



Gestión de los residuos sólidos urbanos y su efecto en el aire, agua y suelo

Municipal solid waste management and its effect on air, water and soil

Gestão dos resíduos sólidos urbanos e o seu efeito no ar, na água e no solo

Alma Regina Dávila-Sámamo^{1,2}

ardasa17@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4154-9078>

Luis Antonio Castillo-Suárez²

lcastillosuarez@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9755-7117>

Ivonne Linares-Hernández²

ilinaresh@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7302-8491>

Verónica Martínez-Miranda²

mmirandav@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4977-9249>

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca-México

²Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua. Estado de México-México

Artículo recibido 14 de septiembre 2021 / Arbitrado y aceptado 28 de octubre 2021 / Publicado 13 de diciembre 2021

RESUMEN

Los rellenos sanitarios (RS) y los vertederos abiertos son responsables de la generación significativa de altas cantidades de lixiviados y gases que se incorporan al agua subterránea y a la atmósfera, principalmente compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, macro inorgánicos (N y P). Debido a que los RS bien diseñados conllevan altos costos de instalación, operación y mantenimiento, la gestión de RSU se queda a nivel de sitios controlados y no controlados. Como es el caso del RS de Zinacantepec. En este trabajo se aplicó la metodología causa-efecto a través de la matriz de Leopold para analizar el impacto ambiental en el aire, agua y suelo en concordancia con el método de gestión municipal y de concesión privada. Los resultados indicaron que el RS de Zinacantepec carece de la información necesaria sobre la cuantificación de lixiviados y gases emitidos. Se puede concluir que se requiere un estudio en el que se monitoreen las características físicas y químicas del agua subterránea y del aire con la finalidad de evitar daños a la salud de los trabajadores y de la población circundante y al ecosistema.

Palabras clave: Impacto ambiental; Matriz causa-efecto; Medidas de mitigación; Relleno sanitario; Residuos sólidos urbanos

ABSTRACT

Solid waste (SW) and open dumps are responsible for significant generation of high amounts of leachate and gases that are incorporated into groundwater and the atmosphere, mainly volatile organic compounds, heavy metals, inorganic macro (N and P). Well-designed SW entail high installation, operation, and maintenance costs, then SW management remains at the level of controlled and uncontrolled sites. Such is the case of the Zinacantepec SW. In this work, the cause-effect methodology was applied through the Leopold matrix to analyze the environmental impact on air, water and soil in accordance with the municipal management method and private concession. The results indicated that the Zinacantepec SW lacks the necessary information on the quantification of leachates and gases emitted. As a conclusion, this study requires to monitor the physical and chemical characteristics of the groundwater and air in order to prevent damage to the health of workers and the surrounding population and the ecosystem.

Key words: Cause-effect matrix; Environmental impact; Landfill; Mitigation measures; Municipal waste solids

RESUMO

Os RSU e as lixeiras abertas são responsáveis pela geração de quantidades significativas de grandes quantidades de lixiviados e gases que são incorporados nas águas subterráneas e na atmosfera, principalmente compostos orgânicos voláteis, metais pesados, macro inorgânicos (N e P). Como os SWs bem concebidos implicam elevados custos de instalação, operação e manutenção, a gestão dos RSU mantém-se ao nível dos locais controlados e não controlados. Tal é o caso do SW Zinacantepec. Neste trabalho, foi aplicada a metodologia da causa-efeito através da matriz Leopold para analisar o impacto ambiental no ar, água e solo de acordo com o método de gestão municipal e concessão privada. Pode-se concluir que é necessário um estudo para monitorizar as características físicas e químicas das águas subterráneas e do ar, a fim de evitar danos para a saúde dos trabalhadores e da população circundante e para o ecossistema.

Palavras-chave: Impacto ambiental; Matriz causa-efeito; Medidas de mitigação; Aterro sanitário; Resíduos sólidos urbanos

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) constituye la primera etapa del manejo de residuos sólidos y está relacionada con las actividades que realizan las personas, el crecimiento poblacional, los cambios en los patrones de consumo, el incremento de la actividad industrial, comercial y las condiciones climáticas, entre otros factores (1). La urbanización es un asunto de preocupación mundial, que ha provocado un aumento de la cantidad y la compleja composición de los RSU, influyendo en las emisiones de carbón (2).

De ahí la importancia de establecer una política de gestión integral de RSU, que aborde la problemática multilateral de la gestión de residuos con un enfoque holístico y sistémico. Los aspectos políticos, legales, institucionales, técnicos, económicos, de ordenamiento territorial, y de sensibilización, educación ambiental y participación de la ciudadanía (3).

En el contexto internacional el caso de Alemania puede considerarse una historia de éxito. El país fue nombrado el país campeón mundial de reciclaje en 2017, y es conocido como uno de los referentes mundiales en relación con la legislación enfocada en esquemas de responsabilidad, reciclaje, tratamiento y disposición de residuos. El éxito de las estrategias alemanas ha llevado a otros países de la Unión Europea para implementar políticas basadas en el principio de responsabilidad expandida del productor, lo que ha aumentado sus tasas de reciclaje (4).

Por otro lado, en algunos países de América Latina y El Caribe ha prevalecido el manejo de

los residuos bajo el esquema de “recolección y disposición final” dejando rezagados el aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos, así como la disposición final sanitaria y ambientalmente adecuada (5). Lo que hace relevante dar prioridad a política enfocadas a la correcta gestión de los residuos sólidos (6).

La gestión de los residuos es esencial para mantener la salud pública. En sitios no controlados pueden ser un foco de atracción para insectos y animales carroñeros, los que pueden transmitir enfermedades. Se ha demostrado que las zonas donde se acumulan los residuos se incrementa la incidencia de diarrea e infecciones respiratorias agudas (7). Los riesgos medioambientales incluyen la contaminación del agua subterránea, superficial y suelo, por la escorrentía de los lixiviados generados (8).

La correcta gestión de los RSU busca minimizar los impactos ambientales en el suelo, aire y agua, con la intención de proteger la salud pública, para ello se debe tener en cuenta los impactos económicos ya que es un componente fundamental de la infraestructura (9). Recientemente los sistemas de gestión impulsan el aprovechamiento de los residuos para la obtención de energía (10), reciclaje de materiales (11), recuperación de suelos (12), producción de biogás (13), entre otros. Sin embargo, las restricciones económicas y de gestión de los recursos, el rápido crecimiento de la población, los cambios en el patrón de consumo/estilos de vida de las personas y la afluencia continua de migrantes de las zonas

rurales a los centros urbanos contribuyen a un efecto negativo (14), por lo que es importante evaluar las condiciones particulares que enfrentan los sitios de disposición con la intención de evaluar las alternativas de desarrollo.

Por lo tanto, el objetivo de la siguiente investigación es la evaluación de los impactos ambientales asociados al manejo y gestión de RSU, aplicando la matriz causa-efecto; tomando como caso de estudio el Municipio de Toluca, y su disposición final en el relleno de Zinacantepec, Estado de México, con la finalidad de evaluar sus efectos en el aire, agua y suelo, proponiendo las medidas de mitigación y sistemas de gestión más adecuadas a las condiciones particulares.

MÉTODO

Ubicación y descripción del relleno sanitario regional

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT (2003), un relleno sanitario (RS) es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de RSU y de manejo especial, con el fin de controlar, los impactos ambientales, por lo cual, en el caso específico del RS de Zinacantepec, estado de México, cumple con las características descritas en la definición, brindando un servicio a diferentes municipios de la región.

Se realizó un mapa de geolocalización de la zona de estudio y se analizaron sus

principales características sobre el manejo y gestión de los RSU. Desde que ingresan hasta su proceso de colocación y compactación con la maquinaria, los cuales son cubiertos con una capa de tierra u otros materiales.

Cuantificación y determinación de la generación de RSU

Se cuantificó y determinó la cantidad de residuos sólidos diaria, para una población de 910,600 habitantes de la ciudad de Toluca, municipio que produce 650 ton RSU/día (INEGI, 2020), de acuerdo con la ecuación 1: Donde N, es el número de habitantes totales de la población, X es el % de RSU recibidos del total de la población de Toluca, Y, es el valor per-cápita de RSU $\left(\frac{kg}{hab.día}\right)$ y Z es los RSU $\left(\frac{kg}{día}\right)$

$$(N) \frac{(X)}{(100)} \left(Y \frac{kg}{hab.día} \right) = Z \frac{kg}{día} \quad (1)$$

Análisis del método de gestión integral de RSU

Se analizó y comparó el método de gestión integral de los residuos utilizados y su manejo en la ciudad Toluca y su destino final en el relleno sanitario regional de Zinacantepec. Los métodos de gestión analizados fueron: a) servicios municipales directos y b) concesiones con empresas privadas. Para identificar las ventajas y desventajas y su relación directa con los impactos ambientales (Figura 1).



Figura 1. Métodos de gestión integral RSU.

Se desarrolló la descripción de cada una de las etapas que comprende la gestión Integral de los RSU, analizando las alternativas de tratamiento existentes para los residuos y sus posibilidades de aplicabilidad en la zona de influencia, en función de las características propias de los residuos de la ciudad de Toluca y su disposición final.

Caracterización fisicoquímica de la muestra de lixiviado

Una muestra de lixiviado fue recolectada. Se tomaron 50 mL de muestra en frasco ámbar con 2 mL de ácido nítrico al 5M para la determinación de metales y finalmente se recolectaron 2L de muestra en recipiente plástico para el análisis fisicoquímico.

Evaluación de los impactos en agua, suelo y atmósfera

Se desarrolló la matriz de Leopold, de acuerdo a la metodología de causa – efecto, con el objetivo de conocer los impactos ambientales originados en el relleno sanitario y su relación con el Método de Gestión Integral de RSU aplicado. Se realizó un comparativo de los impactos ambientales generados y se plantearon medidas de mitigación para coadyuvar en la disminución del detrimento del medio ambiente.

La Tabla 1 presenta los efectos o criterios, y magnitudes de los parámetros ambientales.

Tabla 1. Magnitudes y efectos de los parámetros ambientales.

Valor	Importancia	Valor	Magnitud
5	Enormes efectos negativos	-5	Enormes efectos positivos
4	Efectos negativos elevados	-4	Efectos positivos elevados
3	Efectos negativos intermedios	-3	Efectos positivos intermedios
2	Efectos negativos bajos	-2	Efectos positivos bajos
1	Efectos negativos muy bajos	-1	Efectos positivos muy bajos
0	Sin efecto	0	Sin efecto

Los componentes ambientales considerados para este estudio se localizan en dos categorías que se expresan de la siguiente manera: fisicoquímico (FQ) y métodos de gestión (MG), para evaluar la alternativa

del proyecto para la gestión de los rellenos sanitarios. Los componentes incluyen 10 FQ y 4 MG y su efecto en aire, agua y suelo. Las descripciones de los componentes utilizados se presentan en (Tabla 2).

Tabla 2. Descripciones de los componentes de la matriz Leopold modificada.

Código	Descripción de los factores
FQ	
FQ1	Recursos minerales
FQ2	Materiales de construcción
FQ3	Suelos
FQ4	Geomorfología
FQ5	Factores físicos singulares
FQ6	Subterránea
FQ7	Calidad
FQ8	Recarga
FQ9	Calidad (gases, partículas)
FQ10	Clima (Micro y macro)
MG	
MG1	Servicio Municipal Directo
MG2	Concesión
MG3	Alianzas Público-Privadas
MG4	Empresas de Economía Mixta

Tabla 3. Interacciones causa-efecto.

Clasificación de la acción	Acción
A	
MODIFICACIÓN DEL ENTORNO	A. Modificación del hábitat B. Alteración de la cubierta terrestre C. Alteración de la hidrología D. Alteración del drenaje E. Canalización F. Incendios G. Ruidos y vibraciones
B	
TRANSFORMACIÓN DEL SUELO Y CONSTRUCCIÓN	A. Carreteras y caminos B. Revestimiento de canales para lixiviados
Clasificación de la acción	Acción
B	
TRANSFORMACIÓN DEL SUELO Y CONSTRUCCIÓN	C. Presas y embalses para lixiviados D. Impermeabilización de suelo E. Extracción de materiales pétreos F. Excavaciones G. Desmontes y rellenos H. Pavimentaciones o recubrimientos de superficies I. Perforación de pozos de monitoreo
Clasificación de la acción	Acción
C	
EXTRACCIÓN DE RECURSOS	A. Extracción de materiales pétreos B. Excavaciones superficiales C. Extracción de agua
D	
SISTEMA DE GESTION INTEGRAL	A. Separación y almacenamiento de RSU B. Aprovechamiento energético C. Disposición Final D. Relleno Sanitario E. Actuaciones sobre el paisaje F. Cierre de minas y control de vertederos G. Aterramientos y drenajes A. Reposición forestal

Clasificación de la acción	Acción
F	
RECURSOS RENOVABLES	B. Gestión y control de la vida natural C. Recarga de acuíferos subterráneos D. Utilización de abonos E. Reciclado de residuos
G	
TRATAMIENTO Y VERTIDO DE RESIDUOS	A. Vertederos de residuos mineros o industriales B. Emisiones de gases (efecto Invernadero) C. Lubricantes usados (mantenimiento de maquinaria)
H	
TRATAMIENTO QUÍMICO	A. Tratamiento de Lixiviados B. Tratamiento de biogás C. Control de maleza y vegetación silvestre D. Plaguicidas

Medidas de mitigación

Con base a los resultados del estudio de impacto ambiental, se desarrolló una propuesta de acciones correctivas para tomar decisiones anticipadas como medidas de prevención y mitigación en la gestión integral de los RSU, las cuales fueron desarrolladas para la prevención, reducción o mitigación de los impactos ambientales en aire, agua, suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción y ubicación geográfica del relleno de Zinacantepec

El Relleno sanitario de Zinacantepec (Figura 2), está ubicado en carretera Federal Toluca–Zitácuaro, San Luis Mextepec,

Municipio de Zinacantepec, Estado de México (19.3238, - 99.7735), en predios que corresponden a un particular, y su regulación es a través de un contrato de carácter privado, firmado por los ejidatarios de la zona. Inicia en 2007, de acuerdo con la autorización (Número 212130000/DGOIA/RESOL/146/07) emitida por la Dirección General de Ordenamiento e Impacto Ambiental de la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, opera a través de una empresa privada, que da servicio a diferentes municipios del Estado de México, (lo que le confiere un carácter regional), entre ellos al municipio de Toluca que carece de un espacio físico propio para la disposición final de los RSU.



Figura 2. Relleno sanitario de Zinacantepec (19.3238, - 99.7735).

Cuenta con 8 celdas de 10 proyectadas y 1 saneada. El uso de suelo es agrícola, el material que se ocupa para la cobertura es tepetate y arcilla. Previo a la colocación de la geomembrana, es acondicionado el fondo del socavón con arcilla compactada al 90% de próctor, con 30 cm de espesor por debajo y 30 cm sobre la geomembrana, compactadas con capas de 15 cm, de tal forma que el espesor final de la arcilla llega a los 60 cm de espesor. El grado de compactación de los RSU es de 866 kg/m².

La frecuencia con la que se realiza la cobertura del RS es cada 24 h. Su capacidad de confinamiento estimado es de 4 millones de ton. Su vida útil restante es de 5 años. El RS, cuenta con una báscula de 80 ton; algunas instalaciones operan con energía solar.

Para encausar los lixiviados se construyeron drenes con un colector de tubería de polietileno de alta densidad, diseñados en función de la trayectoria de la pendiente natural.

Este RS tiene lagunas de evaporación para el almacenamiento temporal de los lixiviados, donde son bombeados para su recirculación. Se observa una aparente reducción del volumen de lixiviados, y del proceso de degradación de los residuos (Figura 3). Sin embargo, de acuerdo con las observaciones en campo, el volumen del lixiviado no corresponde a los RSU recibidos. Lo que es posible existan pérdidas importantes de lixiviados por infiltración en algunas zonas de las celdas donde probablemente la geomembrana se encuentre dañada.



Figura 3. Laguna de lixiviados del relleno de Zinacantepec.

La finalidad de la laguna de evaporación de lixiviados, además de almacenar el volumen de lixiviados que se generan, es la de minimizarlos a través de la evaporación natural, por lo que es posible que concentraciones de compuestos orgánicos volátiles son emitidos a la atmósfera, sin embargo debido a las condiciones climatológicas que prevalecen en la zona del Valle de Toluca, esta evaporación es poca, en comparación con la aportación de líquidos provenientes de los residuos y de las precipitaciones pluviales, por este motivo, se considera que es importante que coexistan sistemas de tratamientos paralelos que reduzcan el volumen de lixiviados a través de procesos diferentes a la evaporación natural.

En la Tabla 4 se observa la caracterización fisicoquímica de una muestra de lixiviados. Los parámetros orgánicos indican elevada concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO) 7877 mg/L, por lo que el lixiviado puede clasificarse como de edad vieja,

la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es 301.7 mg/L y el índice de biodegradabilidad es de (DBO/DQO) 0.038, esto indica que es poco biodegradable debido a la presencia de compuestos orgánicos recalcitrantes. El carbón orgánico total (COT) 4017 mg/L lo que indica la materia carbonosa, el carbono inorgánico es de 3035 mg/L y representa el grado de mineralización del lixiviado. Además de un intenso color café rojizo de 20 167 U Pt-Co.

La acidez es de 3 511 mg/L CaCO₃ y elevada alcalinidad de 12 354 mg/L CaCO₃, debido al valor de pH de 8.5. La dureza es 79 448 mg/L y refleja el contenido de Ca y Mg principalmente, así como Fe y Si en la muestra. La presencia de cloruros (6306 mg/L) indican un alto nivel de contaminación inorgánica y salinidad debido a que la conductividad eléctrica es de 25.7 mS/cm. La materia nitrogenada corresponde a 2578 mg/L como nitrógeno total y principalmente en forma de nitrógeno amoniacal (2488 mg/L), la

muestra presenta un bajo contenido de calcio de 49.5 mg/L y cobre 0.31 mg/L.

Los sólidos sedimentables son 0.1 mL/L indican la presencia de materia orgánica disuelta principalmente como ácidos húmicos y fúlvicos que son altamente solubles. De acuerdo con lo anterior el contenido de materia orgánica e inorgánica soluble podrían

afectar directamente el acuífero en caso de infiltración de los lixiviados o de carecer de geomembrana en las celdas del RS o bien que esta se haya dañado con el paso del tiempo. Así mismo es posible la bioacumulación de estos contaminantes en el suelo y la contaminación del aire a través de los compuestos orgánicos volátiles.

Tabla 4. Composición fisicoquímica de una muestra de lixiviados.

Parámetro	Método	Unidad	Resultado
DBO	NMX-AA-028-SCFI-2001	mg/L	301.7
DQO	NMX-AA-030-SCFI-2001	mg/L	7877.0
Biodegradabilidad			0.038
Acidez	NMX-AA-036-SCFI-2001	mg/L como CaCO ₃	3510.5
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	mg/L como CaCO ₃	12354.0
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001	Pt-Co	20166.6
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000	mS/cm	25.7
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	mg/L	6306.2
Dureza	NMX-AA-072-SCFI-2001	mg/L como CaCO ₃	79448.0
Nitrógeno amoniacal	Método HACH DR/800 8155	mg/L	2487.5
Nitrógeno total	Método HACH DR/800-8075	mg/L	2578.0
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011		8.5
CIT (Carbono inorgánico total)	UNE-EN 1484:1998	mg/L	3034.8
COT (Carbono orgánico total)	UNE-EN 1484:1998	mg/L	4316.7
CT (Carbono total)	UNE-EN 1484:1998	mg/L	7424.2
Calcio	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	49.5
Cobre	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	0.31
Sólidos sedimentables totales	NMX-AA-004-SCFI-2013	mL/L	0.10

Cuantificación y determinación de la generación de RSU

Se cuantificó y determinó la cantidad de residuos sólidos diaria, para una población de 910,600 habitantes de la ciudad de Toluca (INEGI, 2020), municipio que genera 859 ton

RSU/día, considerando el valor per cápita de 0.944 kg/hab día (DBGIR, SEMARNAT 2020).

El 32 % de estos residuos generados en el municipio son recolectados por el organismo municipal, de los cuales el 16.7% se concentran en el relleno regional de estudio.

$$910,600 \text{ hab} \frac{(16.7)}{(100)} \left(0.944 \frac{\text{kg}}{\text{hab.día}} \right) = 143,554 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 143.55 \text{ ton/día}$$

La Tabla 5, indica la recolección de RSU en el municipio de Toluca, durante el mes de junio de 2021 y su disposición final en los rellenos sanitarios regionales de Zinacantepec, Xonacatlán y San Antonio la Isla, de acuerdo con

datos proporcionados por el Departamento de Recolección, Transferencia y Disposición Final de RS, de la Dirección General de Servicios Públicos de Toluca (DGSP).

Tabla 5. Interacciones causa-efecto.

Rellenos Sanitarios	Peso registrado en báscula mensual	Ingreso promedio RSU diario
(ton)		
Zinacantepec	4,308.43	143.6
Xonacatlán	2,609.06	86.98
San Antonio la Isla	1,536.34	51.21

Evaluación del impacto ambiental en agua, suelo, aire

La matriz de Leopold, se desarrollo de acuerdo con la metodología de causa – efecto, con el objetivo de conocer los impactos ambientales originados en el relleno sanitario de Zinacantepec y su relación con el Método de Gestión Integral de RSU aplicado. El análisis permitió determinar el impacto relacionado con los factores: agua, aire y suelo (Figura 4).

La contaminación del agua subterránea debido a la infiltración de lixiviados es una preocupación gradual en el mundo, los principales impactos ambientales de la contaminación del agua subterránea están relacionados con un efecto significativo en la salud humana y el medio ambiente ecológico

(15,16). El lixiviado puede constituir productos orgánicos e inorgánicos solubles e insolubles a partir de procesos físicos, químicos, hidrolíticos y fermentativos, esto hace que los lixiviados estén altamente contaminados (17).

La contaminación de las aguas subterráneas se vuelve inevitable, especialmente cuando el fondo del RS está por debajo del nivel freático, o si el material que separa el RS del acuífero es permeable (18). El lixiviado puede migrar vertical y horizontalmente a través de la advección, dispersión y dilución, contaminando y deteriorando la calidad del agua (19).

En los RS se identifican cuatro grupos de contaminantes, materia orgánica disuelta, macro componentes inorgánicos (N y P), metales pesados traza (Pb, Cd, Hg, Cu, Ni,

En la Figura 5 se observa que el mayor impacto negativo se tiene en la recarga del acuífero, es decir la infiltración del lixiviado al subsuelo (-390), seguido de la modificación de la calidad del agua en cuanto a sus parámetros fisicoquímicos (-47). De acuerdo con Krčmar, et al (22) reportó un índice de calidad del agua subterránea 3.56–8.89; de acuerdo al índice de Nemerow: 2.02–3.78 indican que la calidad del agua subterránea en el relleno sanitario se está degradando con el tiempo, la presencia

de hidrocarburos poliaromáticos, carbón orgánico total, Cr, Cu, Pb y Zn son las sustancias de mayor preocupación. Los metales pesados Hg ($I_{geo} \leq 3.14$), Pb ($I_{geo} \leq 2.22$), Cr ($I_{geo} \leq 3.31$) y Cu ($I_{geo} \leq 2.16$) representan la peor contaminación del suelo. El Hg tiene un riesgo ecológico potencial de moderado (52,9) a muy alto (530,0), lo que demuestra los efectos potenciales a largo plazo de la bioacumulación y la biomagnificación.

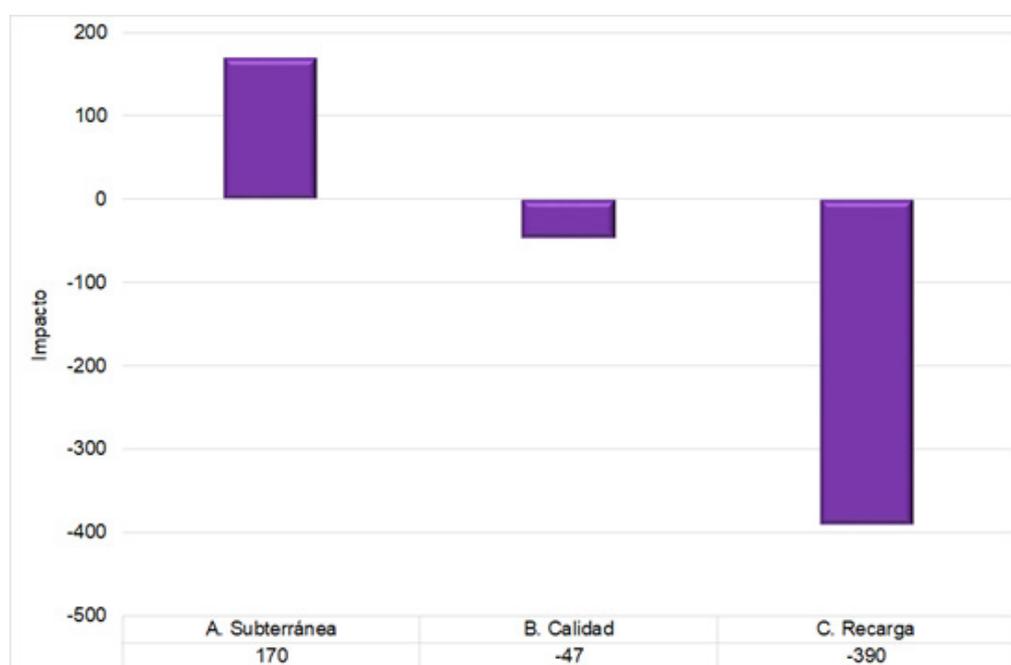


Figura 5. Impacto de los RSU en la calidad del agua.

Independiente de que los rellenos cuenten con mecanismos para la prevención de los impactos ambientales originados por la generación de los lixiviados, el volumen de éstos, debido a las condiciones climatológicas, pudieran rebasar los mecanismos de prevención implementados. De ahí la importancia de considerar sistemas de tratamiento alternos

para los lixiviados (evaporación por riego, evaporación natural por canales, humedales o evaporación forzada), o alternativas en el manejo de los RS tales como la incineración, el co-procesamiento, la digestión anaerobia, la pirolisis, entre otros que minimizan la generación de lixiviados.

Por otra parte, en materia de suelo, se determinó que aquellos sitios dispuestos para el confinamiento de RSU, en donde se presenta un impacto previo en el suelo, minimizan la afectación a este factor, siendo así recomendable la ubicación de sitios de confinamiento en socavones o canteras previamente impactadas o que se encuentran en operación, reintegrando el uso del suelo a una necesidad de sitio de confinamiento y minimizando el cambio de uso de suelo en otras zonas.

En la Figura 6 se observa el impacto de los RSU en el suelo. En donde la geomorfología (-163), los factores físicos singulares (clima, relieve, topografía, material parental, biota) (-133), los recursos minerales (-100) y suelo en cuanto a su alteración fisicoquímica y composición (-65) se ven afectados negativamente. El RS de Zinacantepec, manifiesta un impacto al uso del suelo, debido a que sus predios se ubican en suelos agrícolas, y éstos están siendo cambiados para el uso como sitio de disposición final, por lo que se considera que los RS debieran ubicarse en áreas previamente impactadas y evitando el deterioro al suelo y al paisaje.

De acuerdo con Rezapour et al. (23) reportó que el suelo de un RS se enriqueció

significativamente con las fracciones disponibles y totales de los metales en las secuencias de Zn> Pb> Ni> Cd> Cu y Cd> Zn> Ni> Pb> Cu, respectivamente. Sin embargo, solo el contenido de Cd superó los niveles estándar. Para los diversos grupos de población, el cociente de riesgo medio (HQ) fue menor que la unidad, lo que implica una falta de riesgo para la salud no cancerígena para los residentes locales, mientras que el índice de peligro medio (HI) fue de 2,3 y 1,1 para las personas de 0 a 5 y 6–18 años, respectivamente, lo que ilustra un riesgo moderado para la salud no cancerígeno para los dos grupos. Cd y Pb contribuyeron más a HI, seguidos de Cu, Zn y Ni. Además, el riesgo carcinogénico para la salud del Cd, que varía de 1×10^{-5} a 1×10^{-6} , mostró un riesgo potencial bajo en los diferentes grupos de población expuestos a los granos de trigo y disminuyó en la secuencia de población adulta > 6–18 años > 0–5 años. Los hallazgos del estudio, que se pueden utilizar en regiones bajo condiciones ambientales similares, proporcionan un valioso punto de referencia para el diseño de estrategias apropiadas para manejar estos agroecosistemas por parte de los administradores locales y nacionales.

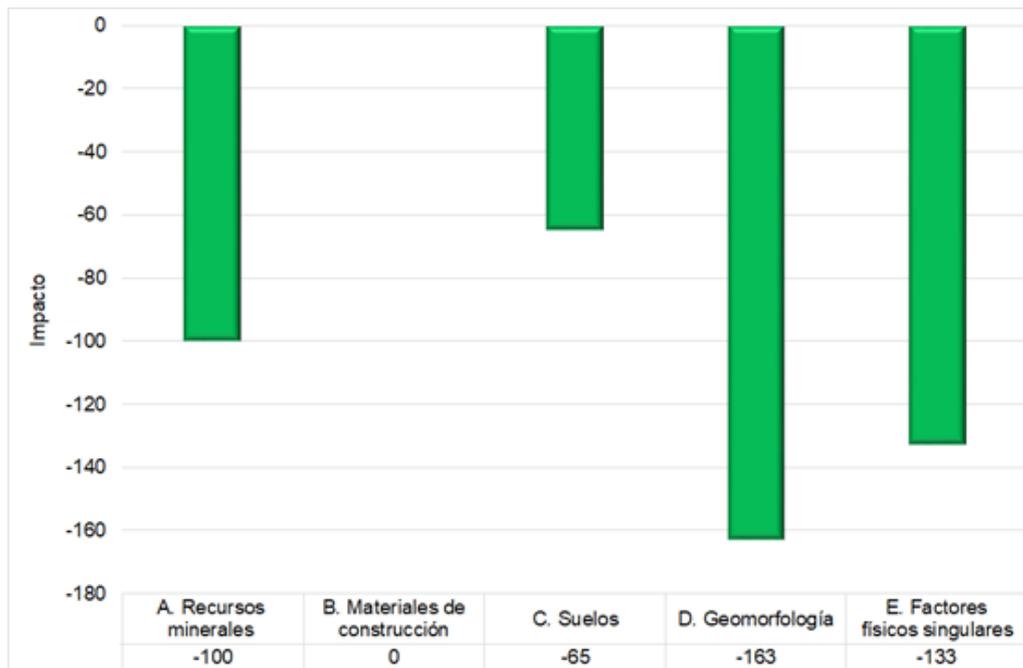


Figura 6. Impacto de los RSU en el suelo.

Respecto a las emisiones a la atmósfera, el RS Zinacantepec, cuenta con un sistema de canalización y conducción de biogás a quemadores de fabricación propia, en donde se plantea la reducción de emisiones de metano a la atmósfera transformando éstas en gases como: dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y otros gases con presencia de azufre; sin embargo, el sistema no cuenta con mecanismos que garanticen su efectividad, como sistemas de encendido electrónico o quemadores de alta eficiencia, lo que da como resultado una combustión incompleta, es decir, se estima que pueda haber metano en estas emisiones, o que los pozos se lleguen a apagar. Por lo que se considera, que debieran existir sistemas de tratamiento de biogás que aseguren la reducción de emisiones y

el aprovechamiento energético de miles de BTU's (British thermal units).

En la Figura 7 se observan los principales impactos de los RSU en la atmósfera, afectando principalmente la calidad del aire debido a la emisión de partículas finas y gases (-73).

De acuerdo con Weichenthal et al. (24) reportaron que, durante un incendio en un relleno sanitario en Canadá, se recopilaban datos sobre la calidad del aire para caracterizar las emisiones y las amenazas potenciales para la salud pública. Se monitorearon los contaminantes básicos ($PM_{2.5}$, O_3 , NO_2) junto con dioxinas/furanos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y compuestos orgánicos volátiles. Las concentraciones medias diarias de dioxina / furano fueron 66 veces más altas durante la quema activa (0.2 pg/m^3 de cociente de

equivalencia tóxica (TEQ)) en comparación con después de que se extinguió el fuego (0.003 pg/m^3 de TEQ). Los hallazgos sugieren que las concentraciones en el aire de sustancias

potencialmente dañinas pueden aumentar durante los incendios de los vertederos incluso cuando los contaminantes del aire permanecen prácticamente sin cambios.

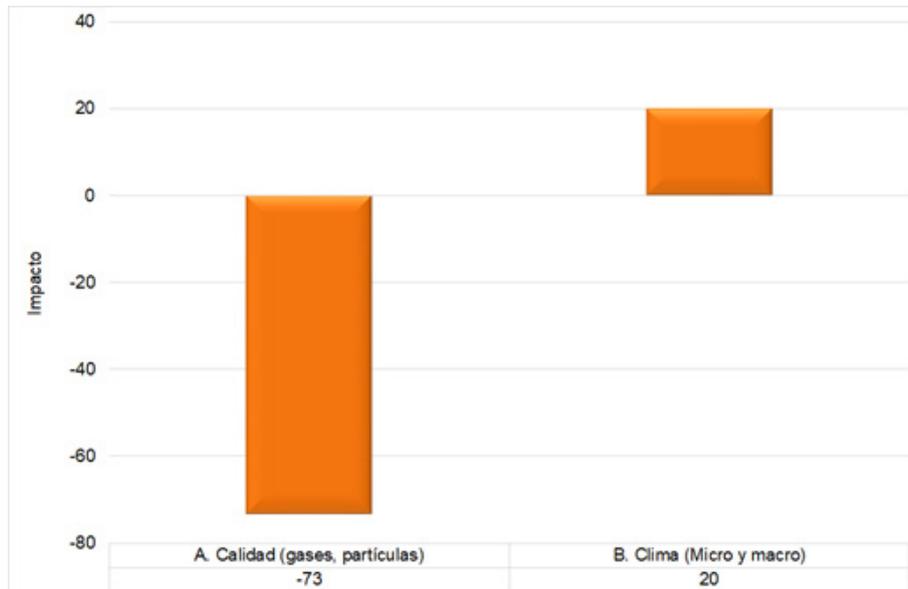


Figura 7. Impactos de los RSU en el aire.

Por otra parte, Dave et al. (25) indican que las emisiones de los RS son una fuente importante de compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVNM) en entornos urbanos. Los COVNM juegan un papel importante en la química atmosférica y las concentraciones elevadas de algunos compuestos son responsables del deterioro de la calidad del aire. Nair et al 2019 analizaron las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) de los RS y su impacto en la salud humana y el medio ambiente. Los COV son contaminantes ubicuos que se liberan a la atmósfera desde los RS debido a la degradación de la materia orgánica y los productos domésticos modernos como disolventes de limpieza, desinfectantes, madera, productos de cuidado personal, etc., presentes en los

RSU. Aunque numerosos estudios vinculan potencialmente la exposición a COV con el riesgo de cáncer en los trabajadores de los RS y los residentes circundantes, aún se requieren estudios epidemiológicos detallados para comprender el mecanismo potencial de inducción de cáncer. Varios compuestos de COV liberados a la atmósfera pueden contribuir a la formación de O_3 y aerosoles orgánicos secundarios (AOS) en la troposfera y la contaminación fotoquímica, lo que agrega efectos sobre la calidad del aire y el bienestar humano. Estos factores pueden ser la fuerza impulsora para implementar la remediación.

En la Figura 8 se muestra un resumen de la migración de los contaminantes generados en un RS al aire, suelo y agua, así como su impacto a la salud.



Figura 8. Efectos a la salud por los compuestos generados en los RSU.

Análisis del método de gestión integral de RSU del relleno en estudio

De acuerdo con la clasificación de los métodos de gestión, en el RS de Zinacantepec se opera bajo el esquema de servicio municipal directo y concesión de empresas privadas.

En la Figura 9 se muestra los impactos ambientales de cada uno de los métodos de gestión, como puede observarse el servicio municipal directo tiene un mayor efecto negativo en el manejo de RSU (-969), por

consiguiente se observa un mayor impacto en el medio ambiente. La concesión es el método más viable para la gestión de los RSU (1374), estos resultados justifican que el desarrollo de las actividades a cargo de organismos o empresas especializadas y con el requerimiento de maquinaria y equipo necesario para la ejecución, construcción y operación de los sitios de confinamiento, aminorando la posibilidad de impactos ambientales adversos.

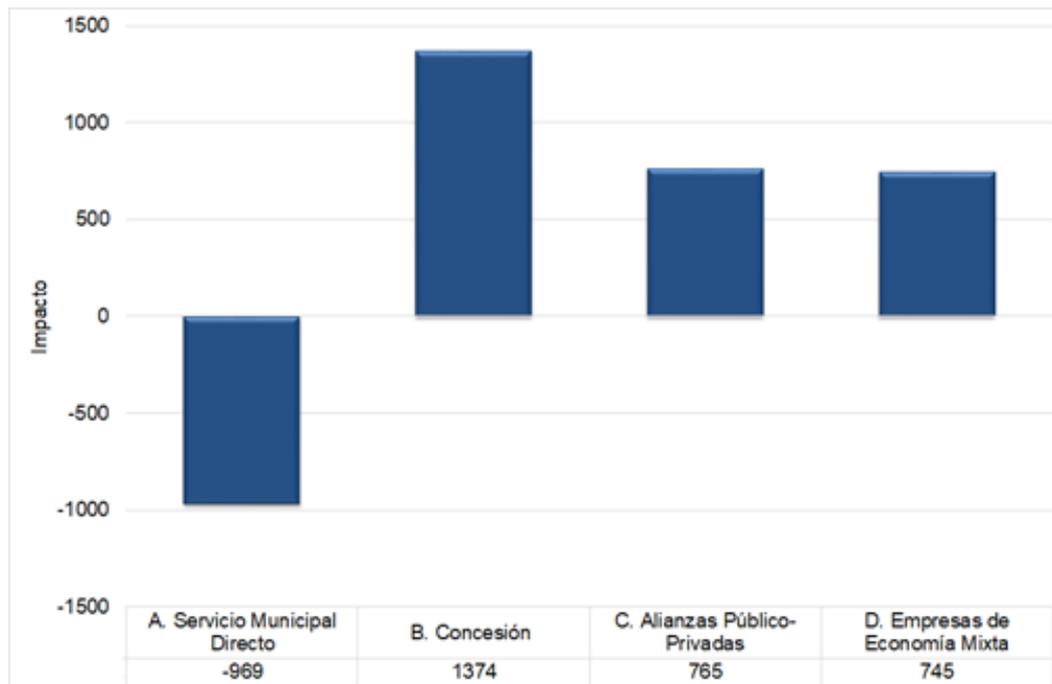


Figura 9. Impactos ambientales asociados al método de gestión de RSU.

La Tabla 6 señala las principales ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de gestión reportados (26).

Los métodos de gestión que incrementan la posibilidad de cumplimiento de las medidas de mitigación, se inclinan a aquellos métodos en dónde la rigurosidad de los procedimientos y verificación, obligue a la construcción y

uso de los materiales correctos, por lo tanto los métodos de asociación público privados y de economía mixta, tienden a generar un mejor servicio, dado que están sujetos al cumplimiento de obligaciones estipuladas y supervisión en la ejecución de sus actividades, garantizando así la aplicación de medidas preventivas.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los métodos de gestión de RSU.

Métodos de gestión de RSU	Factores	Ventajas	Desventajas
Servicio Municipal Directo Concesión con empresas privadas	Económico	Los costos son directamente cargados al presupuesto del municipio. Conocimiento pleno de las políticas públicas y su financiamiento instrumentadas durante la administración.	Los beneficios y aplicación se observan en municipios de baja población. Los costos relacionados por habitante se incrementan en función de la población. Limitada capacidad de inversión.
	Administrativo	Contratación directa de personal para la prestación de servicios públicos.	Interrupción y falta de seguimiento a las políticas por la duración de los periodos de la administración.
	Operativo	Inventario de equipo e instalaciones propiedad del municipio asignados al área de servicios públicos.	Dificultad operativa y mala organización de recolección de RSU. Falta de profesionalismo y preparación especializada en los sistemas de gestión integral de los residuos.

Métodos de gestión de RSU	Factores	Ventajas	Desventajas
Concesión con empresas privadas	Administrativo	<p>El municipio reduce costos de mantenimiento de unidades y depreciación de sus activos.</p> <p>La inversión inicial es mínima y los activos municipales se reducen.</p>	<p>El sector privado encuentra varias oportunidades de negocio.</p> <p>El servicio incrementa su costo, respecto al manejo directo municipal.</p>
	Operativo	<p>Se reducen las cargas administrativas por concepto de recursos humanos ejercidas por el municipio.</p> <p>Existe la figura jurídica contractual para la ejecución de los servicios a efectuar, definiendo las responsabilidades en caso de incumplimiento.</p> <p>Garantía de la prestación del servicio durante el periodo acordado.</p> <p>Selección de opciones para una correcta ejecución de servicios a un mejor precio y calidad del servicio.</p>	<p>Se requiere más personal calificado, y los presupuestos estatales no son suficientes.</p> <p>Los procesos de concesión son limitados y sujetos a negociaciones basadas en relaciones personales.</p> <p>La concesión por ley necesita pasar por los procesos legislativos.</p> <p>Las inversiones de las empresas son riesgosas por la facultad que puede tener el municipio de revocar la concesión.</p>
	Operativo	<p>Mayor organización y calidad en la prestación del servicio. El municipio interviene en la supervisión y la empresa en todas las etapas operativas.</p>	<p>Posibles sabotajes derivados de la reincorporación del personal.</p>

Métodos de gestión de RSU	Factores	Ventajas	Desventajas
Alianzas público-privadas	Económico	<p>Se financia la pre-inversión, diseño y factibilidad de los proyectos que fortalezcan las debilidades de gestión del municipio.</p> <p>Las inversiones son compartidas por ambas partes.</p> <p>Los costos se reducen en su operación y post-clausura.</p> <p>Disminuye la inversión del municipio.</p>	La eficacia financiera de la alianza depende del tipo de acuerdo alcanzado.
	Administrativo	Se puede incorporar cláusulas de rendición de cuentas y de responsabilidad social	La alianza depende del periodo de la administración en cargo del gobierno.
	Operativo	<p>Ambas partes acuerdan los procesos operativos.</p> <p>Mayor eficiencia en el servicio.</p>	<p>El municipio puede limitar los proyectos e inversiones.</p> <p>Desacuerdos operativos.</p>

Métodos de gestión de RSU	Factores	Ventajas	Desventajas
Plan de economía mixta	Económico	<p>La seguridad en la participación y pagos.</p> <p>El capital accionario es público y privado.</p> <p>Formalización de una empresa con la participación del municipio y el privado.</p> <p>El municipio tiene participación de utilidades en la empresa de economía mixta constituida.</p>	<p>Costos del servicio más elevado.</p> <p>Se debe cumplir la normatividad en materia de constitución de la empresa.</p> <p>El municipio debe contar con los recursos económicos de participación de la empresa.</p>
	Administrativo	<p>El municipio es parte del Consejo Directivo de la empresa.</p> <p>Ambas partes intervienen en la toma de decisiones.</p> <p>Es independiente de los periodos administrativos gubernamental.</p>	<p>Se requiere de negociaciones con los sindicatos para la intervención de la empresa en la operativa</p>
	Operativo	<p>Ambas partes, intervienen en la supervisión y ejecución de las etapas operativas.</p>	<p>Existen desacuerdos operativos.</p>

Medidas de mitigación

Se debe considerar elaborar un programa, donde se especifiquen las diferentes etapas de disposición de los residuos. Así como promover la clasificación y aprovechamiento de los RSU.

Evaluar a la empresa responsable de llevar a cabo la operación del RS; y condicionar su autorización al cumplimiento de las normas oficiales mexicanas.

Elaborar un programa de monitoreo de gases a pozos de venteo, así como un programa del manejo de los gases, en caso de contingencia.

Cuantificar y monitorear las características fisicoquímicas de los lixiviados. Además, realizar estudios sobre el ciclo biogeoquímico de los contaminantes y sus riesgos.

Debe mejorarse el sistema para garantizar la captación y extracción del lixiviado, y ser recirculado en las plataformas de confinamiento en función de los requerimientos de humedad necesarios para lograr la descomposición de los RSU.

Proponer iniciativas para la actualización de normas y reglamentos en materia de descargas de lixiviados considerando su variabilidad con factores temporales y espaciales.

CONCLUSIÓN

El relleno sanitario no cuenta con la información necesaria sobre la cuantificación de lixiviados y gases emitidos, por lo que, el impacto al agua, aire y suelo es elevado de acuerdo con la matriz causa-efecto evaluada y acorde a los métodos de gestión utilizados

por el municipio. Es necesario un estudio en el que se monitoreen las características físicas y químicas del agua subterránea y del aire con la finalidad de evitar daños a la salud de los trabajadores y de la población circundante. Así como, mejorar el sistema de captación y extracción del lixiviado, y ser recirculado en las plataformas de confinamiento en función de los requerimientos de humedad necesarios para lograr la descomposición de los RSU.

El relleno sanitario requiere mejorar su sistema de captación y recirculación de los lixiviados, y el manejo de gases lo que implica altos costos de adecuación, operación y mantenimiento, así como, contar con un programa, donde se especifiquen las diferentes etapas de disposición de los residuos, promoviendo la clasificación y aprovechamiento de los RSU.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por la beca otorgada (CVU 1081590) y al COMECYT por el financiamiento del proyecto "Evaluación de los métodos de gestión de residuos sólidos urbanos en el Municipio de Toluca y su disposición final en rellenos sanitarios regionales", así como el apoyo con número de folio CAT2021-0016.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tello Esponzoza P, Campani, D, RSD. Gestión integral de los residuos sólidos. 2018
2. Deus RM, Mele FD, Bezerra BS, Battistelle RAG. A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assessment and identification of best management practices. J Clean Prod. 2020;242:118433

3. Ferrer GEB. Ingeniería revista académica. Ingeniería. 2002;6(2):51–7
4. Azevedo BD, Scavarda LF, Caiado RGG, Fuss M. Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience. Waste Manag. 2021;120:772–83
5. Hettiarachchi H, Ryu S, Caucci S, Silva R. Municipal solid waste management in Latin America and the Caribbean: Issues and potential solutions from the governance perspective. Recycling. 2018;3(2)
6. da Silva L, Marques Prietto PD, Pavan Korf E. Sustainability indicators for urban solid waste management in large and medium-sized worldwide cities. J Clean Prod. 2019 Nov;237:117802
7. Sukholthaman P, Sharp A. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. Waste Manag. 2016;52:50–61
8. Valizadeh S, Hakimian H. Evaluation of waste management options using rapid impact assessment matrix and Iranian Leopold matrix in Birjand, Iran. Int J Environ Sci Technol. 2019;16(7):3337–54
9. Hochstrasser Castillo N, De la Rosa Gómez I, Borbón Morales CG, Hernández Berriel MC. Retorno social de la inversión para gestionar los residuos sólidos urbanos de Metepec, México. Vol. 8, Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento. 2020
10. Moya D, Aldás C, López G, Kaparaju P. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: A worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. Energy Procedia. 2017;134:286–95
11. Chen F, Luo Z, Yang Y, Liu GJ, Ma J. Enhancing municipal solid waste recycling through reorganizing waste pickers: A case study in Nanjing, China. Waste Manag Res. 2018;36(9):767–78
12. Meena MD, Yadav RK, Narjary B, Yadav G, Jat HS, Sheoran P, et al. Municipal solid waste (MSW): Strategies to improve salt affected soil sustainability: A review. Waste Manag. 2019;84:38–53
13. Pavi S, Kramer LE, Gomes LP, Miranda LAS. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. Bioresour Technol. 2017;228(March 2019):362–7
14. Ayeleru OO, Okonta FN, Ntuli F. Cost benefit analysis of a municipal solid waste recycling facility in Soweto, South Africa. Waste Manag. 2021;134(May 2020):263–9
15. Pellón A. Propuesta de tratamiento de lixiviados en un vertedero de RS. Ing Hidráulica y Ambient [Internet]. 2015;36. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382015000200001&script=sci_arttext&lng=en
16. Li P, Subramani T, Srinivasamoorthy K. Sources and Consequences of Groundwater Contamination. Arch Environ Contam Toxicol. 2021;
17. Yao P. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. 2017;
18. Zeng D. Factors influencing groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in the Qinghai-Tibetan plateau. Ecotoxicol Environ Saf. 2021;211
19. Abiriga D. Contaminación del agua subterránea de un relleno sanitario municipal: efecto de la edad, el cierre del relleno sanitario y la temporada en la química del agua subterránea. Cienc del medio Ambient Total. 2020;737
20. Guigue J. Dynamics of copper and zinc sedimentation in a lagooning system receiving landfill leachate. Waste Manag. 2013;33
21. Kanownik GP& W. Impact of small municipal solid waste landfill on groundwater quality. Env Monit Assess. 2019;1–14

- 22.** Krčmar D. Evaluación preliminar del impacto de la contaminación de los vertederos municipales en el suelo y las aguas subterráneas poco profundas en Subotica, Serbia. *Cienc del medio Ambient Total*. 2018;615
- 23.** Rezapour S. Impacto de la fuga incontrolada de lixiviados de un vertedero de residuos sólidos urbanos en el suelo en un entorno cultivado-calcareo. *Gestión de Residuos*. 2018;82
- 24.** S. W. Characterizing the spatial distribution of ambient ultrafine particles in Toronto, Canada: A land use regression model. *Env Pollut*. 2015;
- 25.** Dave PN. Emissions of non-methane volatile organic compounds from a landfill site in a major city of India: impact on local air quality. *Heliyon*. 2020;
- 26.** Abellán E. Política y legislación de la gestión de los residuos en América Latina y el Caribe. In: Tello P, Campani D, Sarafian D, editors. *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. 2018. p. 36–46