-93.
- Reddy PJ. *Municipal solid waste management: processing, energy recovery, global examples*. Hyderabad, India. Taylor and Francis Group, CRC Press. 2011.
- Sabahi AE, Rahim AS, Zuhairi W, Nozaily AF, Alshaebi F. The characteristics of leachate and groundwater pollution at municipal solid waste landfill of Ibb city, Yemen. *American Journal of Environmental Science*. 2009; 5(3):256-66.
- World Health Organization/Istituto per i Rapporti Internazionali di Sanita. *Urban solid waste management*. Firenze, Italia. Iris. 1993.
- Jaramillo J. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Una solución a la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud (OPS/CEPIS). Colombia. 2002.
- Uche JJ. The Impact of Solid Waste Dumpsites on Ambient Air Quality in Obio/Akpor Local Government Area, Rivers State: A Case Study of Nkpolu Community. *Pacific Journal of Science and Technology*. 2021; 22(2):272-9.
- Nyika J, Dinka M, Onyari E. Effects of landfill leachate on groundwater and its suitability for use. *Materials Today: Proceedings*, 57, Part 2. 2022; 958-63.
- Narayana T. Municipal solid waste management in India: From waste disposal to recovery of resources? *Waste management*. 2009; 29(3):1163-6.
- Sohoo I, Ritzkowski M, Sultan M, Farooq M, Kuchta K. Conceptualization of Bioreactor Landfill Approach for Sustainable Waste Management in Karachi, Pakistan. *Sustainability*. 2022; 14(6):3364.
- Mavropoulos A, Newman D. *Wasted Health: The Tragic Case of Dumpsites*. International Solid Waste Association, Viena, Austria. 2015.
- Ma S, Zhou C, Pan J, Yang G, Sun C, Liu Y, Zhao Z. Leachate from municipal solid waste landfills in a global perspective: Characteristics, influential factors and environmental risks. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 333:130234.
- Schiopu AM, Gavrilescu M. Municipal solid waste landfilling and treatment of resulting liquid effluents. *Environmental Engineering and Management Journal (EEMJ)*. 2010; 9(7):993-1019.
- Schiopu AM, Gavrilescu M. Options for the treatment and management of municipal landfill leachate: common and specific issues. *CLEAN–Soil, Air, Water*. 2010; 38(12):1101-10.

32. Vaverková MD. Landfill impacts on the environment - Review. *Geosciences*. 2019; 9(10):431.
33. Varank G, Adiller A, Güvenç SY, Adar E, Demir A. Evaluation of Contaminant Transport Through Alternative Liner Systems from Leachate to Groundwater Using One-Dimensional Mass Transport Model. En: *Recycling and Reuse Approaches for Better Sustainability*. Balkaya N, Guney S. (eds). Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. 2019; 87-95.
34. Xu Y, Xue X, Dong L, Nai C, Liu Y, Huang Q. Long-term dynamics of leachate production, leakage from hazardous waste landfill sites and the impact on groundwater quality and human health. *Waste management*. 2018; 82:156-66.
35. Sun XC, Xu Y, Liu YQ, Nai CX, Dong L, Liu JC, Huang QF. Evolution of geomembrane degradation and defects in a landfill: Impacts on long-term leachate leakage and groundwater quality. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 224:335-45.
36. Ančić M, Huđek A, Rihtarić I, Cazar M, Bačun-Družina V, Kopjar N, Durgo K. Physico chemical properties and toxicological effect of landfill groundwaters and leachates. *Chemosphere*. 2020; 238:124574.
37. El Fadili H, Ali MB, El Mahi M, Cooray AT. A comprehensive health risk assessment and groundwater quality for irrigation and drinking purposes around municipal solid waste sanitary landfill: A case study in Morocco. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022; 18:100698.
38. Guo Y, Li P, He X, Wang L. Groundwater quality in and around a landfill in northwest China: characteristic pollutant identification, health risk assessment, and controlling factor analysis. *Exposure and Health*. 2022; 14:885-901.
39. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Ciudad de México. 2021.
40. SCFI (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial). Norma Mexicana NMX-AA-087-SCFI-2010. Análisis de agua – Evaluación de toxicidad aguda con *Daphnia magna*, Strauss (Crustacea-Cladocera) – Método de prueba. Ciudad de México. 2010.
41. Przydatek G. The analysis of the possibility of using biological tests for assessment of toxicity of leachate from an active municipal landfill. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2019; 67:94-101.
42. Chen DMC, Bodirsky BL, Krueger T, Mishra A, Popp A. The world's growing municipal solid waste: trends and impacts. *Environmental Research Letters*. 2020; 15(7):074021.
43. Kjeldsen P, Barlaz MA, Rooker AP, Baun A, Ledin A, Christensen TH. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2002; 32(4):297-336.
44. Luo H, Zeng Y, Cheng Y, He D, Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of The Total Environment*. 2020; 703:135468.
45. Dibyanshu K, Chhaya T, Raychoudhury T. A review on the fate and transport behavior of engineered nanoparticles: possibility of becoming an emerging contaminant in the groundwater. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023; 20:4649-72.
46. Essien JP, Ikpe DI, Inam ED, Okon AO, Ebong GA, Benson NU. Occurrence and spatial distribution of heavy metals in landfill leachates and impacted freshwater ecosystem: An environmental and human health threat. *"Plos one"*. 2022;17(2):e0263279.
47. Jin Q, Tao D, Lu Y, Sun J, Lam CH, Su G, He Y. New insight on occurrence of liquid crystal monomers: A class of emerging e-waste pollutants in municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. 2022; 423, Part B: 127146.
48. Wijekoon P, Koliyabandara PA, Cooray AT, Lam SS, Athapattu BCL, Vithanage M. Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges. *Journal of Hazardous Materials*. 2022; 421:126627.
49. Tsydenova N, Vázquez Morillas A, Cruz Salas AA. Sustainability assessment of waste management system for Mexico City (Mexico) - based on analytic hierarchy process. *Recycling*. 2018; 3(3):45.
50. Rajoo KS, Karam DS, Ismail A, Arifin A. Evaluating the leachate contamination impact of landfills and open dumpsites from developing countries using the proposed Leachate Pollution Index for Developing Countries (LPIDC). *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2020; 14:100372.
51. Mama CN, Nnaji CC, Nnam JP, Opata OC. Environmental burden of unprocessed solid waste handling in Enugu State, Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021; 28(15):19439-57.
52. Costa AM, Alfaia RGDSM, Campos JC. Landfill leachate treatment in Brazil—An overview. *Journal of Environmental Management*. 2019; 232:110-6.
53. Daniel AN, Ekeleme IK, Onuigbo CM, Ikpeazu VO, Obiekezie SO. Review on effect of dumpsite leachate to the environmental and public health implication. *GSC Advanced Research and Reviews*. 2021; 7(2):051-60.
54. Aziz HA, Ramli SF. Recent development in sanitary landfilling and landfill leachate treatment in Malaysia. *International Journal of Environmental Engineering*. 2018; 9(3-4), 201-29.
55. Lindamulla L, Nanayakkara N, Othman M, Jinadasa S, Herath G, Jegatheesan V. Municipal Solid Waste Landfill Leachate Characteristics and Their Treatment Options in Tropical Countries. *Current Pollution Reports*. 2022; 8:273-87.
56. Ghosh P, Gupta A, Thakur IS. Combined chemical and toxicological evaluation of leachate from municipal solid waste landfill sites of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015; 22(12), 9148-58.
57. Alimba CG, Adewumi OO, Binuyo OM, Odeigah PG. Wild black rats (*Rattus rattus* Linnaeus, 1758) as zoomonitor of genotoxicity and systemic toxicity induced by hazardous emissions from Abule Egba unsanitary landfill, Lagos, Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021; 28, 10603–21.
58. Kundariya N, Mohanty SS, Varjani S, Ngo HH, Wong JW, Taherzadeh MJ, et al. A review on integrated approaches for municipal solid waste for environmental and economical relevance: Monitoring tools, technologies, and strategic innovations. *Bioresource Technology*. 2021; 342:125982.
59. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. 2020. [citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>.

60. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). Censo nacional de gobiernos municipales y demarcaciones territoriales de la ciudad de México 2023. Documento de diseño. 2024. [citado el 24 de octubre de 2024]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463915713.pdf.
61. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Proyecto de modificación de la 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. Ciudad de México. 2021.
62. Archundia L. Diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios sobre material cárstico. El caso de Mérida, Yucatán. XXII Congreso Interamericano de AIDIS. 2000; pp. 6-7. Porto Alegre, Brasil.
63. Pérez R, Pacheco J. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Ingeniería Revista Académica. 2004; 8(1):33-42.
64. Foster S, Hirata R, Gómez DD, D'Elia M, Paris M. Protección de la calidad del agua subterránea - guía para empresas de agua, autoridades municipales y ambientales. Washington D.C., USA: World Bank. 2002. Recuperado el 8 de noviembre de 2024 de: <https://documents1.worldbank.org/curated/fr/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>.
65. Méndez-Novelo R, Cachon-Sandoval E, Sauri-Riancho M, Quintal-Franco C, Castillo-Borges E. Influencia del material de cubierta en la composición de los lixiviados en un relleno sanitario. Ingeniería Revista Académica. 2002; 6(2):7-12.
66. Méndez-Novelo RI, Pietrogiovanna-Bronca JA, Santos-Ocampo B, Sauri-Riancho MR, Giacomán-Vallejos G, Castillo-Borges ER. Determinación de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-adsorción. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2010; 26(3):211-20.
67. Méndez-Novelo RI, García-Reyes RB, Castillo-Borges ER, Sauri-Riancho MR. Treating leachate by Fenton oxidation. Ingeniería e Investigación. 2010; 30(1):80-85.
68. Méndez-Novelo RI, Cervantes-Cocom GA, San-Pedro L, Zetina-Moguel C, Quintal-Franco C, Giacomán-Vallejos G. Regeneration of granular activated carbon clogged in the treatment of leachates. Environmental Science and Pollution Research. 2023; 30(18): 53833-53846.
69. Ramírez-Sosa DR, Castillo-Borges ER, Méndez-Novelo RI, Sauri-Riancho MR, Barceló-Quintal M, Marrufo-Gómez JM. Determination of organic compounds in landfill leachates treated by Fenton-Adsorption. Waste management. 2013; 33(2): 390-5.
70. Ku LD. Caracterización de los sólidos generados en la aplicación del proceso Fenton-Filtración-Adsorción a lixiviados. Tesis (maestría), Universidad Autónoma de Yucatán, México. 2012.
71. Escalante-Mañé A, Méndez-Novelo RI, Giacomán-Vallejos G, González-Sánchez A, Romo-Alvarado J, Colli-Dulá RC, et al. 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. 2022; 45(06):659-65.
72. Christensen TH, Kjeldsen P, Bjerg PL, Jensen DL, Christensen JB, Baun A, Albrechtsen HJ, Heron G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry. 2001; 16(7-8):659-718.
73. González-Herrera RA. Evolution of groundwater contamination in the Yucatán karstic aquifer. Tesis (maestría), University of Waterloo, Canadá. 1992.
74. MacFarlane DS, Cherry JA, Gillham RW, Sudicky EA. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study. 1. Groundwater flow and plume delineation. Journal of Hydrology. 1983; 63(1-2):1-29.
75. Kjeldsen P, Bjerg PL, Rügge K, Christensen TH, Pedersen JK. Characterization of an old municipal landfill (Grindsted, Denmark) as a groundwater pollution source: landfill hydrology and leachate migration. Waste Management & Research. 1998; 16(1):3-13.
76. Kimmel GE, Braids OC. Leachate plumes in ground water from Babylon and Islip landfills, Long Island, New York. US Geological Survey. Professional Paper 1085. 1980.
77. Casares-Salazar R, González-Herrera R, Graniel-Castro E. Field scale longitudinal dispersivities estimation in a karstic aquifer. International Journal of Water. 2013; 7(1-2):14-28.
78. Canul-Macario C, González-Herrera R, Sánchez-Pinto I, Graniel-Castro E. Contribution to the evaluation of solute transport properties in a karstic aquifer (Yucatan, Mexico). Hydrogeology Journal. 2019; 27:1683-91.
79. González-Herrera R, Gómez-López R. Two in one leachate plume in a karstic aquifer. Environmental Earth Sciences. 2013; 68(7):1945-53.
80. González R, Vadillo I, Rodríguez R, Carrasco F. Sistema redox en un acuífero carbonatado afectado por lixiviado de basureros. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. 2004; 4:71-9.
81. González-Herrera R, Rodríguez-Castillo R, Coronado-Peraza V. Atenuación natural en el acuífero yucateco. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2007; 23(1):5-15.
82. González-Herrera R, Vázquez-Mújica P, Canto-Ríos J. Interactions of waste disposal site leachate with the Merida karst aquifer, Mexico. Journal of Hydrology. 2023; 620(2023):129436.