



EFICIENCIA Y CONFIABILIDAD DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS

EFFICIENCY AND RELIABILITY OF THEORETICAL MODELS OF BIOGAS FOR LANDFILLS

Pablo Emilio Escamilla García*

Escuela Superior de Comercio y Administración Unidad Tepepan, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

*Autor para correspondencia: peescamilla@ipn.mx

Manuscrito recibido el 10 de enero de 2019. Aceptado, tras revisión, el 27 de febrero de 2019. Publicado el 1 de marzo de 2019.

Resumen

Este artículo muestra un análisis comparativo de las emisiones de biogás generadas en un relleno sanitario al aplicar el modelo mexicano de biogás, el modelo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) y comparar los resultados con datos obtenidos in-situ. Las estimaciones con los modelos teóricos y la medición en campo se realizaron en 36 pozos de venteo de un relleno sanitario ubicado en el Estado de México, México, con una recepción diaria de 3500 kilogramos de RSU. Los resultados in-situ mostraron una generación de biogás (CH_4 , CO_2 y O_2) con una frecuencia media de 35,44 Hz (1/s) y emisiones de metano de 3355,99 m^3/hr . En contraste los modelos teóricos estimaron valores para el año 2018 de 6270,57 m^3/hr para el modelo de la EPA y 8379,52 m^3/hr para el modelo mexicano de biogás. Los resultados mostraron variaciones significativas en las estimaciones de los modelos teóricos versus la medición in-situ. La información generada permite discutir la confiabilidad del uso de modelos teóricos para formular proyectos de aprovechamiento y valorización de RSU al considerar los altos montos de inversión que implican y que las proyecciones de generación de energía se basan en la frecuencia de generación del flujo de biogás estimado en el relleno.

Palabras clave: Biogás, metano, relleno sanitario, estimación teórica.

Abstract

This paper highlights a comparative analysis of biogas emissions produced in a Mexican landfill. The Mexican biogas model, the model of the Environmental Protection Agency of the United States of America (EPA) were applied in order to compare results with data obtained in-situ. The sanitary landfill located in the State of Mexico, Mexico, has 36 wells with a daily reception of 3500 kilograms of MSW. The results showed an in-situ generation of biogas (CH_4 , CO_2 and O_2) with an average frequency of 35,44 Hz (1/s) and methane emissions of 3355.99 m^3/hr . The theoretical models estimated values for the year 2018 of 6270,57 m^3/hr for the EPA model and 8379,52 m^3/hr for the Mexican

biogas model. The results showed significant variations in the estimates of the theoretical models versus in-situ measurements. This result discusses the reliability of the use of theoretical models to formulate projects for the utilization and valorization of MSW, considering the high amounts of investment involved and that the projections of power generation are based on the frequency of generation of the estimated biogas flow in the landfill.

Keywords: Landfill gas, methane, landfill, theoretical estimation.

Forma sugerida de citar: Escamilla García Pablo E. (2019). Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 29(1):32-44. <http://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.03>.

IDs Orcid:

Pablo Emilio Escamilla García: <http://orcid.org/0000-0001-6704-521X>

1 Introducción

El biogás es una mezcla de metano (CH_4) (40% – 70%), dióxido de carbono (CO_2) y otros gases (hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de hidrógeno) generados por la fermentación de materiales orgánicos (Gautam, Baral y Herat, 2009). Este gas es el resultado de la fermentación de metano de diferentes materiales, como materias primas agrícolas, productos agrícolas, desperdicios de alimentos y heces líquidas o sólidas (Iglinski y col., 2012). La combustión del biogás permite la recuperación de energía y se ha utilizado ampliamente en centrales térmicas y eléctricas, entre otras aplicaciones industriales (Tampio y col., 2014). El biogás se puede usar como fuente de energía y se puede usar en motores combinados de calor y energía. También se puede utilizar como sustituto del gas natural al eliminar el CO_2 del CH_4 . Por tanto, el biogás es un combustible versátil que se puede usar tanto para la generación de energía como para la industria química (Scholz, Melin y Wessling, 2013).

El biogás se genera en grandes volúmenes, principalmente en rellenos sanitarios. En los rellenos sanitarios, la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno que resulta en la emisión de biogás a la atmósfera (Colling y col., 2016). Los rellenos sanitarios de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son la tercera fuente de emisiones de metano relacionadas con la actividad humana a nivel mundial, esto representa aproximadamente el 15,4% de estas emisiones (EPA, 2016). Al mismo tiempo, las emisiones de metano de los rellenos sanitarios representan una oportunidad perdida para capturar y utilizar un recurso con potencial energético (Cabrera y Ortiz, 2011). El control y el uso de este gas deben estimar, con una certeza razonable, tanto la producción diaria como la producción acumulada de metano (CH_4) a largo plazo. Sin embargo, de acuerdo con Calvo y col., (2005), independientemente del método seleccionado para realizar estimaciones, las metodologías deben considerar que: 1) el diagnóstico solo es válido en el momento de la evaluación y su validez disminuye con el tiempo si el relleno sanitario no se monitorea periódicamente; 2) la metodología solo se puede realizar para rellenos sanitarios de RSU independientemente de la escala de recepción; 3) la composición de los desechos del relleno se puede obtener a partir de datos históricos reportados, datos de caracterización de desechos promedios en una población o de la caracterización *in situ*.

Se han realizado numerosas investigaciones que demuestran que el biogás en los rellenos sanitarios se produce durante largos períodos de tiempo, incluso después de que cesa la disposición de desechos (Pillai, 2018; Lombardi y Carnevale, 2016; Dace y col., 2015; Xiaoli y col., 2011). Sin embargo, la acumulación de dioxinas, furanos y otras emisiones de gases tóxicos en los rellenos crean severos riesgos ambientales y de salud pública en las poblaciones circundantes (Gomez y col., 2018; Kret y col., 2018; Hirata y col., 1995; Bramryd, 1997; Meadows, Franklin y Campbell, 1997). Por lo tanto, el biogás debe ser monitoreado para garantizar un control adecuado de estas emisiones. Este tratamiento normalmente implica la captura y utilización de biogás para fines de producción de energía.

La viabilidad económica de los proyectos para construir y operar tecnologías de aprovechamiento y captura de biogás requiere información precisa sobre la composición del gas y sobre todo sobre las proyecciones estimadas de generación (Chakraborty, Boksh y Chakraborty, 2013). La cantidad de biogás producido en los sitios de disposición final varía en función de la cantidad de residuos, el tipo de desecho, el contenido de humedad, la temperatura y las prácticas de manejo, por lo que es necesario realizar una estimación de los gases presentes para cuantificar las emisiones (Knox, 2005). La estimación del metano generado por los RSU se puede realizar utilizando metodologías como el modelo EPA y el modelo mexicano de biogás, que son modelos empíricos basados en una ecuación de primer orden para la degradación de la materia orgánica. Dichas metodologías asumen que la generación de biogás alcanza su máximo después de un período de tiempo anterior a la generación de metano, este período es un año después de la colocación de los residuos sólidos para la generación de biogás; Después de un año de disponer RSU, la generación de biogás disminuye exponencialmente mientras se consume la fracción orgánica de desechos (Urrego y Rodríguez, 2016).

De acuerdo con lo anterior, esta investigación considera la aplicación de dos modelos teóricos (modelo EPA y modelo mexicano) para la estimación de biogás en un relleno sanitario de RSU. Los resultados se comparan con mediciones precisas obtenidas *in situ*. Esto permite identificar el grado de confiabilidad y eficiencia de los modelos teóricos versus la medición real *in situ* al comparar variaciones y analizar parámetros y aspectos que pueden causar po-

sibles inconsistencias.

2 Materiales y métodos

La investigación se realizó aplicando diferentes metodologías para estimar el biogás generado en un

relleno sanitario en el Estado de México, México. Estas cifras se compararon con mediciones reales obtenidas con un analizador de gases (GA5000) para identificar la efectividad en modelos teóricos.

Tabla 1. Información de alimentación a modelos teóricos.

Parámetro	Valor
Año de apertura	2010
Año proyectado de clausura	2037
Inicio de sistema de captura	2017
Cantidad promedio anual de recepción de residuos	1105427
Proyección de residuos en el relleno en año de clausura	29846539
Profundidad del relleno sanitario	65m
Superficie en acres	36 (1 por pozo)
Contenido de metano en biogás	50.00 %
Eficiencia de captura	85.00 %
Tamaño del proyecto	Mínimo
% del área con residuos con sistema de captura	80

Fuente: Encuestas en relleno sanitario.

2.1 Medición *in situ*

El sitio de muestreo fue un relleno sanitario ubicado en una latitud de 19,320539 y una longitud de 98,808288, con una extensión de 255,619 m^2 y ubicado a 2260 metros sobre el nivel del mar con una temperatura promedio de 16,51°C y 19,50°C y una precipitación pluvial promedio anual de 600 a 800 milímetros. El relleno recibe un promedio diario de 3500 toneladas de residuos provenientes de la Ciudad de México y de ciertos municipios del Estado de México en México.

El relleno cuenta con 36 pozos de venteo, de los cuales 20 se refieren a pozos con sistema de quema, mientras que 16 solo se usan para liberar biogás a la atmósfera. Las mediciones incluyeron datos de los 36 pozos que están en pleno funcionamiento actualmente. La altura promedio de cada pozo se estimó en 3 m con una longitud total de 65 m. Los pozos están compuestos por columnas con un tubo perforado de polietileno de alta densidad de 6 pulgadas de diámetro. Los tubos están dispuestos a una distancia de 25 metros entre sí, y cada uno cuenta con 4 ranuras en el perímetro dispuestas a lo largo de la longitud del tubo a una distancia de 25 cm entre ellas.

La medición se realizó en el periodo comprendido entre el 12 al 18 de mayo de 2018. Se realizaron repeticiones triples en horarios de 9:00 hrs, 14:00 hrs, 18:00 hrs. a fin de considerar diferentes temperaturas ambientes. Se utilizó un analizador portátil de biogás modelo GA5000. Inicialmente se tomaron mediciones de presión barométrica y presión relativa y posteriormente se monitoreó CH_4 y CO_2 por lapsos de 45 segundos. Los datos fueron analizados mediante el Gas Analyser Manager Software (GAM).

Para las estimaciones con los modelos teóricos se utilizaron los datos de la Tabla 1 para alimentar los algoritmos del Modelo de México de Biogas y el modelo de la Environmental Protection Agency (EPA):

2.2 Modelo EPA

El modelo de la EPA requirió datos relacionados con la tasa promedio anual de desechos eliminados, el número de años que el relleno ha estado abierto, el año proyectado de clausura, el potencial de los desechos eliminados para generar metano y la tasa de metano. Para las estimaciones subsecuentes se

aplicó la siguiente ecuación de primer orden:

$$LFG = 2 \times L_0 \times R \times \left(e^{-k \times C} e^{-k \times T} \right) \quad (1)$$

Donde LFG es la cantidad total de biogás generado en el año actual o en consideración ($pies^3$); L_0 es el potencial total de generación de metano de

los residuos ($pies^3/lb$); R es el promedio anual de residuos dispuestos durante la vida del relleno (libras); k es la tasa anual de generación de metano (1/año); T es número de años de operación del relleno (años); C es el tiempo transcurrido desde el cierre del relleno sanitario (años) (EPA, 2017). El valor de L_0 y k se estimaron con base en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para L_0 y K para rellenos sanitarios convencionales.

Parámetros del modelo	Valor
K	0,050 por año
L_0	$170m^3/ton$

Fuente: (EPA, 2016).

Tabla 3. Índice de potencial de generación de metano (L_0).

Precipitación pluvial anual ($mm/año$)	$L_0 (m^3/Ton)$
0 – 249	60
250 – 499	80
> 500	84

Fuente: Adaptado de Stege y J., (2009).

Tabla 4. Tasa de generación de metano (K).

Precipitación pluvial anual ($mm/año$)	$L_0 (m^3/Ton)$
0 – 249	0,040
250 – 499	0,050
500 – 999	0,065
> 1000	0,080

Fuente: Adaptado de Stege y J., (2009).

2.3 Modelo mexicano

El modelo utilizó la siguiente información para estimar la generación y recuperación de biogás: 1) La cantidad de desechos depositados anualmente en el relleno sanitario, 2) El año de apertura y cierre del sitio, 3) La tasa de generación de metano (k), 4) La generación potencial de metano (L_0), 5) El factor de corrección de metano (MCF), 6) El factor de ajuste por incendios (F), 7) La eficiencia de recuperación del sistema de captura. Para estimar la tasa de generación de biogás para cada año se utilizó la ecuación de degradación de primer grado, como sigue:

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[\frac{Mi}{10} \right] \left(e^{-kt_{ij}} \right) (MCF) (F) \quad (2)$$

Donde: Q_{LFG} = Flujo máximo esperado de biogás (m^3); i = aumento de tiempo de 1 año; n = (año de cálculo) - (año inicial de eliminación de desechos); j = Incremento de tiempo en 0, 1 años; k = Generación de metano (1 / año); L_0 = Generación potencial de metano (m^3/Mg); M_i = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg); t_{ij} = Edad de la sección j de la masa de desechos M_i dispuesta en el año i (años decimales); MCF = factor de corrección de metano; F = Factor de ajuste por incendios.

La ecuación anterior estimó la generación de biogás utilizando las cantidades de residuos eliminados acumulados durante un año. Las proyecciones para varios años se desarrollan variando la proyección anual y luego iterando la ecuación. La genera-

ción total de biogás es igual al doble de la generación de metano calculada. La composición de biogás asumida en el modelo fue de 50% (CH_4) y 50%, que incluyen dióxido de carbono (CO_2) y otros compuestos. La función de degradación exponencial supone que la generación de biogás se encuentra en su máximo un período antes de la generación de metano. El modelo asumió un período de seis meses entre la colocación de los residuos y la generación de biogás. Para cada unidad de residuos, después de seis meses, se asumió que la generación de biogás disminuye exponencialmente a medida que se consume la fracción orgánica de los desechos. El año máximo de generación usualmente ocurre en el año de cierre o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

Para el cálculo de la tasa de generación de metano y del índice de potencial de metano se utilizaron los siguientes parámetros (Tablas 3 y 4).

3 Resultados y discusión

3.1 Resultados de medición *in situ*

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos luego de muestrear 36 pozos en el relleno sanitario. La concentración de metano, dióxido de carbono, oxígeno, así como la frecuencia de generación mostró valores similares para cada pozo. Los valores promedio para el relleno sanitario se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores promedios obtenidos *in-situ* para el relleno sanitario.

CH_4 (%)	CO_2 (%)	O_2 (%)	Hz (1/s)	CH_4 por hora
50.29	46.88	1.01	35.44	3355.99

3.2 Resultados del modelo mexicano de biogás

La estimación se realizó al aplicar la ecuación [1] de degradación de primer orden. Los datos utilizados para alimentar el modelo se pueden ver en la Tabla 1. El modelo proporcionó valores para el índice de generación de metano (k) y la generación poten-

cial de metano (Lo) que fueron verificados por los valores propuestos por Aguilar, Taboada y Ojeda, (2011). Estos valores se desarrollaron utilizando datos climáticos, caracterización de residuos y prácticas de eliminación precargados en los modelos teóricos. La Tabla 6 muestra los parámetros utilizados para el modelado.

Tabla 6. Parámetros para modelaje (Modelo mexicano de biogás).

Contenido de metano en biogás: 50%				
Factor de corrección de metano (MCF): 1.0				
Categoría de residuos	Degradación rápida	Degradación moderadamente rápida	Degradación moderadamente lenta	Degradación lenta
CH_4 (k) índice de generación:	0.16	0.075	0.032	0.016
CH_4 (Lo) potencial de generación (m^3/Mg):	69	138	214	202

La Tabla 7 presenta los valores obtenidos después del modelaje. Cabe señalar que los modelos teóricos (EPA y modelo mexicano) estiman la generación en función de la caracterización pre establecida. Asimismo, el modelo estima la acumulación de

residuos aumentando la cantidad de residuos dispuestos por año. Aunque la Tabla 7 presenta datos hasta 2025, el modelo resultó en valores hasta 2037, año proyectado para el cierre del relleno sanitario.

Tabla 7. Proyecciones de generación y recuperación de biogás en modelo mexicano.

Año	Disposición (Mg/año)	Disposición acumulada (Mg)	Generación de biogás			Recuperación estimada de biogás		
			(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mm Btu/hr)	(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mm Btu/hr)
2010	981600	981600	0	0	0	0	0	0
2011	1001200	1982800	1424	838	25.4	0	0	0
2012	1021200	3004000	2706	1593	48.4	0	0	0
2013	1041600	4045600	3866	2275	69.1	0	0	0
2014	1062400	5108000	4922	2897	88	0	0	0
2015	1083600	6191600	5889	3466	105.2	0	0	0
2016	1105427	7297027	6781	3991	121.2	0	0	0
2017	1127500	8424527	7608	4478	135.9	4032	2373	72
2018	1150100	9574627	8380	4932	149.7	4441	2614	79.4
2019	1173100	10747727	9105	5359	162.7	4825	2840	86.2
2020	1196600	11944327	9790	5762	174.9	5189	3054	92.7
2021	1220500	13164827	10442	6146	186.6	5534	3257	98.9
2022	1244900	14409727	11065	6513	197.7	5865	3452	104.8
2023	1269800	15679527	11665	6866	208.4	6182	3639	110.5
2024	1295200	16974727	12244	7207	218.8	6489	3819	116
2025	1321100	18295827	12807	7538	228.8	6788	3995	121.3

3.3 Resultados del modelo EPA

El modelo EPA utiliza una herramienta desarrollada para el Landfill Methane Outreach Program

(LMOP) para estimar emisiones y costos en proyectos de captura y aprovechamiento de biogás (Tabla 8). En la Tabla 9 se muestran los principales valores obtenidos en el modelo EPA.

Tabla 8. Generación, recolección y utilización de biogás.

Parámetros para modelación:	
Tasa de generación de metano, k (1/año):	0.04
Capacidad de generación de metano, LO (pies ³ /ton):	3204
Contenido de metano en LFG:	50.00 %
Generación estimada durante operación del relleno (pies³/min LFG):	
Mínimo:	3291
Promedio anual	5663
Máximo	7659
Recuperación durante operación del relleno (pies³/min LFG):	
Mínimo:	2798
Promedio anual:	4814
Máximo:	6510
Tamaño del proyecto:	
Mínimo	2798
Tasa de generación (pies³/min LFG):	
Mínimo	2798
Utilizado por el proyecto: (pies³/min LFG):	
Promedio anual	2601.8
Eficiencia de recuperación de biogás:	
	85.00 %

4 Discusión

Los valores obtenidos mostraron diferencias significativas en los niveles de biogás. Los modelos teó-

ricos (EPA y modelo mexicano) estimaron valores que resultan de modelar datos en ecuaciones de degradación de primer orden. Los resultados se muestran en la Figura 1:

Tabla 9. Proyecciones de generación de metano (m^3/hr) en modelo EPA. Valores obtenido en modelación.

Año	m^3/hr
2010	0
2011	897.83
2012	1760.46
2013	2589.27
2014	3385.57
2015	4150.66
2016	4885.74
2017	5592
2018	6270.57
2019	6922.53
2020	7548.93
2021	8150.76
2022	8729
2023	9284.56
2024	9818.34
2025	10331.19

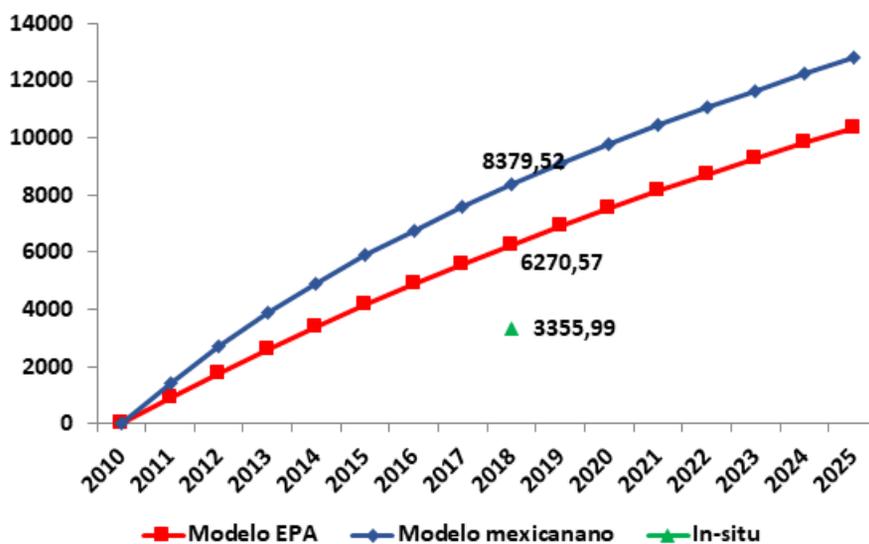


Figura 1. Generación estimada de metano (m^3/hr).

La Figura 1 muestra las emisiones de metano en metros cúbicos por hora. Es posible apreciar que los modelos teóricos estimaron valores para el 2018 de $8379,52 m^3/hr$ (modelo mexicano) y $6270,57 m^3/hr$ (Modelo EPA). Estos valores contrastan significativamente con el valor real *in situ* que muestra que en el año 2018 la generación es de $3355,99 m^3/hr$. Las variaciones en los resultados obedecen a diferentes elementos, en primera estancia están los supuestos

de los modelos teóricos.

En el modelo de la EPA, la estimación de la generación de biogás (LFG) producida se multiplica por la eficiencia de recolección para estimar el volumen de final de metano que se puede recuperar. Sin embargo, las proyecciones se calculan con base en estimaciones de eficiencia de captura razonables para rellenos sanitarios que cumplen con los estándares establecidos en Título 40, parte 258 del

Código de Regulaciones Federales en los Estados Unidos de América. Las eficiencias de recolección que reportan estos rellenos sanitarios oscilan entre el 50% y el 95% de eficiencia, por lo que el modelo asume un 75% de eficiencia de captura. Adicionalmente, el modelo de la EPA asume instalaciones con un sistema integral de recolección y tratamiento que aumentará su eficiencia y los años proyectados. En consecuencia, la variación del valor real *in situ* con las estimaciones del modelo EPA es entendible ya que los rellenos sanitarios en México carecen de sistemas integrales que garanticen una eficiencia en la captura de biogás, y sobre todo que los rellenos sanitarios en México en su gran mayoría basan su

operación en métodos rudimentarios y tecnologías obsoletas (Escamilla y col., 2016).

Los resultados obtenidos en el modelo mexicano de biogás, presentan una variación aun mayor que los datos del modelo de la EPA. La diferencia de los m^3 por hora de metano generado en 2018 entre la medición real *in situ* y el modelo EPA fue de 2914,58 m^3/hr , mientras que la diferencia con el modelo mexicano de biogás fue de 5023,53 m^3/hr . Esto implica una diferencia 2.5 veces mayor que la emisión real. El modelo mexicano asigna automáticamente los valores de k y Lo de acuerdo a los valores de la Tabla 10.

Tabla 10. Valores del Índice de Generación de Metano (k) y de Generación Potencial de Metano (Lo) en modelo Mexicano de biogás por región.

Categoría de Residuos	Región 1		Región 2		Región 3		Región 4		Región 5	
	Sureste		Oeste		Centro/Interior*		Noreste		Noroeste & Interior Norte	
	k	Lo	k	Lo	k	Lo	k	Lo	k	Lo
1	0.3	69	0.22	69	0.16	69	0.15	69	0.1	69
2	0.13	115	0.1	126	0.075	138	0.07	138	0.05	149
3	0.05	214	0.04	214	0.032	214	0.03	214	0.02	214
4	0.025	202	0.02	202	0.016	202	0.015	202	0.01	202

Fuente: Adaptado de (Steger y J., 2009).

Como se puede observar en la Tabla 10, el índice de generación de metano usado en la estimación se asigna en función de la localización del relleno sanitario a evaluar. El modelo establece cinco regiones geográficas. Cada región identifica primeramente la precipitación pluvial y la temperatura promedio de la zona. Posteriormente la categoría de residuos se refiere a 1) Sitio sin manejo; 2) Sitio con manejo; 3) Sitio semi-aeróbico y 4) Condición desconocida. Si no existe información precisa sobre la caracterización de los residuos, el modelo asume valores de caracterización por cada zona.

El considerar el hecho que el modelo mexicano estima los valores con base en información particular de México, debería brindar una mayor confiabilidad en los resultados. Estos resultados tendrían que estar en niveles con una variación aceptable en relación con los datos de mediciones reales *in situ*. Sin embargo, como se evidenció, las estimaciones mostraron una variabilidad significativa. El modelo de

la EPA reportó valores aún más cercanos a los datos reales *in situ*. Esto es una situación importante ya que se demuestra que el modelo mexicano, el cual dadas sus características tendría que estimar valores cercanos a la realidad, mostró lo contrario al reportar los valores más alejados de la medición real. El principal punto débil del modelo mexicano y que podría explicar la variación tan amplia en las estimaciones es la información sobre la caracterización de los residuos, particularmente las fracciones orgánicas. La información estadística relacionada con la caracterización de residuos en México es escasa y presenta niveles bajos de confiabilidad. En un sistema integral de gestión de RSU la caracterización de los residuos es fundamental no solo para establecer estimaciones de metano en la fracción orgánica sino para establecer estrategias para migrar a sistemas de cero residuos (Ayeleru, Okonta y F., 2018; Adeniran, Nubi y Adelopo, 2017).

El flujo de residuos en un relleno sanitario y su ca-

racterización varía en función factores de cada región como: actividades económicas, clima, cultura, energía, fuentes de generación, entre otras. Los países en vías de desarrollo tienden a generar una proporción significativa de residuos orgánicos, mien-

tras que los países desarrollados presentan proporciones mayores en la fracción inorgánica (Chang y col., 2011). La Tabla 11 ilustra los diferentes valores promedio de composición de acuerdo con el tipo de economía.

Tabla 11. Composición de residuos por nivel economico*. Elaborado a partir de datos de **Banco Mundial2012**

Nivel de ingreso	Orgánico (%)	Papel (%)	Plástico (%)	Vidrio (%)	Metal (%)	Otros (%)
Ingreso bajo	64	5	8	3	3	17
Ingreso medio bajo	59	9	12	3	2	15
Ingreso medio alto	54	14	11	5	3	13
Ingreso alto	28	31	11	7	6	17

*Nota: La Tabla fue construida con información del Banco Mundial, que incluye datos de 105 países clasificados por ingreso y con tasas de generación de RSU en el periodo 2006 a 2012. La tasa de generación incluyó áreas urbanas solamente y en algunos países los valores de composición fueron de una sola ciudad.

La Tabla 11 muestra que los países de bajos ingresos tienen una fracción orgánica del 64% en comparación con el 28% en países de alto ingreso. Esto demuestra que, a medida que un país incrementa sus niveles de desarrollo económico, se tiene una repercusión en el flujo de RSU y la fracción orgánica disminuye. En consecuencia, las estimaciones del modelo mexicano de biogás presentan una baja confiabilidad debido a los datos de caracterización de residuos que utiliza como base. El modelo asume una alta concentración de fracción orgánica mientras que los datos reales demuestran que este componente es menor al estimado. Los valores reportados por los modelos teóricos en esta investigación tienen un comportamiento similar, esto es debido al modelo matemático que aplican y a la degradación exponencial del residuo estimada. La variabilidad significativa entre los datos de los modelos teóricos y la medición *in situ* que se reporta en este artículo se alinean con los resultados reportados por Urrego y Rodríguez, (2016) quienes encontraron variaciones atípicas entre los modelos teóricos y un modelo del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Sin embargo, esta investigación se ubica en México, se esperaba que el modelo mexicano brindará información aproximada pero confiable de generación de metano. Investigaciones han demostrado el impacto negativo que una incorrecta cuantificación de biogás en un relleno sanitario puede tener en pro-

yectos de generación de energía (Judy y col., 2018; Blanco y col., 2018; Li y col., 2018). En consecuencia, los modelos teóricos, particularmente el modelo mexicano de biogás demostró ser poco confiable para generar información preliminar sobre emisiones de metano.

En México la provisión de información sobre caracterización de residuos es poco confiable. Se demuestra así que, si bien los modelos teóricos pueden ser una herramienta de uso práctico, los resultados no pueden ser utilizados para definir estrategias y planes de acción sobre todo en proyectos de inversión para generación de energía. La eficiencia y rentabilidad de una planta de valorización de RSU para generación se basa en la frecuencia adecuada y niveles de emisión constante de metano por hora. Es importante que el modelo mexicano de biogás sea actualizado en términos de caracterización de residuos para evitar así la variabilidad en las estimaciones.

5 Conclusiones

La medición *in situ* evidenció emisiones de metano significativamente menores a los valores estimados por los modelos teóricos (*in situ* = 3355,99 m³/hr, modelo EPA = 6270,57 m³/hr, modelo mexicano = 8379,52 m³/hr). Las variaciones en los valores obtenidos se deben a los parámetros que cada modelo asume que discrepan ampliamente de las características reales de los rellenos sanitarios en México.

El modelo EPA y el modelo mexicano no presentan una variación tan amplia entre sí debido al método matemático que aplican (ecuación de primer orden).

La medición *in situ* mostró que la complejidad de los elementos necesarios para la estimación del biogás generado puede tener un impacto significativo en los resultados. Los modelos teóricos proporcionan proyecciones que pueden utilizarse como información preliminar. Sin embargo, se demuestra que no son confiables y es fundamental realizar una medición con equipo especializado *in situ* para obtener información útil para la toma de decisiones. Un mo-

delo teórico puede subestimar o sobreestimar la generación de biogás proyectada. Esto es crítico si dicha información es la base para la implementación de proyectos de generación de energía a partir del biogás. Si los interesados no están en condiciones de realizar una medición *in situ*, se debe prestar especial atención al modelo teórico elegido para las proyecciones y procurar la provisión certera de información sobre la caracterización de los residuos en el relleno en cuestión, ya que son estos datos los que pueden provocar la variabilidad de los resultados finales.

Referencias

- Adeniran, A., A. Nubi y A. Adelopo (2017). «Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management.» En: *Journal of the Air and Waste Management Association* 67, 3-10. Online: <https://bit.ly/2Vw2DLI>.
- Aguilar, Q., P. Taboada y S. Ojeda (2011). «Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás.» En: *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán* 15.1, págs. 37-45.
- Ayeleru, O., F. Okonta y Ntuli F. (2018). «Municipal solid waste generation and characterization in the City of Johannesburg: A pathway for the implementation of zero waste.» En: *Waste Management* 79, 87-9. Online: <https://bit.ly/2U6p09E>.
- Blanco, H. y col. (2018). «Potential of Power-to-Methane in the EU energy transition to a low carbon system using cost optimization.» En: *Applied Energy* 232.15, 323-340. Online: <https://bit.ly/2XumGv9>.
- Bramryd, T. (1997). «Landfilling in the perspective of the global CO₂ balance.» En: ed. por Sixth International Landfill Symposium. Sardinia, Italia.
- Cabrera, R. y A. Ortiz (2011). *Estudio experimental a escala piloto y modelización de la producción de biogás en relleno sanitario*. Inf. téc. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional.
- Calvo, F. y col. (2005). «Environmental diagnosis methodology for municipal waste landfills.» En: *Waste Management* 25.8, 768-779. Online: <https://bit.ly/2TdByz1>.
- Chakrabarty, S., M. Boksh y A. Chakraborty (2013). «Economic viability of biogas and green self-employment opportunities.» En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 757-766. Online: <https://bit.ly/2EnYLEW>.
- Chang, S. y col. (2011). «Comprehensive utilization of biogas in Inner Mongolia, China.» En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.3, 1442-1453. Online: <https://bit.ly/2tjfttM>.
- Colling, A. y col. (2016). «Brazilian recycling potential: Energy consumption and Green House Gases reduction.» En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, 544-549. Online: <https://bit.ly/2VrdDJO>.
- Dace, E. y col. (2015). «Optimization of Landfill Gas Use in Municipal Solid Waste Landfills in Latvia.» En: *Energy Procedia* 72, 293-299. Online: <https://bit.ly/2T1sZbb>.
- EPA (2016). *Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills Background Information for Proposed Standards and Guidelines*. Inf. téc. EPA-Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Online: <https://bit.ly/2Tlw84S>.
- (2017). *LFG Energy Project Development Handbook. Landfill Methane Outreach Program*. Inf. téc. EPA Environmental Protection Agency. Online: <https://bit.ly/2fTvZh9>.
- Escamilla, P.E. y col. (2016). «Economic feasibility analysis for electrical generation from biogas in waste disposal sites in Mexico City.» En: *Applied Economics* 48 48.59, págs. 5761-5771.
- Gautam, R., S. Baral y S. Herat (2009). «Biogas as a sustainable energy source in Nepal: Present status and future challenges.» En: *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews* 13.1, 248-252. Online: <https://bit.ly/2BTSj8w>.
- Gomez, S. y col. (2018). «Dioxins and furans legacy of lindane manufacture in Sabiñánigo (Spain). The Bailín landfill site case study». En: *Science of The Total Environment* 624, 955-962. Online: <https://bit.ly/2GPnFRA>.
- Hirata, T. y col. (1995). «Construction of facilities on closed landfills». En: ed. por Fifth International Landfill Symposium. Sardinia, Italia.
- Iglinski, B. y col. (2012). «Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.7, 4890-4900. Online: <https://bit.ly/2Eis9fS>.
- Judy, J. y col. (2018). «Energy balance and diurnal variation in methane production as affected by feeding frequency in Jersey cows in late lactation». En: *Journal of Dairy Science*. Online: <https://bit.ly/2EgNruf>.
- Knox, A. (2005). *An Overview of Incineration and EFW Technology as Applied to the Management of Municipal Solid Waste (MSW)*. Inf. téc. Energy Subcommittee of the Ontario Environment Industry Association. Online: <https://bit.ly/2Tg8hUj>.
- Kret, J. y col. (2018). «A respiratory health survey of a subsurface smoldering landfill». En: *Environmental Research* 166, 427-436. Online: <https://bit.ly/2tIUx5U>.
- Li, R. y col. (2018). «Improved methane production and energy recovery of post-hydrothermal liquefaction waste water via integration of zeolite adsorption and anaerobic digestion». En: *Science of The Total Environment* 651.1, 61-69. Online: <https://bit.ly/2TqHgO8>.
- Lombardi, L. y E.A. Carnevale (2016). «Analysis of an innovative process for landfill gas quality improvement.» En: *Energy* 109, 1107-1117. Online: <https://bit.ly/2H53kad>.
- Meadows, C., D. Franklin y P. Campbell (1997). «Global methane emissions from solid waste disposal sites». En: ed. por Sixth International Landfill Symposium. Sardinia, Italia.
- Pillai J. and Riverol, C. (2018). «Estimation of gas emission and derived electrical power generation from landfills». En: *Trinidad and Tobago as study case. Sustainable Energy Technologies and Assessments* 29, 139-146. Online: <https://bit.ly/2H5xVVe>.
- Scholz, M., T. Melin y M. Wessling (2013). «Transforming biogas into bio-methane using membrane technology.» En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 17, 199-212. Online: <https://bit.ly/2BYqcVs>.
- Stege, G. y Davila J. (2009). *Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogas Version 2.0*. Online: <https://bit.ly/2GNMIEB>.
- Tampio, E y col. (2014). «Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste.» En: *Waste Management* 34.2, 370-377. Online: <https://bit.ly/2EjR4ji>.
- Urrego, E. y J.P. Rodríguez (2016). «Application of methodologies EPA, Mexican and IPCC for estimating biogas, a case study of the sanitary landfill Dona Juana, Bogotá- Colombia». En: *Revista Universidad y Salud* 18.2, págs. 338-344.
- Xiaoli, C. y col. (2011). «Characteristics of vegetation and its relationship with landfill gas in closed landfill». En: *Biomass and Bioenergy* 35.3, 1295-1301. Online: <https://bit.ly/2EjR4ji>.

Tabla 12. Valores obtenidos *in situ* por pozo de venteo.

Pozo	Metano (CH ₄) (%)	Dióxido de carbono (CO ₂)(%)	Oxígeno (O ₂) (%)	Frecuencia Hz (1/s)	Emisiones por hora de metano
1	48.8	51	0.2	5.42	53.1005715
2	50	50	0	5.06	1310.77465
3	49.5	50.5	0	77.57	19893.2849
4	49.7	50.3	0	113.77	1135.1787
5	51.7	48.3	0	90.1	24133.6408
6	49.8	50.2	0	0.3	77.4030562
7	38.5	59.2	2.3	0.3	59.8397121
8	51.3	48.6	0	76.57	20350.8955
9	50.4	49.2	0.4	96.93	25310.2398
10	50.4	49.6	0	79.6	20785.052
11	51.4	48.2	0.4	3.48	35.9105825
12	51.9	48.1	0	2.58	142.729123
13	50.7	48.9	0.3	164.1	1670.30825
14	51.3	48.7	0	4.02	41.4022082
15	50.5	49.4	0.1	130.97	1327.83249
16	50.6	48.5	0.8	2.32	23.5677753
17	51.4	48.6	0	165.1	1703.68884
18	52	48	0	72.13	753.007605
19	50.8	49.1	0.1	20.4	208.052992
20	50.2	49.7	0.1	0.87	8.76805078
21	50.7	49.1	0.2	0.3	3.05357999
22	49.9	50.1	0	22.79	228.310012
23	53.3	46.4	0.3	0.57	6.09933028
24	52.6	46.6	0.8	0.3	81.7550352
25	44.6	32.9	5.3	0.3	2.68618673
26	54.1	45.6	0.3	4.88	53.0025999
27	55.4	40.5	2.3	0.3	3.33665348
28	52.7	38.3	3.1	0.3	3.17403679
29	54.3	44.9	0.8	4.68	51.0182749
30	26	18.3	12.5	0.3	1.56593845
31	56.4	40.2	1.8	0.3	3.39688188
32	52.9	47.1	0	62.2	660.581099
33	49.8	50.2	0.1	15.38	153.767929
34	52.8	47.2	0.1	17.3	183.383439
35	52.6	47.4	3.9	5.29	55.862646
36	51.4	48.6	0	29.07	299.977193

Elaborada a partir de mediciones *in situ*.