





Dávila-Sámano, Alma Regina; Linares-Hernández, Ivonne; Castillo-Suárez, Luis Antonio; Martínez-Miranda, Verónica

 **Alma Regina Dávila-Sámano**  
ardasa17@gmail.com  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

 **Ivonne Linares-Hernández**  
ilinaresh@uaemex.mx  
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, México

 **Luis Antonio Castillo-Suárez**  
lacastillosuarez@gmail.com  
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, México

 **Verónica Martínez-Miranda**  
mmirandav@uaemex.mx  
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, México

## Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias ALFA

Centro de Estudios Transdisciplinarios, Bolivia  
ISSN: 2664-0902  
ISSN-e: 2664-0902  
Periodicidad: Cuatrimestral  
vol. 5, núm. 15, 2021  
editor@revistaalfa.org

Recepción: 14 Septiembre 2021  
Aprobación: 28 Octubre 2021  
Publicación: 13 Diciembre 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/540/5403342006/>

**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.

**Keywords:** 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 subterrâneas 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 subterrâneas 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 ( Importar imagen y Z es los RSU (

$$\text{RSU} \left( \frac{\text{kg}}{\text{hab.día}} \right) \quad \text{y Z es los RSU} \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)$$

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

### Análisis del método de gestión integral de RSU

e 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

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

TABLA 1  
Magnitudes y efectos de los parámetros ambientales

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)

Código	Descripción de los factores
<b>FQ</b>	
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)
<b>MG</b>	
MG1	Servicio Municipal Directo
MG2	Concesión
MG3	Alianzas Público-Privadas
MG4	Empresas de Economía Mixta

**TABLA 2**  
Descripciones de los componentes de la matriz Leopold modificada.

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

**TABLA 3**  
Interacciones causa-efecto

## 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/m<sup>2</sup>.

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  $\text{CaCO}_3$  y elevada alcalinidad de 12 354 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , 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

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 <sub>3</sub>	3510.5
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	mg/L como CaCO <sub>3</sub>	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 <sub>3</sub>	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

TABLA 4  
Composición fisicoquímica de una muestra de lixiviados

#### 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)

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

TABLA 5  
Interacciones causa-efecto

#### 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 del agua subterránea 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, Zn), metaloide As y compuestos orgánicos xenobióticos (plaguicidas, fármacos, detergentes, compuestos químicos industriales, compuestos orgánicos clorados, hidrocarburos aromáticos, fenoles, ácidos húmicos y fúlvicos, urea entre otros) (20,21)

GESTION		A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS									
4. MÉTODOS DE GESTIÓN		1. TIERRA		2. AGUA		3. AIRE		4. RUIDO Y VIBRACIONES		5. CLIMA	
A. Limpieza y mantenimiento		A. Recursos naturales		A. Calidad (gases, partículas)		A. Calidad (gases, partículas)		A. Calidad (gases, partículas)		A. Calidad (gases, partículas)	
B. Control de calidad		B. Materiales de construcción		B. Calidad		B. Calidad		B. Calidad		B. Calidad	
C. Almacenamiento		C. Suelos		C. Suelos		C. Suelos		C. Suelos		C. Suelos	
D. Empresas de Ecología		D. Geomorfología		D. Geomorfología		D. Geomorfología		D. Geomorfología		D. Geomorfología	
		E. Efectos físicos angulosos		E. Efectos físicos angulosos		E. Efectos físicos angulosos		E. Efectos físicos angulosos		E. Efectos físicos angulosos	
		F. Efectos físicos angulosos		F. Efectos físicos angulosos		F. Efectos físicos angulosos		F. Efectos físicos angulosos		F. Efectos físicos angulosos	
		G. Efectos físicos angulosos		G. Efectos físicos angulosos		G. Efectos físicos angulosos		G. Efectos físicos angulosos		G. Efectos físicos angulosos	
		H. Efectos físicos angulosos		H. Efectos físicos angulosos		H. Efectos físicos angulosos		H. Efectos físicos angulosos		H. Efectos físicos angulosos	
		I. Efectos físicos angulosos		I. Efectos físicos angulosos		I. Efectos físicos angulosos		I. Efectos físicos angulosos		I. Efectos físicos angulosos	
		J. Efectos físicos angulosos		J. Efectos físicos angulosos		J. Efectos físicos angulosos		J. Efectos físicos angulosos		J. Efectos físicos angulosos	
		K. Efectos físicos angulosos		K. Efectos físicos angulosos		K. Efectos físicos angulosos		K. Efectos físicos angulosos		K. Efectos físicos angulosos	
		L. Efectos físicos angulosos		L. Efectos físicos angulosos		L. Efectos físicos angulosos		L. Efectos físicos angulosos		L. Efectos físicos angulosos	
		M. Efectos físicos angulosos		M. Efectos físicos angulosos		M. Efectos físicos angulosos		M. Efectos físicos angulosos		M. Efectos físicos angulosos	
		N. Efectos físicos angulosos		N. Efectos físicos angulosos		N. Efectos físicos angulosos		N. Efectos físicos angulosos		N. Efectos físicos angulosos	
		O. Efectos físicos angulosos		O. Efectos físicos angulosos		O. Efectos físicos angulosos		O. Efectos físicos angulosos		O. Efectos físicos angulosos	
		P. Efectos físicos angulosos		P. Efectos físicos angulosos		P. Efectos físicos angulosos		P. Efectos físicos angulosos		P. Efectos físicos angulosos	
		Q. Efectos físicos angulosos		Q. Efectos físicos angulosos		Q. Efectos físicos angulosos		Q. Efectos físicos angulosos		Q. Efectos físicos angulosos	
		R. Efectos físicos angulosos		R. Efectos físicos angulosos		R. Efectos físicos angulosos		R. Efectos físicos angulosos		R. Efectos físicos angulosos	
		S. Efectos físicos angulosos		S. Efectos físicos angulosos		S. Efectos físicos angulosos		S. Efectos físicos angulosos		S. Efectos físicos angulosos	
		T. Efectos físicos angulosos		T. Efectos físicos angulosos		T. Efectos físicos angulosos		T. Efectos físicos angulosos		T. Efectos físicos angulosos	
		U. Efectos físicos angulosos		U. Efectos físicos angulosos		U. Efectos físicos angulosos		U. Efectos físicos angulosos		U. Efectos físicos angulosos	
		V. Efectos físicos angulosos		V. Efectos físicos angulosos		V. Efectos físicos angulosos		V. Efectos físicos angulosos		V. Efectos físicos angulosos	
		W. Efectos físicos angulosos		W. Efectos físicos angulosos		W. Efectos físicos angulosos		W. Efectos físicos angulosos		W. Efectos físicos angulosos	
		X. Efectos físicos angulosos		X. Efectos físicos angulosos		X. Efectos físicos angulosos		X. Efectos físicos angulosos		X. Efectos físicos angulosos	
		Y. Efectos físicos angulosos		Y. Efectos físicos angulosos		Y. Efectos físicos angulosos		Y. Efectos físicos angulosos		Y. Efectos físicos angulosos	
		Z. Efectos físicos angulosos		Z. Efectos físicos angulosos		Z. Efectos físicos angulosos		Z. Efectos físicos angulosos		Z. Efectos físicos angulosos	
		AA. Efectos físicos angulosos		AA. Efectos físicos angulosos		AA. Efectos físicos angulosos		AA. Efectos físicos angulosos		AA. Efectos físicos angulosos	
		AB. Efectos físicos angulosos		AB. Efectos físicos angulosos		AB. Efectos físicos angulosos		AB. Efectos físicos angulosos		AB. Efectos físicos angulosos	
		AC. Efectos físicos angulosos		AC. Efectos físicos angulosos		AC. Efectos físicos angulosos		AC. Efectos físicos angulosos		AC. Efectos físicos angulosos	
		AD. Efectos físicos angulosos		AD. Efectos físicos angulosos		AD. Efectos físicos angulosos		AD. Efectos físicos angulosos		AD. Efectos físicos angulosos	
		AE. Efectos físicos angulosos		AE. Efectos físicos angulosos		AE. Efectos físicos angulosos		AE. Efectos físicos angulosos		AE. Efectos físicos angulosos	
		AF. Efectos físicos angulosos		AF. Efectos físicos angulosos		AF. Efectos físicos angulosos		AF. Efectos físicos angulosos		AF. Efectos físicos angulosos	
		AG. Efectos físicos angulosos		AG. Efectos físicos angulosos		AG. Efectos físicos angulosos		AG. Efectos físicos angulosos		AG. Efectos físicos angulosos	
		AH. Efectos físicos angulosos		AH. Efectos físicos angulosos		AH. Efectos físicos angulosos		AH. Efectos físicos angulosos		AH. Efectos físicos angulosos	
		AI. Efectos físicos angulosos		AI. Efectos físicos angulosos		AI. Efectos físicos angulosos		AI. Efectos físicos angulosos		AI. Efectos físicos angulosos	
		AJ. Efectos físicos angulosos		AJ. Efectos físicos angulosos		AJ. Efectos físicos angulosos		AJ. Efectos físicos angulosos		AJ. Efectos físicos angulosos	
		AK. Efectos físicos angulosos		AK. Efectos físicos angulosos		AK. Efectos físicos angulosos		AK. Efectos físicos angulosos		AK. Efectos físicos angulosos	
		AL. Efectos físicos angulosos		AL. Efectos físicos angulosos		AL. Efectos físicos angulosos		AL. Efectos físicos angulosos		AL. Efectos físicos angulosos	
		AM. Efectos físicos angulosos		AM. Efectos físicos angulosos		AM. Efectos físicos angulosos		AM. Efectos físicos angulosos		AM. Efectos físicos angulosos	
		AN. Efectos físicos angulosos		AN. Efectos físicos angulosos		AN. Efectos físicos angulosos		AN. Efectos físicos angulosos		AN. Efectos físicos angulosos	
		AO. Efectos físicos angulosos		AO. Efectos físicos angulosos		AO. Efectos físicos angulosos		AO. Efectos físicos angulosos		AO. Efectos físicos angulosos	
		AP. Efectos físicos angulosos		AP. Efectos físicos angulosos		AP. Efectos físicos angulosos		AP. Efectos físicos angulosos		AP. Efectos físicos angulosos	
		AQ. Efectos físicos angulosos		AQ. Efectos físicos angulosos		AQ. Efectos físicos angulosos		AQ. Efectos físicos angulosos		AQ. Efectos físicos angulosos	
		AR. Efectos físicos angulosos		AR. Efectos físicos angulosos		AR. Efectos físicos angulosos		AR. Efectos físicos angulosos		AR. Efectos físicos angulosos	
		AS. Efectos físicos angulosos		AS. Efectos físicos angulosos		AS. Efectos físicos angulosos		AS. Efectos físicos angulosos		AS. Efectos físicos angulosos	
		AT. Efectos físicos angulosos		AT. Efectos físicos angulosos		AT. Efectos físicos angulosos		AT. Efectos físicos angulosos		AT. Efectos físicos angulosos	
		AU. Efectos físicos angulosos		AU. Efectos físicos angulosos		AU. Efectos físicos angulosos		AU. Efectos físicos angulosos		AU. Efectos físicos angulosos	
		AV. Efectos físicos angulosos		AV. Efectos físicos angulosos		AV. Efectos físicos angulosos		AV. Efectos físicos angulosos		AV. Efectos físicos angulosos	
		AW. Efectos físicos angulosos		AW. Efectos físicos angulosos		AW. Efectos físicos angulosos		AW. Efectos físicos angulosos		AW. Efectos físicos angulosos	
		AX. Efectos físicos angulosos		AX. Efectos físicos angulosos		AX. Efectos físicos angulosos		AX. Efectos físicos angulosos		AX. Efectos físicos angulosos	
		AY. Efectos físicos angulosos		AY. Efectos físicos angulosos		AY. Efectos físicos angulosos		AY. Efectos físicos angulosos		AY. Efectos físicos angulosos	
		AZ. Efectos físicos angulosos		AZ. Efectos físicos angulosos		AZ. Efectos físicos angulosos		AZ. Efectos físicos angulosos		AZ. Efectos físicos angulosos	
		BA. Efectos físicos angulosos		BA. Efectos físicos angulosos		BA. Efectos físicos angulosos		BA. Efectos físicos angulosos		BA. Efectos físicos angulosos	
		BB. Efectos físicos angulosos		BB. Efectos físicos angulosos		BB. Efectos físicos angulosos		BB. Efectos físicos angulosos		BB. Efectos físicos angulosos	
		BC. Efectos físicos angulosos		BC. Efectos físicos angulosos		BC. Efectos físicos angulosos		BC. Efectos físicos angulosos		BC. Efectos físicos angulosos	
		BD. Efectos físicos angulosos		BD. Efectos físicos angulosos		BD. Efectos físicos angulosos		BD. Efectos físicos angulosos		BD. Efectos físicos angulosos	
		BE. Efectos físicos angulosos		BE. Efectos físicos angulosos		BE. Efectos físicos angulosos		BE. Efectos físicos angulosos		BE. Efectos físicos angulosos	
		BF. Efectos físicos angulosos		BF. Efectos físicos angulosos		BF. Efectos físicos angulosos		BF. Efectos físicos angulosos		BF. Efectos físicos angulosos	
		BG. Efectos físicos angulosos		BG. Efectos físicos angulosos		BG. Efectos físicos angulosos		BG. Efectos físicos angulosos		BG. Efectos físicos angulosos	
		BH. Efectos físicos angulosos		BH. Efectos físicos angulosos		BH. Efectos físicos angulosos		BH. Efectos físicos angulosos		BH. Efectos físicos angulosos	
		BI. Efectos físicos angulosos		BI. Efectos físicos angulosos		BI. Efectos físicos angulosos		BI. Efectos físicos angulosos		BI. Efectos físicos angulosos	
		BJ. Efectos físicos angulosos		BJ. Efectos físicos angulosos		BJ. Efectos físicos angulosos		BJ. Efectos físicos angulosos		BJ. Efectos físicos angulosos	
		BK. Efectos físicos angulosos		BK. Efectos físicos angulosos		BK. Efectos físicos angulosos		BK. Efectos físicos angulosos		BK. Efectos físicos angulosos	
		BL. Efectos físicos angulosos		BL. Efectos físicos angulosos		BL. Efectos físicos angulosos		BL. Efectos físicos angulosos		BL. Efectos físicos angulosos	
		BM. Efectos físicos angulosos		BM. Efectos físicos angulosos		BM. Efectos físicos angulosos		BM. Efectos físicos angulosos		BM. Efectos físicos angulosos	
		BN. Efectos físicos angulosos		BN. Efectos físicos angulosos		BN. Efectos físicos angulosos		BN. Efectos físicos angulosos		BN. Efectos físicos angulosos	
		BO. Efectos físicos angulosos		BO. Efectos físicos angulosos		BO. Efectos físicos angulosos		BO. Efectos físicos angulosos		BO. Efectos físicos angulosos	
		BP. Efectos físicos angulosos		BP. Efectos físicos angulosos		BP. Efectos físicos angulosos		BP. Efectos físicos angulosos		BP. Efectos físicos angulosos	
		BQ. Efectos físicos angulosos		BQ. Efectos físicos angulosos		BQ. Efectos físicos angulosos		BQ. Efectos físicos angulosos		BQ. Efectos físicos angulosos	
		BR. Efectos físicos angulosos		BR. Efectos físicos angulosos		BR. Efectos físicos angulosos		BR. Efectos físicos angulosos		BR. Efectos físicos angulosos	
		BS. Efectos físicos angulosos		BS. Efectos físicos angulosos		BS. Efectos físicos angulosos		BS. Efectos físicos angulosos		BS. Efectos físicos angulosos	
		BT. Efectos físicos angulosos		BT. Efectos físicos angulosos		BT. Efectos físicos angulosos		BT. Efectos físicos angulosos		BT. Efectos físicos angulosos	
		BU. Efectos físicos angulosos		BU. Efectos físicos angulosos		BU. Efectos físicos angulosos		BU. Efectos físicos angulosos		BU. Efectos físicos angulosos	
		BV. Efectos físicos angulosos		BV. Efectos físicos angulosos		BV. Efectos físicos angulosos		BV. Efectos físicos angulosos		BV. Efectos físicos angulosos	
		BW. Efectos físicos angulosos		BW. Efectos físicos angulosos		BW. Efectos físicos angulosos		BW. Efectos físicos angulosos		BW. Efectos físicos angulosos	
		BX. Efectos físicos angulosos		BX. Efectos físicos angulosos		BX. Efectos físicos angulosos		BX. Efectos físicos angulosos		BX. Efectos físicos angulosos	
		BY. Efectos físicos angulosos		BY. Efectos físicos angulosos		BY. Efectos físicos angulosos		BY. Efectos físicos angulosos		BY. Efectos físicos angulosos	
		BZ. Efectos físicos angulosos		BZ. Efectos físicos angulosos		BZ. Efectos físicos angulosos		BZ. Efectos físicos angulosos		BZ. Efectos físicos angulosos	
		CA. Efectos físicos angulosos		CA. Efectos físicos angulosos		CA. Efectos físicos angulosos		CA. Efectos físicos angulosos		CA. Efectos físicos angulosos	
		CB. Efectos físicos angulosos		CB. Efectos físicos angulosos		CB. Efectos físicos angulosos		CB. Efectos físicos angulosos		CB. Efectos físicos angulosos	
		CC. Efectos físicos angulosos		CC. Efectos físicos angulosos		CC. Efectos físicos angulosos		CC. Efectos físicos angulosos		CC. Efectos físicos angulosos	
		CD. Efectos físicos angulosos		CD. Efectos físicos angulosos		CD. Efectos físicos angulosos		CD. Efectos físicos angulosos		CD. Efectos físicos angulosos	
		CE. Efectos físicos angulosos		CE. Efectos físicos angulosos		CE. Efectos físicos angulosos		CE. Efectos físicos angulosos		CE. Efectos físicos angulosos	
		CF. Efectos físicos angulosos		CF. Efectos físicos angulosos		CF. Efectos físicos angulosos		CF. Efectos físicos angulosos		CF. Efectos físicos angulosos	
		CG. Efectos físicos angulosos		CG. Efectos físicos angulosos		CG. Efectos físicos angulosos		CG. Efectos físicos angulosos		CG. Efectos físicos angulosos	
		CH. Efectos físicos angulosos		CH. Efectos físicos angulosos		CH. Efectos físicos angulosos		CH. Efectos físicos angulosos		CH. Efectos físicos angulosos	
		CI. Efectos físicos angulosos		CI. Efectos físicos angulosos		CI. Efectos físicos angulosos		CI. Efectos físicos angulosos		CI. Efectos físicos angulosos	
		CJ. Efectos físicos angulosos		CJ. Efectos físicos angulosos		CJ. Efectos físicos angulosos		CJ. Efectos físicos angulosos		CJ. Efectos físicos angulosos	
		CK. Efectos físicos angulosos		CK. Efectos físicos angulosos		CK. Efectos físicos angulosos		CK. Efectos físicos angulosos		CK. Efectos físicos angulosos	
		CL. Efectos físicos angulosos		CL. Efectos físicos angulosos		CL. Efectos físicos angulosos		CL. Efectos físicos angulosos		CL. Efectos físicos angulosos	
		CM. Efectos físicos angulosos		CM. Efectos físicos angulosos		CM. Efectos físicos angulosos		CM. Efectos físicos angulosos		CM. Efectos físicos angulosos	
		CN. Efectos físicos angulosos		CN. Efectos físicos angulosos		CN. Efectos físicos angulosos		CN. Efectos físicos angulosos		CN. Efectos físicos angulosos	
		CO. Efectos físicos angulosos		CO. Efectos físicos angulosos		CO. Efectos físicos angulosos		CO. Efectos físicos angulosos		CO. Efectos físicos angulosos	
		CP. Efectos físicos angulosos		CP. Efectos físicos angulosos		CP. Efectos físicos angulosos		CP. Efectos físicos angulosos		CP. Efectos físicos angulosos	
		CQ. Efectos físicos angulosos		CQ. Efectos físicos angulosos		CQ. Efectos físicos angulosos		CQ. Efectos físicos angulosos		CQ. Efectos físicos angulosos	
		CR. Efectos físicos angulosos		CR. Efectos físicos angulosos		CR. Efectos físicos angulosos		CR. Efectos físicos angulosos		CR. Efectos físicos angulosos	
		CS. Efectos físicos angulosos		CS. Efectos físicos angulosos		CS. Efectos físicos angulosos		CS. Efectos físicos angulosos		CS. Efectos físicos angulosos	
		CT. Efectos físicos angulosos		CT. Efectos físicos angulosos		CT. Efectos físicos angulosos		CT. Efectos físicos angulosos		CT. Efectos físicos angulosos	
		CU. Efectos físicos angulosos		CU. Efectos físicos angulosos		CU. Efectos físicos angulosos		CU. Efectos físicos angulosos		CU. Efectos físicos angulosos	
		CV. Efectos físicos angulosos		CV. Efectos físicos angulosos		CV. Efectos físicos angulosos		CV. Efectos físicos angulosos		CV. Efectos físicos angulosos	
		CW. Efectos físicos angulosos		CW. Efectos físicos angulosos		CW. Efectos físicos angulosos		CW. Efectos físicos angulosos		CW. Efectos físicos angulosos	
		CX. Efectos físicos angulosos		CX. Efectos físicos angulosos		CX. Efectos físicos angulosos		CX. Efectos físicos angulosos		CX. Efectos físicos angulosos	
		CY. Efectos físicos angulosos		CY. Efectos físicos angulosos		CY. Efectos físicos angulosos		CY. Efectos físicos angulosos		CY. Efectos físicos angulosos	
		CZ. Efectos físicos angulosos		CZ. Efectos físicos angulosos		CZ. Efectos físicos angulosos		CZ. Efectos físicos angulosos		CZ. Efectos físicos angulosos	
		DA. Efectos físicos angulosos		DA. Efectos físicos angulosos		DA. Efectos físicos angulosos		DA. Efectos físicos angulosos		DA. Efectos físicos angulosos	
		DB. Efectos físicos angulosos		DB. Efectos físicos angulosos		DB. Efectos físicos angulosos		DB. Efectos físicos angulosos		DB. Efectos físicos angulosos	
		DC. Efectos físicos angulosos		DC. Efectos físicos angulosos		DC. Efectos físicos angulosos		DC. Efectos físicos angulosos		DC. Efectos físicos angulosos	
		DD. Efectos físicos angulosos		DD. Efectos físicos angulosos		DD. Efectos físicos angulosos		DD. Efectos físicos angulosos		DD. Efectos físicos angulosos	
		DE. Efectos físicos angulosos		DE. Efectos físicos angulosos		DE. Efectos físicos angulosos		DE. Efectos físicos angulosos		DE. Efectos físicos angulosos	
		DF. Efectos físicos angulosos		DF. Efectos físicos angulosos		DF. Efectos físicos angulosos		DF. Efectos físicos angulosos		DF. Efectos físicos angulosos	
		DG. Efectos físicos angulosos		DG. Efectos físicos angulosos		DG. Efectos físicos angulosos		DG. Efectos físicos angulosos		DG. Efectos físicos angulosos	
		DH. Efectos físicos angulosos		DH. Efectos físicos angulosos		DH. Efectos físicos angulosos		DH. Efectos físicos angulosos		DH. Efectos físicos angulosos	
		DI. Efectos físicos angulosos		DI. Efectos físicos angulosos		DI. Efectos físicos angulosos		DI. Efectos físicos angulosos		DI. Efectos físicos angulosos	
		DJ. Efectos físicos angulosos		DJ. Efectos físicos angulosos		DJ. Efectos físicos angulosos		DJ. Efectos físicos angulosos		DJ. Efectos físicos angulosos	
		DK. Efectos físicos angulosos		DK. Efectos físicos angulosos		DK. Efectos físicos angulosos		DK. Efectos físicos angulosos		DK. Efectos físicos angulosos	
		DL. Efectos físicos angulosos		DL. Efectos físicos angulosos		DL. Efectos físicos angulosos		DL. Efectos físicos angulosos		DL. Efectos físicos angulosos	
		DM. Efectos físicos angulosos		DM. Efectos físicos angulosos		DM. Efectos físicos angulosos		DM. Efectos físicos angulosos		DM. Efectos físicos angulosos	
		DN. Efectos físicos angulosos		DN. Efectos físicos angulosos		DN. Efectos físicos angulosos		DN. Efectos físicos angulosos		DN. Efectos físicos angulosos	
		DO. Efectos físicos angulosos		DO. Efectos físicos angulosos		DO. Efectos físicos angulosos		DO. Efectos físicos angulosos		DO. Efectos físicos angulosos	
		DP. Efectos físicos angulosos		DP. Efectos físicos angulosos		DP. Efectos físicos angulosos		DP. Efectos físicos angulosos		DP. Efectos físicos angulosos	
		DQ. Efectos físicos angulosos		DQ. Efectos físicos angulosos		DQ. Efectos físicos angulosos		DQ. Efectos físicos angulosos		DQ. Efectos físicos angulosos	
		DR. Efectos físicos angulosos		DR. Efectos físicos angulosos		DR. Efectos físicos angulosos		DR. Efectos físicos angulosos		DR. Efectos físicos angulosos	
		DS. Efectos físicos angulosos		DS. Efectos físicos angulosos		DS. Efectos físicos angulosos		DS. Efectos físicos angulosos		DS. Efectos físicos angulosos	
		DT. Efectos físicos angulosos		DT. Efectos físicos angulosos		DT. Efectos físicos angulosos		DT. Efectos físicos angulosos		DT. Efectos físicos angulosos	
		DU. Efectos físicos angulosos		DU. Efectos físicos angulosos		DU. Efectos físicos angulosos		DU. Efectos físicos angulosos		DU. Efectos físicos angulosos	
		DV. Efectos físicos angulosos		DV. Efectos físicos angulosos		DV. Efectos físicos angulosos		DV. Efectos físicos angulosos		DV. Efectos físicos angulosos	
		DW. Efectos físicos angulosos		DW. Efectos físicos angulosos		DW. Efectos físicos angulosos		DW. Efectos físicos angulosos		DW. Efectos físicos angulosos	
		DX. Efectos físicos angulosos		DX. Efectos físicos angulosos		DX. Efectos físicos angulosos		DX. Efectos físicos angulosos		DX.	

a sus parámetros físicoquímicos (-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 (Igeo  $\leq$  3.14), Pb (Igeo  $\leq$  2.22), Cr (Igeo  $\leq$  3.31) y Cu (Igeo  $\leq$  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

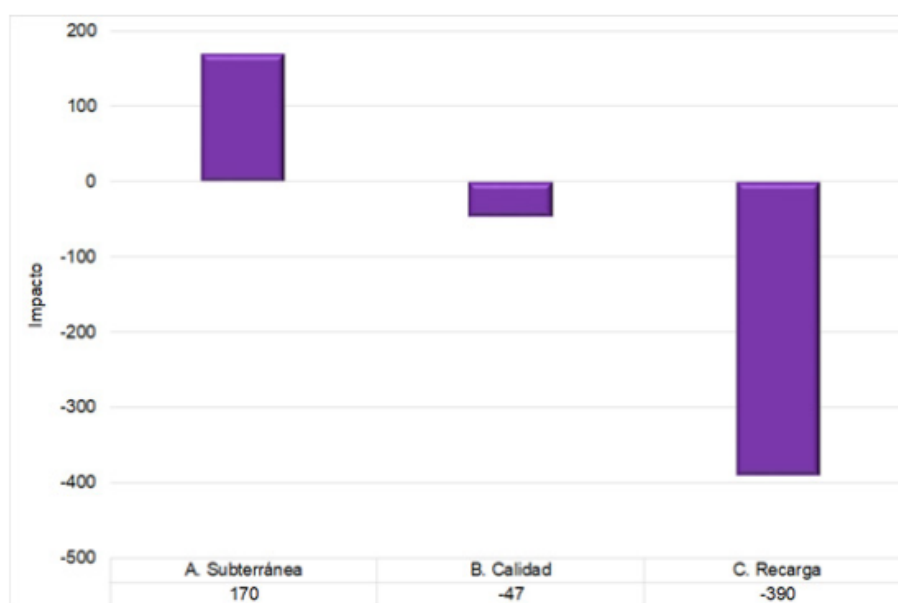


FIGURA 5  
Impacto de los RSU en la calidad del agua

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 físicoquímica 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  $1 \times 10^{-5}$  a  $1 \times 10^{-6}$ , 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

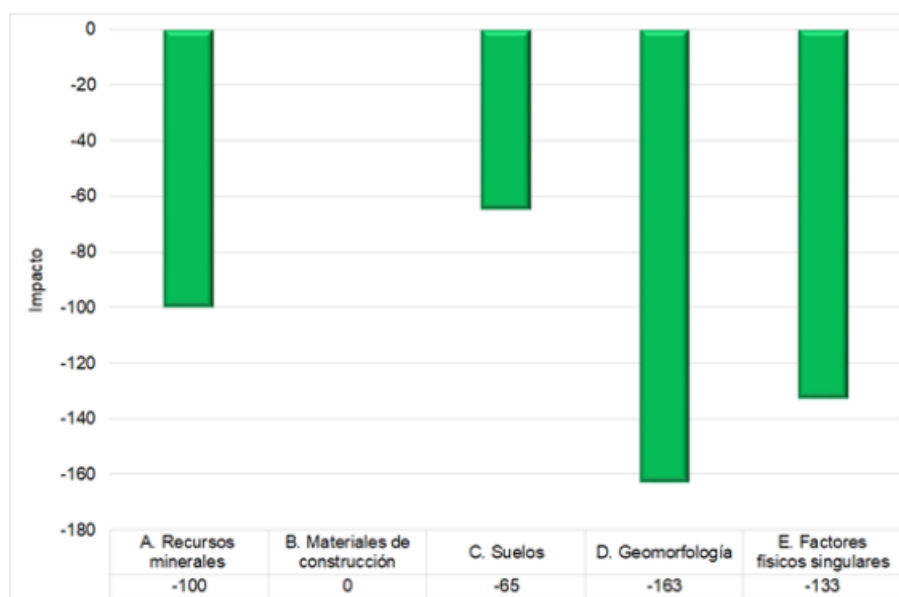


FIGURA 6  
Impacto de los RSU en el suelo

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<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>) 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<sup>3</sup> de cociente de equivalencia tóxica (TEQ)) en comparación con después de que se extinguió el fuego (0.003 pg/m<sup>3</sup> 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

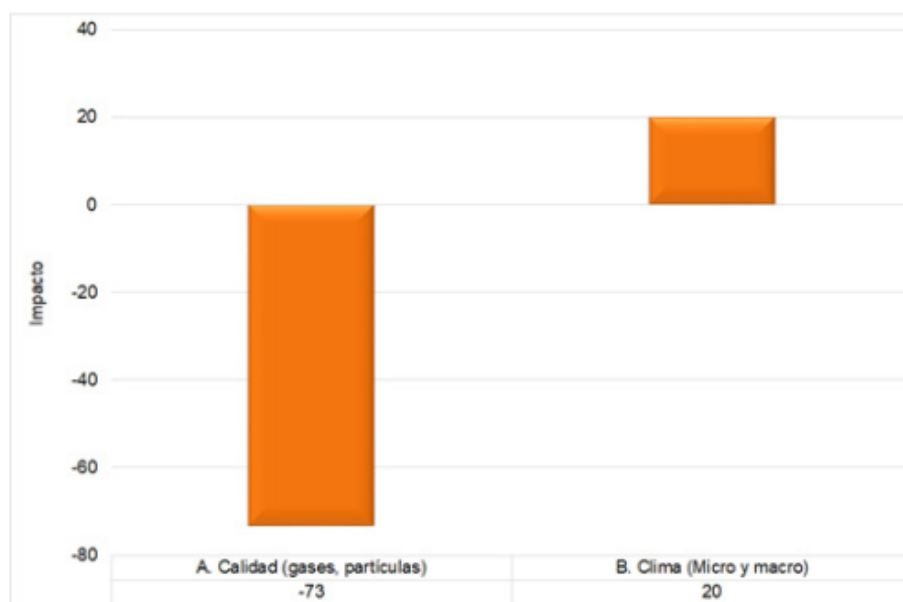


FIGURA 7  
Impactos de los RSU en el aire

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<sub>3</sub> 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

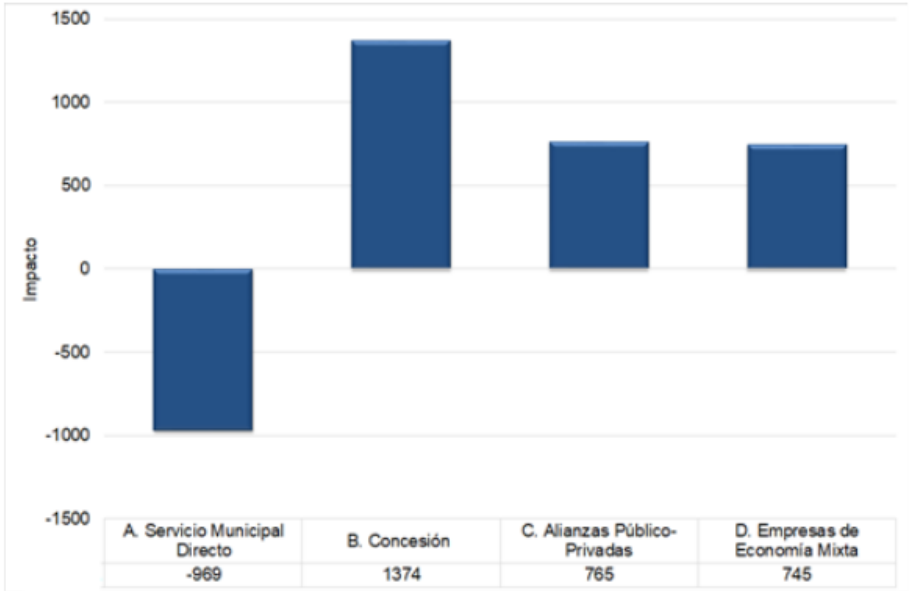


FIGURA 9  
Impactos ambientales asociados al método de gestión de RSU

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 donde 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

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.

**TABLA 6**  
Ventajas y desventajas de los métodos de gestión de RSU

#### 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&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382015000200001&script=sci_arttext&tlng=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- calcáreo. *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