

Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales, Pinar del Río

Estimation of the average flow of leachate generated in the municipal landfill of Viñales, Pinar del Río

Javier Pozo Bejerano*

*Máster en Ingeniería Ambiental, Especialista para la Ciencia, la Tecnología y el Medio Ambiente del Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales de Pinar del Río, Cuba, jpozo730912@gmail.com; ID: <https://orcid.org/0000-0001-8135-7164>

José Antonio García Gutiérrez

Doctor en Ciencias Técnicas, Máster en Gestión Ambiental. Especialista en Proyectos e Ingeniería, Empresa Nacional de Investigación Aplicadas de Pinar del Río, Cuba, jagarcia@eniapr.co.cu; ID: <https://orcid.org/0000-0003-1204-9437>

Yoel Vázquez Pérez

Especialista para la Ciencia, la Tecnología y el Medio Ambiente, Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales de Pinar del Río, Cuba, vyoel@ecovida.cu; ID: <https://orcid.org/0000-0001-9933-6185>

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo

Pozo, J., García, J. A. y Vázquez, Y. (2020). Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales, Pinar del Río. *Avances*, 22(3), 325-341. Recuperado de <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/555/1618>

Recibido: 10 de enero de 2020

Aceptado: 14 de mayo de 2020

RESUMEN

La disposición final y gestión de los residuos sólidos en los vertederos, también conocidos como rellenos sanitarios, se han convertido hoy día en una problemática constante para los gobiernos. A lo anterior se adiciona eventualmente un aumento de las lluvias por prolongados períodos, combinado con

el empleo de prácticas deficientes en la captación de las aguas de escorrentía, ocasionando una mayor producción de lixiviados en los sitios de disposición. La generación de lixiviados procedentes de los vertederos clasifica hoy entre los contaminantes más agresivos al medio, principalmente al suelo, y teniendo en

cuenta sus características y composición representan un riesgo potencial para la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. El presente trabajo tiene como objetivo la realización del cálculo de la cantidad de lixiviado generado en el vertedero municipal de Viñales, localizado en la provincia de Pinar del Río, mediante el empleo del modelo Suizo de estimación de lixiviados. A pesar de ser una de las metodologías o modelos de cálculo de generación de lixiviados en rellenos sanitarios más generales, deja de lado aspectos importantes relativos a la capacidad de los residuos de absorber agua. Como resultado, se obtuvo el caudal medio del lixiviado generado (129,6 m³ por mes), según las áreas de influencias de las trincheras proyectadas. También se propuso el método de colección para los lixiviados, así como el sistema de tratamiento a emplear mediante laguna de oxidación.

Palabras clave: residuos sólidos, lixiviados, vertedero, modelo Suizo, tratamiento.

ABSTRACT

The final disposal and management of solid waste in landfills have now become a constant problem for governments. To

this, an increase in rainfall for long periods is added, combined with the use of poor practices in the collection of runoff waters, leading to a greater production of leachate at disposal sites. The generation of leachates from landfills today ranks among the most aggressive pollutants to the environment, mainly to the ground, and taking into account their characteristics and composition represent a potential risk for the contamination of surface and groundwater. This paper aims to perform the calculation of the amount of leachate generated in the municipal landfill of Viñales, located in the province of Pinar del Río, using the Swiss model of leachate estimation. Despite being one of the methodologies or models for calculating leachate generation in more general sanitary landfills, it neglects important aspects related to the ability of waste to absorb water. As a result, the average flow of the leachate generated (129,6 m³ per month) was obtained, according to the areas of influence of the projected trenches. The collection method for leachates was also proposed, as well as the treatment system to be used by oxidation lagoon.

Keywords: solid waste, leachate, landfill, Swiss model, treatment.

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales, producto del desarrollo turístico en Cuba, son cada vez más comunes, lo que ha

generado polémicas, tanto entre gobernantes y profesionales como en la sociedad en general. Los gobiernos

buscan soluciones para satisfacer las necesidades colectivas usando políticas ambientales, mientras que los centros de estudios y universidades realizan investigaciones para la gestión de dicho problema en beneficio de la sociedad. Sin embargo, todos tienen un fin común: el deseo de ver solventados estos problemas.

La contaminación ambiental es hoy una problemática de alcance mundial debido a la creciente generación de desechos sólidos urbanos y su incidencia en el deterioro del entorno natural. Este proceso carece, a nivel de municipio, de un efectivo control, manejo y tratamiento de estos residuos, lo cual se complejiza aún más en las localidades turísticas por las cantidades de acumulación de éstos.

En ese contexto, una reciente investigación se planteó diagnosticar cómo se desarrolla el proceso de gestión de los Residuos Sólidos Reciclables (RSR) en el municipio de Viñales, principal destino turístico de la provincia de Pinar del Río según Alea *et al.* (2019), se constató que el proceso de gestión de los residuos sólidos reciclables que se realiza en el municipio, no cumple con lo establecido para cada una de sus etapas y que su tasa de reciclaje o valorización de residuos, solo cubre el 11,9 % de la cantidad generada, aspectos que originan un impacto negativo medioambiental y paisajístico del municipio. Se determinó, según el diagnóstico aplicado al área objeto de estudio, que existen altas potencialidades en el destino turístico de Viñales para lograr una gestión sostenible de los residuos sólidos reciclables que se

generan el territorio, si se diseñan e implementan herramientas de gestión que contemplen de manera integrada las etapas del ciclo de la gestión de los RSR sobre principios de sostenibilidad, enfocado a la multidimensionalidad de éste, es decir, la gestión con enfoque de racionalidad económica, calidad ambiental, equidad social, viabilidad tecnológica, respeto a la legalidad, a las políticas públicas y a los patrones culturales e históricos (Alea *et al.*, 2019). Los residuos generalmente son dispuestos en espacios denominados botaderos a cielo abierto o rellenos sanitarios. Ambas estructuras generan subproductos denominados lixiviados; estos desechos líquidos se caracterizan por contener elevadas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, así como sales inorgánicas y una gran variedad de microorganismos, con capacidad de migración hacia el subsuelo y a fuentes de agua de los alrededores (Najera-Aguilar *et al.*, 2010; Bautista-Ramírez *et al.*, 2018).

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) prevé la aplicación de normas sanitarias y de mecanismos adecuados para el almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos. Los vertederos a cielo abierto y semicontrolados son los métodos más practicados para la disposición final de los RSU en América Latina y el Caribe, instalaciones que no cumplen las especificaciones técnicas requeridas de un vertedero

sanitario. La calidad de estos sitios de disposición final ha mejorado en los últimos años, aunque todavía no se trata el lixiviado ni se usan membranas sintéticas para su impermeabilización (Pellón *et al.*, 2015). Como plantea Baptista (2017), el proceso de gestión, según el diccionario de la Real Academia Española (RAE), es "el conjunto de operaciones que se realizan para dirigir o administrar un negocio o una empresa." El término gestión ha evolucionado en la medida que el hombre ha avanzado en la consecución de nuevas tecnologías para el mejoramiento de nuevos productos y servicios, y lograr la satisfacción de un mercado en crecimiento y de mayor complejidad.

Generación de lixiviados

En la mayoría de los países iberoamericanos los rellenos sanitarios son el destino final más común de los residuos sólidos urbanos (Espinosa *et al.*, 2010; Bhatt *et al.*, 2016). Uno de los problemas ambientales más significativos asociados con este tipo de instalaciones corresponde a los residuos líquidos generados durante su operación y clausura, los cuales se conocen técnicamente como lixiviados (Noguera y Olivero, 2010; Eljaiek *et al.*, 2013). El lixiviado se ha convertido en uno de los principales desafíos de la ingeniería del tratamiento de residuos líquidos debido a sus elevadas cargas contaminantes (por ejemplo, materia orgánica y metales pesados); por ello destaca como una de las áreas de mayor interés en los rellenos

sanitarios (Fernández *et al.*, 2011; Zafra y Romero, 2019).

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes que se producen como resultado de la percolación del agua a través de los residuos sólidos confinados y también por el metabolismo generado por microorganismos presentes en los residuos dentro del relleno sanitario, los cuales pueden impactar potencialmente la calidad de los mantos freáticos o acuíferos. El líquido lixiviado contiene una cantidad importante de sólidos suspendidos y disueltos, debido a reacciones químicas y bioquímicas, produciéndose inclusive gases como el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y amoníaco (NH₃). Se estima que aun cuando se controle el ingreso de agua pluvial, existirá generación de lixiviados debido a la liberación del agua contenida en los mismos residuos confinados y la generada por actividad microbiana. La composición típica de los lixiviados es variable y dependerá del tipo y composición de los residuos a disponer (Montejo, 2010).

Los lixiviados son subproductos de la operación normal de rellenos sanitarios, que pueden contener una amplia diversidad de contaminantes; las prácticas tradicionales de manejo de los rellenos sanitarios se basan, principalmente, en la caracterización físico-química, debido a su relación con la toxicidad. En general, la composición de los lixiviados depende de la edad de la celda en la que se originan, encontrándose mayores concentraciones

en los lixiviados más jóvenes, en los cuales, la mayoría de mediciones están asociadas con las variables indicadoras de materia orgánica y sólidos; en los lixiviados de mayor edad, las concentraciones medidas y la relación entre las variables disminuyen, siendo necesario caracterizar un mayor número de variables (Torre *et al.*, 2014).

La producción de lixiviados va a depender, fundamentalmente, de diferentes factores, acompañados de un grupo de elementos y componentes que propician las condiciones necesarias para que ocurra la generación (Montejo, 2010):

- *Infiltración de agua:* para la cual influyen elementos como la precipitación pluvial y la cobertura de los residuos sólidos municipales, sujeto a componentes como la ubicación geográfica, época del año, aspectos climatológicos, evaporación, evapotranspiración, espesor de impermeable, tipo de materiales, compactación y pendiente.
- *Características de los residuos:* influye la tipología, para componentes diversos como la composición, humedad y el tamaño y grado de compactación.
- *Actividades microbianas:* consistente en las actividades aerobias y anaerobias, las cuales dependen de

componentes como la naturaleza de los materiales, temperatura, relación carbono/nitrógeno, potencial de hidrógeno (pH) y el contenido de sustancias tóxicas.

- *Operación de relleno:* está compuesta por la eficiencia operativa, como elemento asociado de un grupo de componentes tales como las bermas temporales, obras de desvío de aguas y la cobertura diaria de los residuos sólidos.
- *Intrusión de aguas subterráneas:* la eficiencia operativa es el elemento que lo contiene donde la impermeabilización adecuada es el componente que viene relacionado con éste.

Los valores de los componentes de los lixiviados presentados en la *Tabla 1* están contenidos dentro de unos rangos típicos, que permiten variaciones dependiendo de la edad del sitio de disposición final; sin embargo, la localización geográfica del sitio y los tipos de residuos depositados en el mismo que, a su vez, están ligados a las crecientes actividades comerciales e industriales y a los estilos de vida de cada país, hacen que los valores de estos componentes puedan variar de un país a otro.

Tabla 1. Valores típicos de parámetros de lixiviados que varían con la edad del relleno sanitario.

Parámetro (unidad)	Relleno de reciente creación (menor a 5 años)	Relleno maduro (mayor a 10 años)
DBO5 (mg/L)	2 000 - 30 000	100 - 200
Carbono Orgánico Total (mg/L)	1 500 - 20 000	80 - 160
DQO (mg/L)	3 000 - 60 000	100 - 500
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	200 - 2 000	100 - 400
N-org (mg/L)	10 - 800	80 -120
NO4 (mg/L)	10 - 800	80 - 120
NO3 (mg/L)	10 - 100	5 - 10
P total (mg/L)	5 - 100	5 - 11
Ortofosfato (mg/L)	4 - 80	4 - 8
Alcalinidad (mg/L CaCO3)	1 000 - 10 000	200 – 1 000
pH	4,5 - 7,5	6,6 – 7,5
Dureza total	300 - 10 000	200 - 500
Ca (mg/L)	200 - 3 000	100 - 400
Mg (mg/L)	50 - 1 500	50 - 200
K (mg/L)	200 - 1 000	50 - 400
Na (mg/L)	200 - 2 500	100 - 200
Cl (mg/L)	200 - 3 000	100 - 400
SO4 (mg/L)	50 - 1 000	20 - 50
Fe total (mg/L)	50 - 1 200	20 - 200

Fuente: Tchobanoglous y Kreith (2002).

Los investigadores Renou *et al.* (2008) recopilaron diferentes estudios de caracterización de lixiviados para varios rellenos en diversos países, así como también compilaron los valores encontrados para los principales parámetros de caracterización de lixiviados, los

que se presentan en la *Tabla 2*, evidenciando que la edad del sitio de disposición final y el grado de estabilización de los residuos sólidos tienen un efecto significativo en la composición de los lixiviados.

Tabla 2. Caracterización de lixiviados en distintos países.

Edad	Ubicación del sitio	DOO (mg/L)	DBO (mg/L)	DBO/DOO (mg/L)	pH	SS (mg/L)	NTK	NH3-N (mg/L)
J	Canadá	13 800	9 600	0,7	5,8		212	42
J	Canadá	1 870	90	0,05	6,6		75	10
J	China, Hong Kong	15 700	4 200	0,27	7,7		2 260	2 260
J	China, Hong Kong	17 000	7 300	0,43	7,0 - 8,3	>5 000	3 200	3 000
J	Grecia	70 900	26 800	0,38	6,2	950	3 400	3 100
J	Italia	19 900	4 000	0,2	8,0			3 917
J	Turquía	16 200 - 20 000	10 800 - 11 000	0,55-0,67	7,3 - 7,8	2 400		1 682
J	Colombia	25 622	17 456	0,68	7,9	2 069		1 649
EM	Canadá	3 210 - 9 190			6,9 - 9,0			
EM	China, Hong Kong	7 439	1 436	0,19	8,22	784		
EM	Grecia	5 350	1 050	0,2	7,9	480	1 100	940
EM	Italia	5 050	1 270	0,25	8,38			1 330
EM	Turquía	9 500			8,15		1 450	1 270
V	Brasil	3 460	150	0,04	8,2			800
V	Francia	500	7,1	0,01	7,5	130	540	430

Fuente: Vargas (2009).

Modelos de estimación de la generación de lixiviados

Para la estimación de la generación de lixiviados se han desarrollado diversos modelos a nivel mundial, los que parten del análisis del balance hídrico de un volumen de control correspondiente al área de relleno

sanitario. Existen diferencias entre los modelos aplicados que se caracterizan por el uso de diferentes factores de generación, siendo algunos de los más usados los mostrados en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Modelos usualmente empleados para la estimación de la generación de lixiviados.

Modelos	Características
Thornthwaite (Fenn)	Observaciones empíricas de periodo de tiempo por etapas del relleno sanitario, se apoya en datos climatológicos. No toma en cuenta las actividades microbianas. No toma en cuenta la posible intrusión de agua subterránea.
Modelo Suizo	Esta es una de las metodologías o modelos de cálculo de generación de lixiviados en rellenos sanitarios más generales, deja de lado aspectos importantes relativos a la capacidad de los residuos de absorber agua.
Modelo HELP	Es un modelo determinístico, cuasi-bidimensional, se basa en información climatológica, edafológica, de diseño y geohidrológica, desarrolla un balance hídrico lateral y vertical.
Método de balance de agua	Es un modelo determinístico, se basa en información climatológica, la cantidad de humedad de los residuos, la cantidad microbiana, el suelo y material de cobertura, la época del año.

Fuente: Montejo (2010).

Experiencias en Cuba

En Cuba también se han realizado similares estudios mediante el empleo de otros métodos para estimar el caudal de lixiviado (Pellón *et al.*, 2015). Plantean otro modelo para la generación de lixiviados, el cual se evaluó teniendo en cuenta las características de los RSU que recibiría el nuevo vertedero y las condiciones climáticas de la zona donde estaría emplazado. Para el cálculo de la formación de lixiviados se realizó un balance hidrológico en el vertedero, el cual tuvo en cuenta la suma de todas las corrientes de aguas que entran en el mismo y la sustracción de las consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua (Espinosa *et al.* 2010). De esta forma se plantea que la cantidad potencial de lixiviados, es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de

retención de humedad del material en el vertedero (capacidad de campo).

En la norma NC 27, 2012, en su epígrafe 5,4, se muestra el límite máximo permisible promedio para las concentraciones en las descargas de aguas residuales, atendiendo a la clasificación cualitativa de los cuerpos receptores. En la *Tabla 4* se muestran los límites máximos permisibles promedio para las descargas de aguas residuales según la clasificación del cuerpo receptor. Por ejemplo, la clase (C) corresponde a ríos, embalses, zonas hidrogeológicas de menor valor desde el punto de vista del uso como aguas de navegación, riego con aguas residuales, industrias poco exigentes con respecto a la calidad de las aguas a utilizar, riego de cultivos tolerantes a la salinidad y al contenido excesivo de nutrientes y otros parámetros.

Tabla 4. Límites máximos permisibles promedio para las descargas de aguas residuales según la clasificación del cuerpo receptor.

Parámetros	UM	Ríos y Embalses		
		(A)	(B)	(C)
pH	Unidades	6,5-8,5	6-9	6-9
Conductividad eléctrica	µS/cm	1 400	2 000	3 500
Temperatura	°C	40	40	50
Grasas y aceites	mg/L	10	10	30
Materia flotante	-	ausente	ausente	-
Sólidos sedimentables totales	mg/L	1	2	5
DBO₅	mg/L	30	40	60
DQO (Dicromato)	mg/L	70	90	120
Nitrógeno total (Kjd)	mg/L	5	10	20
Fósforo total	mg/L	2	4	10

Fuente: ONN (2012).

Las descargas de aguas residuales no podrán producir una disminución del oxígeno disuelto en los cuerpos receptores superficiales de categoría (C) a valores menores de 2 mg/L. Las descargas de aguas residuales no podrán producir un aumento de la media geométrica del Número Más Probable de Coliformes Totales y Fecales en 100 mL (NMP/100 mL) que supere los valores dados para esta categoría. El límite lo fijará el organismo rector de las aguas terrestres atendiendo al uso, necesidad de conservación y posible riesgo para la salud.

Tratamiento de lixiviados

Uno de los tratamientos biológicos más económicos para disminuir la carga contaminante de lixiviados, por no necesitar equipos mecánicos extras para su funcionamiento, son las lagunas de estabilización aerobias, donde la aireación es natural debido al oxígeno provisto por la atmósfera y, primordialmente, por la actividad fotosintética de las algas (Vázquez, 2016).

Para el tratamiento de estos residuales líquidos (Guevara *et al.*, 2014), plantean el uso de la electrocoagulación como tratamiento primario, la fitorremediación en humedales artificiales como proceso secundario y la adsorción con carbón activado en columnas rellenas como fase de acabado para la depuración de lixiviados del relleno sanitario. El relleno sanitario El Inga dispone actualmente de un sistema de tratamiento que no ha

reportado los resultados esperados, según informe de la Empresa Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP, 2011). El estudio se realizó tanto para el lixiviado crudo, como para un lixiviado que ha tenido tratamientos (lodos activados y biorreactores de membranas). Por lo tanto, los resultados para el efluente pre-tratado permitirán mantener los procesos ya existentes y mejorarlos mediante el acondicionamiento de dos nuevos procesos como la fitorremediación y la adsorción.

Caracterización del municipio de Viñales

El municipio Viñales se encuentra en la parte centro norte de la provincia de Pinar del Río, la más occidental de Cuba. Limita al este con el municipio de La Palma, al oeste con Minas de Matahambre, al sur con Pinar del Río y Consolación del Sur y al norte con las aguas del Golfo de México. Tiene una extensión territorial de 704 kilómetros cuadrados, sin incluir un área de 920 hectáreas de cayos adyacentes, lo cual representa el 7,8 % del área total de la provincia y ocupa el octavo lugar por su extensión territorial entre los once municipios de la provincia (ENIA, 2019). En Viñales, como destino turístico se reproducen los factores que impactan negativamente en su calidad por el incremento en la generación de los RSU. Se aprecia un crecimiento ascendente de la población y de viviendas en los últimos cinco años en el asentamiento urbano de la localidad. Al cierre del 2018, la población del municipio de Viñales era de

28 720 habitantes, reportándose el 59 % en las áreas urbanas, y las proyecciones indican que continuará aumentando progresivamente hasta el año 2030. (ENIA, 2019).

El mismo está dividido en siete consejos populares: Viñales, Puerto Esperanza, República de Chile, San Cayetano, Los Jazmines, El Moncada y San Vicente. El asentamiento urbano de Viñales es la cabecera del municipio y cuenta con una población de 9 502 habitantes, que significa el 56,3 % de la población urbana del municipio, lo que representa una densidad demográfica de 339 habitantes por kilómetro cuadrado. Indica un proceso de migración de la población rural a la ciudad en busca de mejores condiciones de vida (ONEI, 2012).

En las estimaciones realizadas por la Dirección Provincial de Planificación Física (DPPF) en 2014, se prevé la generación de desechos sólidos en el núcleo urbano, con el desarrollo del destino turístico de Viñales del año 2015 al 2020, de 2 715,1 toneladas anuales de desechos sólidos, de ellas 1 808,3 t es el potencial de residuos reciclables, lo que equivale a un 66 % del total generado (ENIA, 2019).

Según CAM (2018) citado en Alea *et al.* (2019), el municipio exhibe un tejido empresarial débil y poco diversificado, mientras que la economía está constituida por cuatro renglones: agricultura, forestal, pesca y turismo. La principal actividad económica para el municipio lo constituye el turismo, ya que en los valles y su entorno se manifiestan

una serie de factores físico-naturales y socioculturales, que en su conjunto le concedieron a la zona del Valle de Viñales la categoría de Paisaje Cultural de la Humanidad, declarado por la UNESCO.

Breve descripción del vertedero

El proyecto consiste en crear las condiciones para llevar a cabo el manejo y reciclaje de los desechos sólidos del municipio. Este estará formado por un campo de reabsorción del material biodegradable y un sistema de selección de materiales no degradables para ser reciclados. La instalación se complementará con una garita para el personal y locales para el almacenaje temporal de los materiales reciclables seleccionados, que serán aluminio, papel y cartón (éstos con locales cubiertos y protegidos), cristal, plástico, materiales ferrosos y otros, al aire libre sobre plataformas de hormigón para garantizar una conservación adecuada. Incluye además un área para depositar los desechos biológicos peligrosos, generados en las instalaciones de salud enclavadas en el núcleo urbano, una laguna facultativa para la colección y tratamiento de los lixiviados y un tanque séptico para el tratamiento de los residuales líquidos generados en la garita (ENIA, 2018).

Todo lo anterior conlleva a definir como objetivo del estudio, estimar cuantitativamente el caudal medio de lixiviado generado en el vertedero municipal del municipio de Viñales en la provincia de Pinar del Río, así como una posible propuesta de tratamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se utilizó el Modelo Suizo para estimación del caudal medio de lixiviados, teniendo en cuenta las condiciones e información con la cuales se contaba para la realización del estudio. Este modelo considera que un cierto porcentaje de la precipitación que atraviesa los residuos llega al fondo impermeabilizado del vaso y debe ser recogido y tratado. El mismo depende de la cantidad de precipitación y del grado de compactación de los residuos (Castillo, 2014).

El modelo es uno de los más simples para estimar la generación de lixiviados en un relleno sanitario o tipo de disposición final, y aunque los parámetros ligados a la generación de lixiviados son variados, este modelo ofrece una opción sencilla pero bastante general, pues deja de lado aspectos fundamentales como la capacidad de los residuos de absorber agua y la cantidad de agua empleada en el proceso de metanogénesis (Montejo, 2010).

El modelo suizo permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de lixiviado mediante la ecuación:

$$Q = (1/t) \cdot P \cdot A \cdot K \quad (1)$$

Donde:

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

P = Precipitación media anual (mm/año)

A = Área superficial del relleno sanitario (m²)

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

K = Coeficiente que representa la proporción de precipitación que se convierte en lixiviado y 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 la 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 (Castillo, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer paso para la aplicación del modelo suizo en la estimación del caudal de lixiviados fue examinar la precipitación media anual, para lo cual se tuvo en cuenta el régimen pluviométrico anual, el cual está definido por dos

períodos: lluvioso, extendido de junio a noviembre, asociado fundamentalmente al calentamiento diurno, ondas tropicales, huracanes y otras perturbaciones del tiempo; y poco lluvioso, desde diciembre hasta mayo, con lluvias que dependen

sobre todo de la llegada de los sistemas frontales (ENIA, 2019).

El acumulado medio anual de precipitación es de 1 531,7 mm, con 104 días con lluvia. De ellos, 363 mm corresponden al período poco lluvioso, lo que constituye el 23,7 % del acumulado en 48 días con lluvia, y se extiende desde la primera decena de octubre hasta la segunda decena de mayo.

En el período lluvioso se alcanzan acumulados decenales superiores a 50 mm desde la tercera decena de mayo hasta la tercera decena de septiembre; el acumulado medio histórico es de 1 168,0 mm, que representa el 76,3 % del anual, en 67 días con lluvia. Septiembre es el mes de máximo acumulado, con 263,5 mm (Tabla 5).

Tabla 5. Lluvia media mensual (mm) en Viñales. Período 1979 a 2010.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
52,4	56,8	72,1	77,7	177,3	251,5	145,9	200,9	263,5	129,3	68,9	35,4	1 531,7

Fuente: Centro Meteorológico de Pinar del Río (2019).

El coeficiente K se consideró para rellenos fuertemente compactados con peso específico de 0,7 t/m³, con un valor de 0,25. El área fue calculada teniendo en cuenta las dimensiones de las respectivas trincheras, con un valor total de 4 095 m².

Finalmente, mediante la expresión (1) se procedió al cálculo del caudal medio de lixiviado generado, arrojando un valor de 269 758 m³ por mes 0,050 L/s = 4,32 m³ por día = 129,6 m³ por mes.

Es importante destacar que los modelos de estimación de la generación de lixiviados empleados mundialmente han demostrado márgenes de error importantes en cuanto a los volúmenes generados y la generación real. De acuerdo a estudios hechos por Schroeder *et al.* (1988), se establece que para métodos de balance de agua los errores pueden variar del orden del 83 % al 154 %.

Por su parte, Pellón *et al.* (2015) plantean que tanto las precipitaciones y la humedad propia de los residuos sólidos son los indicadores más importantes a los efectos de estimar el volumen de lixiviados que se generan en los vertederos. Por tanto, para el cálculo de la formación de lixiviados realizan un balance hidrológico en el vertedero, el cual tiene en cuenta la suma de todas las corrientes de aguas que entran en el mismo y la sustracción de las consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua (Espinosa *et al.*, 2010).

Aunque para la estimación de la generación de lixiviados se han desarrollado diversos modelos a nivel mundial, caracterizados por diferencias en el análisis del balance hídrico y el uso de otros factores de generación, el modelo suizo empleado en la investigación resulta uno de los más usados internacionalmente.

Sistema de tratamiento

Atendiendo a los requisitos normativos anteriormente descritos, y analizando las alternativas de tratamiento para lixiviados, su composición y la carga bacteriana de 70 NM/100 mL a la salida de las trincheras, se propone la proyección de una laguna facultativa para la colección y tratamiento de los lixiviados generados en las trincheras.

La laguna tendrá dimensiones en la base de 7 m por 12 m, y en la superficie de 22,3 m por 17,3 m, siendo la profundidad de 6,15 m. Los taludes y fondo requieren para la impermeabilización de un revestimiento de 0,5 m de espesor, empleando un material arcilloso compactado en capas finas, con un coeficiente de permeabilidad k del orden de 10^{-5} m/d. Mediante el tratamiento propuesto se logrará la disminución de la carga orgánica del lixiviado generado en un relleno sanitario, y se reducirán los contaminantes presentes en éstos y los riesgos al medio ambiente, dándole cumplimiento a lo dispuesto en la NC 27:2012, permitiendo verterlos en un cuerpo de agua receptor de categoría C. Existen varias opciones de tratamiento, las que incluyen procesos físicos- químicos, biológicos y combinaciones de éstos. Sin embargo, esta elección dependerá en gran medida de las características específicas del lixiviado a tratar (Rocha *et al.*, 2011; Di Iaconi *et al.*, 2011; Cortez *et al.*, 2011; Yilmaz *et al.*, 2010).

Los autores coinciden con lo expresado por Espinosa *et al.* (2007), referente a que en la actualidad se cuenta con una gran variedad de sistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de los lixiviados de vertederos (lagunas de estabilización: anaerobias, facultativas, aerobias, de maduración; lodos activados, procesos de coagulación-floculación, procesos de membrana, procesos de oxidación avanzada, adsorción con carbón activado, desinfección con cloro u ozono, entre otros métodos).

Para su elección, diseño, dimensionamiento y explotación adecuados, se hace necesario conocer el volumen y poder contaminante de los lixiviados, las características físicas del lugar y las posibilidades económicas del país o región para la adquisición de una tecnología, disponibilidad de suministro de energía y de personal calificado para su explotación.

A su vez, en estudios realizados en Cuba referidos a la selección o mejor alternativa de empleo de sistemas de tratamientos de lixiviados (JICA, 2005), se determinó la contraposición de las lagunas aireadas y los lodos activados, donde las lagunas facultativas requieren de una mayor área, pero tienen la ventaja de no necesitar suministro de energía, salvo la solar. Esta condición está garantizada, dadas las características ambientales naturales de Cuba que, por su posición geográfica, situada en una latitud muy próxima al Trópico de Cáncer, recibe altos valores de radiación solar durante todo el año (INSMET, 2009).

Estos sistemas alcanzan eficiencias de eliminación de materia orgánica (expresada como DBO5) entre 70 y 80 %, y del 70 y 60 % para el nitrógeno y el fósforo, respectivamente. Además, la formación de lodos es mínima con respecto a los sistemas aireados y el costo de operación y mantenimiento es menor. Debido a la reducción importante que logran sobre el nitrógeno y el fósforo, disminuyen considerablemente la aparición del fenómeno de eutrofización

de los cuerpos hídricos donde descargan sus aguas. Estos sistemas también resisten las fluctuaciones de la carga contaminante del afluente (JICA, 2005). El empleo de la laguna facultativa como órgano de tratamiento también obedece al tiempo de explotación del vertedero y a la edad del lixiviado, donde para lixiviados jóvenes la reducción del contenido en materia orgánica se puede llevar a cabo utilizando procesos anaerobios.

CONCLUSIONES

- El modelo utilizado sirvió para determinar el caudal medio de lixiviado generado en el vertedero municipal de Viñales.
- El estudio realizado permite conocer de varios modelos para la estimación del caudal medio, así como de las características de los mismos para su

utilización en dependencia de la información que se ofrezca.

- La aplicación del modelo para la estimación de lixiviados generados en un vertedero puede emplearse para manejar correctamente los lixiviados y el cálculo de alguna eventualidad que se produzca producto de un evento meteorológico extremo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alea, L., Marín, L. G. y Bruguera, N. (2019). Diagnóstico de la gestión del reciclaje de los residuos sólidos generados en el destino turístico Viñales. *Avances*, 21(4), 516-531. Recuperado de <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/486/1579>

Baptista, F. (2017). *Procedimiento para la gestión del reciclaje de RSU en el municipio de Cabinda, República de Angola* [Tesis de grado para opción del título de doctor en ciencias económicas]. Universidad

Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba.

Bautista-Ramírez, J., Gutiérrez-Hernández, R., Nájera-Aguilar, H., Martínez-Salinas, R., Vera-Toledo, P., Araiza-Aguilar, J., Méndez-Novelo, R., Rojas-Valencia, M. (2018). El biorreactor llenado de la edad de refrigeración (ARFB), como un tratamiento para el escalaje de relleno. *Revista Mexicana Ingeniería Química*, 17, 561-571. DOI: 10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/

- Bhatt, S., Altouqi, R., Karanjekar, V., Hossain, M. S., Chen, V. P., & Sattler, M. S. (2016). Preliminary regression models for estimating first-order rate constants for removal of BOD and COD from landfill leachate. *Environment Technology Innovation*, 5, 188-198.
- Consejo de Administración Municipal, CAM. (2018). *Estrategia Integral de Desarrollo Local del Municipio Viñales al 2030*. Viñales: CAM. 30 p.
- Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira, R. & Mota, M. (2011). Evaluation of Fenton and ozone-based advanced oxidation processes as mature landfill leachate pre-treatments. *Journal of Environmental Management*, 92, 749-755.
- Castillo, M. (2014). *Estudio Y diseños definitivos para la gestión integral de los desechos sólidos de la mancomunidad El Guabo-Ponce Enríquez*. Quito, Ecuador: Asociación de Municipalidades del Ecuador.
- Centro Meteorológico Provincial. (2019). *Informe anual de precipitaciones*. Pinar del Río: CITMA.
- Di Iaconi C., Rossetti S., Lopez A., & Ried A. (2011). Effective treatment of stabilized municipal landfill leachates. *Chemical Engineering Journal*, 168, 1085-1092.
- Eljaiek, M. S., Torres, L., & Bermudez, W. (2013). *Alternativas de tratamiento de lixiviados aplicables al relleno sanitario parque ambiental Loma de los Cocos de la ciudad de Cartagena, Colombia. Hacia un sistema de gestión integral de los residuos sólidos*. Cartagena: Redisa. p. 1-6.
- Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, ENIA (2019). *Estudio de Impacto Ambiental Vertedero Viñales*. Unidad de Investigaciones para la Construcción de Pinar del Río: ENIA. 77 p. (Archivo técnico).
- Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, ENIA (2018). *Estudio de Riesgos Vertedero Viñales*. Unidad de Investigaciones para la Construcción de Pinar del Río: ENIA (Archivo técnico).
- Empresa Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos, EMGIRS-EP. (2011). *Tratamiento de lixiviados en El Inga. Informe de tratamiento de lixiviado* [Inédito].
- Espinosa, M. D., López, M., Pellón, A., Robert, M., Díaz, S., González, A., & Fernández, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de La Habana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(4), 313-325.
- Fernández, C. M., Ramírez, M., Rubio, R. y Efraín, A. (2011). Influencias de un relleno sanitario sobre la

- composición, abundancia y dispersión diurna de los peces en la Quebrada El Venado, corregimiento de Córdoba, Municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia). *Academia Colombiana de Ciencias Exactas Física y Naturales*, 35(135), 213-224.
- INSMET. (2009). *El Clima de Cuba. Características generales. Instituto de Meteorología*. La Habana. Recuperado de <http://www.insmet.cu>
- JICA. (2005). *Estudio del Plan Maestro sobre Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos en Ciudad de La Habana*. Agencia de Cooperación Internacional de Japón. Informe Final, Vol. II, capítulo 8. Nippon Koei Co., LTD. Pacific Consultants International, Japón.
- Guevara, A., Guanoluisa, L. y De la Torre, E. (2014). Diseño de sistemas de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario. El Inga mediante electrocoagulación y fitorremediación. *Revista EPN*, 34(1).
- Montejo, J. C. (2010). *Elaboración de una herramienta en Excel que permita el cálculo de la cantidad de gas metano y lixiviados producido en un relleno sanitario, aplicado al municipio de Saba de Torres, Santander, Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.
- Najera-Aguilar, H. A., Gómez, J.M., García, C., Gutiérrez, R., & Rojas, M. N. (2010). Manejo de biogás y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general. *La Candonia*, 4(2), 117-130.
- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas Física y Naturales*, 34(132), 347-356.
- NC 27 (2012). *Vertimientos de aguas residuales a las aguas terrestres y alcantarillado. Especificaciones*. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- ONEI (2012). *Datos del Censo de Población y Vivienda en el municipio de Viñales*. Oficina Nacional de Estadísticas e Información.
- Pellón, A., López, M., Espinosa, M. C., & González, O., (2015). Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXVI(2), 3-16. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000200001
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-93. Recuperado de

- <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>
- Rocha E., Vilar V., Fonseca A., Saraiva I., & Boaventura R. (2011). Landfill leachate treatment by solar-driven AOPs. *Solar Energy*, 85(1), 46-56.
- Schroeder, P., Peyton, R., Mckenroe, B., & Sjostrom, J. (1988). *Hydrological evaluation of landfill performance (HELP) model*. Volume III. User's guide for version 2, Vicksburg: Us Army Engineer Waterways Experiment Station. p. 87.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). Formation, Composition and Management of Leachate. En G. Tchobanoglous y F. Kreith: *Handbook of Solid Waste Management*. California: McGraw-Hill. pp. 700-723.
- Torre, P., Barba Ho, L.E., Ojeda, C., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 17(1), 245-255.
- Vargas, M. (2009). *Modelo de balance hídrico para la estimación de los caudales de lixiviados generados en la operación del relleno sanitario del centro industrial del sur El Guacal, Heliconia, Antioquia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Vázquez, F. (2016). Lagunas de estabilización. *Ext. Innov. Transf. Tecnol.* (3). <https://doi.org/10.30972/eitt.303004>
- Yilmaz T., Apaydin S. & Ali B. (2010). Coagulation-flocculation and air stripping as a pretreatment of young landfill leachate. *The Open Environmental Engineering Journal*, 3, 42-48.
- Zafra, C., & Romero, D., (2019). Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. Universidad de Medellín. *Revista Ingenierías*, 18(35), 125-147. Recuperado de <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a8>

Avances journal assumes the Creative Commons 4.0 international license