

**Predicción de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios
de Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Santa Clara
Cuba**

Prediction of leachate generation in sanitary landfills of Urban Solid
Waste in Santa Clara city. Cuba

Maria Elena López-Vega^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-0483-6716>

Surey Ramírez-González¹ <https://orcid.org/0000-0002-5900-5442>

Ronaldo Santos-Herrero² <https://orcid.org/0000-0002-5009-2084>

¹Centro de Estudio de Química Aplicada. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Villa Clara, Cuba

²Departamento de Ingeniería Química. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Villa Clara, Cuba

*Autor para correspondencia: correo electrónico: marialv@uclv.edu.cu

RESUMEN

Un aspecto importante dentro de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos es el conocimiento de las características de los lixiviados en cuanto a parámetros físico-químicos, así como a volúmenes generados. Todo esto contribuye en muchos casos a la toma de decisiones para futuros proyectos de rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de lixiviados. Tal es el caso de la ciudad de Santa Clara, donde no se cuenta con un relleno sanitario controlado, aunque si existen planes para su construcción. Por tal motivo se realizó la estimación del cálculo de la generación de lixiviados y de la Carga Contaminante (CC) empleando el Método

Suizo, el cual se basa en datos de composición de los residuos, suelo y área del relleno, así como climatológicos. Los resultados muestran caudales que pueden fluctuar entre (8500-130000) m³/mes, con Cargas Contaminantes (CC) entre (60-100) kg/h. Los resultados son de gran ayuda para el futuro diseño y construcción del sitio de disposición final de residuos urbanos y de la planta de tratamiento de lixiviados.

Palabras clave: lixiviados; carga contaminante; rellenos sanitarios.

ABSTRACT

An important aspect of Urban Solid Waste Management is the knowledge of the characteristics of the leachates in terms of physical-chemical parameters, as well as volumes generated. All this contributes in many cases to the decision making for future landfill projects and leachate treatment plants. Such is the case of the city of Santa Clara, where there is no controlled landfill, although there are plans for its construction. For this reason, the estimation of leachate generation and the Pollutant Load (PL) was calculated using the Swiss Method, which is based on data on the composition of the waste, soil of the landfill area, as well as climatological data. The results show flow rates that can fluctuate between (8500-130000) m³ / month, with Pollutant Load (PL) between (60-100) kg / h. The results are of great help for the future design and construction of the final disposal site for urban waste and the leachate treatment plant.

Keywords: leachate; pollutant load; landfill.

Recibido: 20/04/2020

Aceptado: 15/08/2020

Introducción

Los problemas ambientales devenidos de la incorrecta gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) sigue siendo un desafío para las sociedades modernas. Las deficientes técnicas de manejo de dichos residuos crean la necesidad de desarrollar sistemas de gestión adecuados desde el punto de vista ambiental, social y económico.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (**CEPAL**), dependiente de la Organización de Naciones Unidas (**ONU**), estimó que la región superará los 650 millones de habitantes en el año 2020. Para 2025, la institución calcula que la cifra aumentará hasta los 679,8 millones de personas tras haber comenzado el milenio en 512,2 millones. Esto representaría un crecimiento de 133%. En 2010, la población rondaba los 584,8 millones. Todo este crecimiento poblacional trae consigo además una mayor generación de residuos domésticos, por lo que hay que tener muy en cuenta esta creciente urbanización de América Latina y el Caribe. ⁽¹⁾

En la gestión de residuos urbanos se hace necesario conocer el impacto presente y futuro que trae consigo la propia generación de los mismos, así como los impactos de la no gestión y deficiente disposición final. Las estimaciones en las que no se tenga en cuenta las características de la generación de residuos pueden dar lugar a la superación de la capacidad de las plantas de tratamiento de residuos con el consiguiente encarecimiento económico. ⁽²⁾

El análisis Sectorial de Residuos Sólidos para Cuba determinó que uno de los problemas más importantes del Manejo de Residuos Sólidos es precisamente la disposición final. En estos momentos se cuenta con alrededor de 200 rellenos sanitarios manuales, pocas plantas de reciclaje, un gran número de vertederos a cielo abierto, sitios de disposición final donde los residuos son tapados sin existir impermeabilización y vertederos donde se continúa la quema de residuos sin ningún control. ⁽³⁾

En el país aproximadamente el 60 % de los residuos sólidos que se generan corresponden a la fracción orgánica. Esta fracción se considera una de las más contaminantes, principal generadora de lixiviados y de gases como el metano. Los daños que provocan estos residuos en el medio ambiente pueden ser mitigados en gran medida si se tratan mediante métodos biológicos aerobios o anaerobios, para así disminuir la contaminación que provocan. ⁽⁴⁾

Los rellenos sanitarios han sido ampliamente usados en el mundo, aunque su tendencia es a ir desapareciendo, debido a la baja disponibilidad de suelos, así como a la cada vez más costosa tecnología para la impermeabilización de los mismos con vistas al tratamiento de los lixiviados y para el control del gas metano; el que resulta 23 veces más contaminante que el CO₂.⁽⁵⁾

Los desechos sólidos enterrados en el relleno sanitario están sometidos a un número de cambios biológicos, físicos y químicos simultáneos. La degradación biológica de los componentes orgánicos empieza en condiciones aeróbicas, consumiendo el aire atrapado dentro del relleno; al agotarse el oxígeno, la descomposición a largo plazo sigue bajo condiciones anaerobias. La degradación de los residuos está influida por el grado de compactación, la composición de los Residuos Sólidos Municipales, la humedad, y la temperatura; la tasa de producción de gases es el principal indicador de las reacciones biológicas en un relleno sanitario.

Una vez se han enterrado los residuos sólidos es necesario minimizar los impactos de esta práctica. Para empezar, el agua que ha entrado en contacto con la basura recoge gran cantidad de las sustancias que originalmente estaban dentro del residuo, quedando de esa manera altamente contaminada. Esta agua se denomina lixiviado, y es uno de los líquidos más contaminados y contaminantes que se conozcan. ⁽⁶⁾

De no recogerse adecuadamente y luego tratarse, el lixiviado puede contaminar a su vez aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos. Por esta razón, y para evitar que esto ocurra, los rellenos sanitarios se impermeabilizan, se drenan

apropiadamente y los lixiviados recogidos por estos drenes deben ser tratados. Todo esto evidencia la importancia que se le debe dar a estimar la posible generación de lixiviados en rellenos que están por construirse y a su vez, tener datos para la selección adecuada del método de tratamiento de los lixiviados.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Cálculo de la generación de lixiviado o percolado

Teniendo en cuenta las características climatológicas que aparecen reportadas en la literatura referente a las precipitaciones en la zona del vertedero principal de la ciudad de Santa Clara y también considerando el área del mismo, se realizó la estimación del cálculo de la generación de lixiviados teniendo en cuenta las precipitaciones anuales y mensuales, para el mes más y menos lluvioso.⁽⁷⁾

El volumen de lixiviado o líquido percolado en un relleno sanitario depende de los siguientes factores:

- Precipitación pluvial en el área del relleno.
- Escorrentía superficial y/o infiltración subterránea.
- Evapotranspiración.
- . Humedad natural de los residuos depositados en el mismo.
- Grado de compactación
- Capacidad de campo (capacidad del suelo y de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) para retener humedad).

El volumen de lixiviado está fundamentalmente en función de la precipitación pluvial. No solo la escorrentía puede generarlo, también las lluvias que caen en el área del relleno hacen que su cantidad aumente, ya sea por la precipitación directa sobre los residuos depositados o por el aumento de infiltración a través

de las grietas en el terreno. Debido a las diferentes condiciones de operación y localización de cada relleno, las tasas esperadas pueden variar; de ahí que deban ser calculadas para cada caso en particular.

Dado que resulta difícil obtener información local sobre los datos climatológicos, se suelen utilizar coeficientes que correlacionan los factores antes mencionados con el fin de precisar el volumen de lixiviado producido.

El Método Suizo⁽⁷⁾ por ejemplo, permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de lixiviado o líquido percolado mediante la ecuación:

$$Q = \frac{1}{t} P \times A \times K \quad (1)$$

donde

Q = Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (L/s)

P = Precipitación media anual (mm/año)

A = Área superficial del relleno (m²)

t = Número de segundos en un año (31 536 000 s/año)

K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura, cuyos valores recomendados son los siguientes:

- Para rellenos débilmente compactados con peso específico de 0,4 a 0,7 t/m³, se estima una producción de lixiviado entre 25 y 50% (k = 0,25 a 0,50) de precipitación media anual correspondiente al área del relleno.
- Para rellenos fuertemente compactados con peso específico > 0,7 t/m³, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25 % (k = 0,15 a 0,25) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Cálculo de la carga contaminante

La carga contaminante para descargas líquidas es un parámetro muy usado en el seguimiento y evaluación de residuales líquidos no domésticos. Este parámetro puede ser determinado mediante la siguiente ecuación.

Carga Contaminante: CC (k/h)

$$CC = \left[\frac{2.DBO_5 + DQO}{3} + SST \right] \times Q/1000 \quad (2)$$

DBO₅ = Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)

DQO = Demanda Química de Oxígeno (mg/L)

SST = Sólidos Suspendidos (mg/L)

Q = Caudal (m³/h)

Para tener alguna aproximación estimada de la carga contaminante que pueda estar generándose en el vertedero, se toman los valores de DQO y DBO₅ máxima, media y mínima para cada reactor y se calcula la carga contaminante (CC), teniendo en cuenta el caudal estimado.

Resultados y discusión

Resultados del cálculo de la generación de lixiviado o percolado

Cálculo para la media anual de precipitaciones:

$$Q = \frac{1}{t} P \times A \times K \quad (3)$$

P = 1311 mm/año

A = 25 ha = 250 000 m² (esta es el área total del vertedero, que no está aún usada totalmente, por lo que se recomienda obtener el dato concreto del área que se encuentra en uso)

K = 0,25 (compactación entre 0,4-0,7 t/m³)

t = 3 153 6 000 s/año

Q = 2,6 L/s de lixiviados = 7,13 m³/h

Cálculos teniendo en cuenta los meses de mayores precipitaciones y los de menos.

Mayor precipitación: mayo con un promedio de 220 mm.

Se usa la siguiente formula:

$$Q_{lm} = P \times A \times K \quad (4)$$

Q_{lm} = Caudal medio de lixiviado generado (m^3/mes)

P_m = Precipitación máxima mensual (mm/mes) = 220 mm/mes = 2,13 m

A = Área superficial del relleno (m^2) = 250 000 m^2

K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura = 0,25

1 m = 1000 mm

$Q_{lm} = 133125 m^3/mes$ (lluvioso)

El caudal medio de lixiviado generado en un mes lluvioso estaría en el orden de los 130 000 m^3/mes .

Menor precipitación: febrero, periodo seco con aproximadamente 15 mm/mes = 0,14 m/mes , aplicando la ecuación anterior se obtiene:

$Q_{lm} = 8750 m^3/mes$ (seco)

Es importante destacar que estos cálculos son solo una aproximación y suponiendo el máximo caudal de lixiviados a obtener, según las condiciones climatológicas. Es evidente que los valores reales estarían por debajo de estos valores. Los cálculos más cercanos a la realidad necesitan datos climatológicos y demográficos del terreno; así como otros estudios en los residuos que en estos momentos no se disponen.

Resultados del cálculo de la carga contaminante

Para tener alguna aproximación estimada de la carga contaminante que pueda estar generándose en el vertedero, se toman los valores de DQO y DBO_5 máxima, media y mínima para cada reactor y se calcula la Carga Contaminante (CC), teniendo en cuenta el caudal estimado (tablas 1,2 y 3).

Los datos de las variables físico-químicas utilizadas corresponden a trabajos realizados con anterioridad, donde se evaluó un diseño de experimentos con el

empleo de 4 reactores, para simular rellenos sanitarios y sus lixiviados. En este diseño de experimentos se evaluó el empleo del suelo como material de cobertura, así como la recirculación de lixiviados. ⁽⁸⁾

Q = 2,6 L/s de lixiviados = 7,13 m³/h

Tabla 1- Estimación de la CC para reactores R1 y R2

Reactor (R1)				Reactor (R2)			
	Max	Media	Minima		Max	Media	Minima
DQO (mg/L)	45 600	14 950	4000	DQO (mg/L)	59 500	19 430	2100
DBO ₅ (mg/L)	27 230	5980	800	DBO ₅ (mg/L)	35 700	7780	420
SST (mg/L)	4100,2	2530	1200	SST (mg/L)	4500,3	2621	900
CC (kg/h)	267,04	81,65	21,77	CC (kg/h)	341,7	101,4	13,34

Tabla 2- Estimación de la CC para reactores R3 y R4

Reactor (R3)				Reactor (R4)			
	Max	Media	Minima		Max	Media	Minima
DQO (mg/L)	39 700	13 800	6000	DQO (mg/L)	56 000	15 760	3000
DBO ₅ (mg/L)	23 820	5520	1200	DBO ₅ (mg/L)	33 600	6300	600
SST (mg/L)	3200	2250	1360	SST (mg/L)	4153	1500	1020
CC (kg/h)	229,42	61,34	29,53	CC (kg/h)	321	77,7	17,18

Tabla 3- Resumen de la CC estimada para cada reactor

CC (kg/h)			
Reactor	max	media	mínima
R1	267,04	81,65	21,77
R2	341,7	101,4	13,34
R3	299,42	61,34	29,53
R4	321	77,7	17,18

Con los cálculos realizados se puede estimar que en todo el periodo de explotación máxima del vertedero, así como varios años luego de la clausura, la carga contaminante en los lixiviados puede fluctuar entre aproximadamente 10-300 kg/h. Este rango resulta muy variable, pero demuestra que para cualquiera de los escenarios posibles los lixiviados provocarían severos impactos ambientales sobre las fuentes de abasto de aguas superficiales y subterráneas, con disminuciones considerables del oxígeno disuelto en las mismas, lo que demuestra la necesidad de someterlos a procesos de tratamiento para lograr reducir su Carga Contaminante. ⁽⁹⁾

Existen varias opciones de tratamiento, las que incluyen procesos físicos, químicos, biológicos y combinaciones de estos. ⁽¹⁰⁾ Sin embargo, esta elección dependerá en gran medida de las características específicas del lixiviado a tratar, así como de los resultados de estudios de factibilidad económica y ambiental.

Conclusiones

- 1- La estimación de la generación de lixiviados teniendo en cuenta las características en la generación de Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Santa Clara, así como las características climatológicas muestra volúmenes que pueden fluctuar entre (8500-130 000) m³/mes.
- 2- Los cálculos de la Carga Contaminante (CC) muestran valores entre (60-100) kg/h en los 4 reactores estudiados, lo cual evidencia la necesidad de diseñar y construir sistemas de tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos

en los cuales se traten de forma efectivas los lixiviados y se proteja el medio ambiente.

- 3- La estimación de la generación de lixiviados, así como los cálculos de la CC resultan de gran utilidad para la toma de decisiones en el diseño de futuros rellenos sanitarios y plantas de tratamientos de lixiviados a construirse en la zona.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al editor y a los árbitros por sus comentarios, al Proyecto “Educación Ambiental y Tecnologías más limpias”, dentro del programa de cooperación entre la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba y las Universidades Flamencas de Bélgica (VLIR-UCLV). Un especial agradecimiento al Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Oviedo.

Referencias bibliográficas

1. CEPAL. *Panorama social de América Latina* [en línea]. Naciones Unidas, 2018. [Consultado 3 enero de 2019]. Disponible en:https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44969/5/S1901133_es.pdf.
2. CHRIST, O. Mathematical modeling of the hydrolysis of anaerobic processes. *Water Science and Technology* [en línea]. 2007,**41**(3). 61-65. [consultado 10 de julio de 2011].DOI: 1 0.2166/wst.2000.0056.
3. DELGADO, J. Relleno sanitario manual. Solución a la disposición final en poblaciones hasta 20 mil habitantes. Experiencia Cubana. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental* [en línea].[consultado 12 de julio de 2012] .
4. GONZÁLEZ RODRIGUES, Y. Situación actual de la producción de lixiviados en los vertederos provinciales de ciudad de la Habana. Impacto Ambiental y propuesta de sistemas de tratamiento. *Medio Ambiente y desarrollo, Revista*

Electrónica de la Agencia de Medioambiente, Cuba.2005, **5** (9). [Consultado 12 de enero de 2018]. ISSN: 1683-8904.

5. GUERECA HERNÁNDEZ, L. *Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*. Tesis doctoral inédita. Universidad Politécnica de Cataluña. 2006. <http://hdl.handle.net/10803/6846>

6. MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, C. Impacto ambiental provocado por efluentes de instalaciones de biogás de pequeña y mediana escala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*.2017, **26** (4). [consultado 4 de enero 2018]. ISSN: 2071-0054.

7. *Anuario Estadístico de Cuba 2010* [en línea]. [Consultado 11 septiembre 2012]. Disponible en: http://www.onei.gob.cu/sites/default/files/03_poblacion_2012_sitio.pdf

8. RENOU, S., GIVAUDAN, J. G., POULAIN, S., DIRASOULLAN, F., & MOULIN, P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of hazardous materials*. 2017, **150** (3), pp. 61-65. [consultado 12 de enero de 2018]

9. LÓPEZ VEGA, M., SANTOS-HERRERO, R. La recirculación de lixiviados de rellenos sanitarios en biodigestores a escala de laboratorio. *Tecnología Química*. 2017, **37**(3), pp.470-483. [consultado 25 de enero de 2018]. ISSN: 2224-6185.

10. HYOHAK, S., WILLIAM, P. Cellulose hydrolysis by a methanogenic culture enriched from landfill waste in semi continuous reactor. *Bioresource technology*.2009, **100** (3), pp.1268-1273.ISSN: 0960-8524

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

MSc. Maria Elena López-Vega: trabajo experimental y confección del informe.

MSc. Surey Ramírez González: procesamiento estadístico.

Dr. Ronaldo Santos-Herrero: revisión informe final.