

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos

Parte B: Mitigación de Biogás en Acapulco, México

Yuridia A. Salmerón-Gallardo¹, René Bernardo Elías Cabrera-Cruz², Ana L. Juárez-López¹, María L. Sampedro-Rosas¹, José L. Rosas-Acevedo¹, Julio C. Rolón-Aguilar² y Miguel Á. Valera Pérez³

Unidad Académica de Ciencias de Desarrollo Regional¹, Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”², Instituto de Ciencias³ Universidad Autónoma de Guerrero¹, Universidad Autónoma de Tamaulipas², Benemérita Universidad Autónoma de Puebla³ Acapulco de Juárez, Gro.¹; Tampico, Tamps.²; Puebla, Puebla³; México
rcabreracruz@docentes.uat.edu.mx

Abstract— Projections biogas generation and recovery were estimated through the Mexico LFG Model 2.0. The rate of methane generation (k) calculated is 0.220 m³/t, the potential rate of methane generation (L_0) is 69 m³/t with a correction factor of methane (MCF) of 1.0 for rapid anaerobic degradation, the capture efficiency is 61%, reducing GHG emissions is of 170.743 t/a CO_{2-eq} (45.05% of the carbon footprint determined in waste management). The data obtained provide information to local and state regulation of operation and for measures to reduce emissions of methane at the site of final disposal of Acapulco, Guerrero; Mexico.

Keyword— Biogas, methane, greenhouse gas emissions, landfills, municipal solid waste.

Resumen— Se estimaron proyecciones de generación y recuperación de biogás a través del Modelo Mexicano de Biogás 2.0. El índice de generación de metano (k) calculado es de 0.220 m³/ton, el índice potencial de generación de metano (L_0) es de 69 m³/t con un factor de corrección de metano (MCF) de 1.0 para una degradación anaeróbica rápida, la eficiencia de captura es de 61%, la reducción de emisiones de GEI es de 170,743 ton/a CO_{2-eq} (45.05% de la huella de carbono determinada en el manejo de los residuos). Los datos obtenidos proveen información local y estatal para la regulación de operación y para las medidas de reducción de emisiones de metano en el sitio de disposición final de Acapulco, Guerrero; México.

Palabras claves— Biogás, metano, GEI, vertederos, RSU.

I. INTRODUCCIÓN

La eliminación de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es uno de los principales problemas ambientales a enfrentar y los vertederos representan el medio más económico y sencillo de eliminación de residuos a nivel mundial, sobre todo en los países en vías de desarrollo y economías emergentes. Los vertederos se diseñan utilizando cubiertas sintéticas para evitar infiltraciones al subsuelo; no obstante, existe contaminación en acuíferos subterráneos debido a la formación de grietas a consecuencia de la edad de los vertederos y la humedad que es determinada por la precipitación y la temperatura del lugar. En la práctica, se ha demostrado que los vertederos no constituyen una solución definitiva ante la creciente generación de RSU por los impactos que ocasionan sobre el agua, el suelo, el aire principalmente durante el proceso de descomposición anaeróbico en el que se genera metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) como productos finales, contaminantes considerados dentro de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se emiten a la atmósfera y se relacionan con el agotamiento del ozono y el cambio climático [1]. La composición del biogás y de los lixiviados varía según la edad del vertedero y el tipo de residuo depositado; existe una amplia gama de contaminantes como el CH₄, CO₂, nitrógeno (N₂), azufre (SO₂) y compuestos sulfurosos que se asocian con el olor, las concentraciones de metales pesados se consideran bajas por lo que no existe una preocupación para la salud humana o el ambiente, pese a la presencia de arsénico y cromo en concentraciones que impactan directamente sobre la salud pública y los acuíferos [2].

En el proceso de descomposición anaeróbico, el gas emitido en mayor concentración es el metano (50-60%) producido por las bacterias metanogénicas, seguido del dióxido de carbono (40- 50%). Las emisiones de biogás representan una amenaza para el ambiente pero puede ser recuperado y utilizado como recurso energético alternativo; existen incentivos económicos y normativos, incluyendo el comercio de compensación de carbono, créditos de energía renovable y créditos de certificados de energía verde a la producción de electricidad a partir de fuentes renovables esto permite que la recuperación del biogás se presente como una fuente de combustible según los volúmenes potenciales de CH₄ que reducen las emisiones de GEI mediante la prevención de la liberación de contaminantes a la atmósfera a partir de métodos de conversión de energía [3]. La obtención del biogás se propone como un método eficaz por su potencial como fuente de energía renovable, pero un reto importante a considerar es la incertidumbre en las estimaciones de la tasa de generación y recuperación debido a la falta de información puntual de los vertederos [4].

A nivel global se estiman 70 millones de toneladas anuales de emisiones de metano; la captura donde el biogás es utilizado como fuente de electricidad o de almacenamiento reduce las emisiones de CH₄ en aproximadamente 5 millones de toneladas por año. La extracción del biogás requiere una tecnología costosa, razón por la que se ha implementado, sobre todo, en países desarrollados dadas las posibilidades de inversión y la viabilidad del sistema de captura. En Australia, los proyectos de biogás han aumentado en número y producción eléctrica total desde el año 2005, y en los últimos años han diseñado vertederos con sistemas de recuperación de biogás dirigidos a operarse como sitios de biorrefinería potencial para el aprovechamiento del CH₄ [5]. El biogás se extrae utilizando una serie de pozos y un sistema de aspirador que dirige el gas a un punto central donde puede ser procesado y tratado en función del uso final, utilizado para generar electricidad, para sustituir los combustibles fósiles en las operaciones industriales y de fabricación, acondicionado para el uso directo o transformado en combustible alternativo para vehículos, también puede ser utilizado para la cocción de la cerámica y vidrio soplado, para la calefacción de invernaderos y para el calentamiento de agua para la acuicultura [6].

En México los vertederos se describen como Sitios de Disposición Final (SDF) controlados y no controlados; los SDF no controlados son lugares inadecuados de disposición que no cuentan con los requisitos mínimos establecidos en la normatividad aplicable [7], los SDF controlados cumplen con las especificaciones de un relleno sanitario al involucrar métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos pero no cumplen completamente con la operación e infraestructura. El 60.54% de los residuos que se generan en el país se disponen en SDF controlados y no controlados, el 15.93% en tiraderos a cielo abierto y el porcentaje restante se desconoce dónde se deposita [8]. En 2010 las emisiones de CH₄ fueron de 7,938.9 Gg, las principales fuentes de emisión corresponden a las categorías de desechos, energía y agricultura, tan sólo la eliminación de residuos representa el 13.3% con un incremento considerable debido la disposición de residuos en SDF con prácticas de manejo deficientes [9].

A nivel nacional se han estimado emisiones de metano en la categoría de agricultura; Saldaña-Munive, J. A., Lozada-Carrera, A., Valera-Pérez, M. Á. y Otazo-Sánchez, E. M. [10] reportaron 0.182 Gg de emisiones de metano procedentes de los residuos agrícolas; Valdez, M. E., Orozco, M. E., Romero-Salazar, L. y Aguilar, C. [11] señalan el manejo del estiércol del ganado como fuentes importantes de emisiones de metano. En el año 2015, Arellano-Wences, H. J., Sampedro-Rosas, M. L., Cabrera-Cruz, R. B. E. y Juárez-López, A. L. [12] reportaron 15.987 Gg de CO₂ equivalente derivado del manejo de los RSU en Unidades Académicas de Acapulco, Guerrero; Vargas, O., Alvarado, E., López, C. y Cisneros, V. [13] destacan la necesidad de implementar programas de mitigación de GE en instituciones educativas; Sánchez-Santillán, N., Lanza-Espino, G., Garduño, R. y Sánchez-Trejo, R. [14] afirman que la influencia ocasiona un grave impacto; luego entonces, surge la necesidad de realizar

estimaciones que brinden información confiable con la finalidad de plantear estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático global.

En la primera entrega de este trabajo se determinó la huella de carbono a través de la herramienta de cálculo para las emisiones de GEI en el manejo de los RSU como parte del diagnóstico de GEI del municipio de Acapulco de Juárez, Guerrero; México. Se estimó una generación de 317,173 toneladas anuales de residuos con una tasa específica de generación per cápita de 1.10 kg/día siendo el municipio de Acapulco el mayor generador de RSU en el estado de Guerrero, debido al número de habitantes y a la actividad económica del lugar. Las emisiones de GEI en términos de la huella de carbono (378.93 Gg CO_{2-eq}) representan el 0.85% de las emisiones del sector desechos a nivel nacional; este resultado está fuertemente determinado por la generación de CH₄ en el SDF del municipio. En esta segunda parte se estima el potencial de generación y reducción de las emisiones de metano a través de la captura del biogás como medida de mitigación de GEI y se utiliza el Modelo Mexicano de Biogás para las estimaciones del escenario actual (Status Quo). Este trabajo resulta relevante porque provee una evaluación de factibilidad para la captura del biogás en proyectos futuros diseñados para la captura de CH₄ y producción de electricidad a nivel local y estatal.

II. METODOLOGÍA

Se utilizó el Modelo Mexicano de Biogás 2.0, desarrollado por la Agencia para la Protección del Ambiente de los Estados Unidos de América (por sus siglas en inglés USEPA) en el año 2009 [15]. Este modelo se basa en una hoja de cálculo de Excel para estimar la generación y recuperación de biogás mediante la siguiente ecuación de degradación de primer orden (1).

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_o \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (1)$$

Donde: Q_{LFG} = Es el flujo de biogás máximo esperado en m³/año.

i = Es el incremento en tiempo de 1 año.

n = Es el año del cálculo (año inicial de disposición de RSU).

j = Es el incremento de tiempo en 0.1 años.

k = Es el índice de generación de metano (1/año).

L_o = Es la generación potencial de metano en m³/Mg.

M_i = Es la masa de residuos dispuestos en el año i (Mg).

t_{ij} = Es la edad j de la masa de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales).

MCF = Es el factor de corrección de metano.

F = Es el factor de ajuste por incendios.

La ecuación (1) asume un período de seis meses entre la disposición de los RSU y la generación de biogás, después de seis meses asume que la generación de biogás desciende exponencialmente a medida que la fracción orgánica es consumida, también considera que el año de generación máxima ocurre en el primer año de clausura (esto depende del índice de disposición en los años anteriores al cierre). Los resultados obtenidos proyectan la generación de RSU en toneladas anuales (ton/año), la generación y recuperación de biogás se estima en metros cúbicos por hora (m³/hr), la eficiencia de captura en porcentaje, la capacidad máxima de energía en megavatios (MW), y la reducción de emisiones de GEI en toneladas anuales de CO_{2-eq} para la situación actual (*Status Quo*). La estimación se realiza a través de datos específicos que se introducen al modelo, como la cantidad de residuos depositados anualmente, el año de apertura y clausura, la precipitación promedio anual y las prácticas de diseño y manejo del SDF;

así como valores por *default* para el índice de generación de metano (k), la generación potencial de metano (L_0).

A. Valores del índice de generación de metano (k).

La Tabla I, muestra las categorías de degradación de los residuos orgánicos que determinan los valores del índice de generación de metano (k) en función del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, el pH, y la temperatura.

Tabla I. Grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación.

<i>Grupos de residuos orgánicos</i>	<i>Características</i>	<i>Biodegradación</i>
Degradación rápida (DR)	Residuos alimenticios y otros orgánicos	1 año
Degradación moderadamente rápida (DMR)	Papel higiénico y residuos de parques y jardines	2 años
Degradación moderadamente lenta (DML)	Papel, cartón y textiles	5 años
Degradación lenta (DL)	Madera, caucho, piel, huesos y paja	10 años

La Tabla II, contiene los valores por *default* para los factores de generación de metano. El contenido de humedad está determinado por el tipo de clima, el cual se clasifica en cinco regiones (sureste, oeste; centro; noreste y noroeste) según la precipitación promedio anual de las ciudades más grandes de la República Mexicana; la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano y el pH se basan en el tiempo de degradación de los residuos; la temperatura se considera constante debido al calor generado por las bacterias anaeróbicas.

Tabla II. Valores del índice de generación de metano (k) (1/año).

<i>Factores</i>	<i>Sureste</i>	<i>Oeste</i>	<i>Centro</i>	<i>Noreste</i>	<i>Noroeste</i>
DR	0.300	0.220	0.160	0.150	0.100
DMR	0.130	0.100	0.075	0.070	0.050
DML	0.050	0.040	0.032	0.030	0.020
DL	0.025	0.020	0.016	0.015	0.010

B. Valores para la generación potencial de metano (L_0).

La Tabla III, contiene los valores por *default* para la generación potencial de metano (L_0), estos valores indican la cantidad total de gas metano que podría producirse por una tonelada de residuos degradada, la cual depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos.

Tabla III. Valores por *default* para la generación potencial de metano (L_0) (m^3/ton).

<i>Factores</i>	<i>Sureste</i>	<i>Oeste</i>	<i>Centro</i>	<i>Noreste</i>	<i>Noroeste</i>
DR	69	69	69	69	69
DMR	115	126	138	138	149
DML	214	214	214	214	214
DL	202	202	202	202	202

C. Factor de corrección de metano (MCF).

La Tabla IV, contiene el factor de corrección de metano (MCF) que consiste en un ajuste de estimación para la generación de biogás, el cual considera el grado de degradación anaeróbica de los residuos en función de la profundidad y las prácticas de manejo del SDF.

Tabla IV. Factor de corrección de metano (MCF).

Manejo del SDF	Profundidad <5 metros	Profundidad >5 metros
Sin manejo	0.4	0.8
Con manejo	0.8	1.0
Semi-aeróbico	0.4	0.5
Condición desconocida	0.4	0.8

D. Cálculo de la eficiencia de captura.

El modelo mexicano de biogás calcula la eficiencia de captura de biogás en el SDF, basándose en los siguientes factores: cobertura del sistema de captura, profundidad de los residuos, tipo de cobertura y extensión, recubrimiento inferior, compactación de residuos, tamaño del área de disposición activa y manejo de lixiviados. La información para los cálculos se introduce a través de respuestas que describen las condiciones que afectan la eficiencia de captura, algunos datos estiman las condiciones futuras para el año que se pretende implementar el sistema de captura del biogás; en función de las respuestas proporcionadas, el modelo selecciona los valores por defecto para k , L_0 , MCF, para el factor de ajuste por incendios y para la eficiencia de captura.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sitio de disposición final de Acapulco, Guerrero es gestionado desde el año 1998, en el año 2020 se proyecta la clausura; diariamente se depositan 869 toneladas de residuos y anualmente se reciben alrededor de 317,173 toneladas de RSU; se ubica en el Paso Texca de Acapulco; Guerrero, el área total del SDF es de 105 hectáreas de las cuales se destinan 15 hectáreas para la disposición, cuenta con caminos de acceso interiores, caseta de vigilancia y control. En la Figura 1, se observa el área del SDF así como las celdas de disposición (la número cero se encuentra en la etapa de posclausura de acuerdo al tiempo de operación y clausura). Existen cuatro tinajas de lixiviados y una superficie destinada al secado de lodos procedentes de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Acapulco, la compactación de los residuos es mayor a 600 kg/m^3 y los residuos son cubiertos en forma continua en un tiempo de 24 horas posteriores a su depósito. La USEPA [15] señala que bajo estas características el SDF de Acapulco, Guerrero asume un manejo, por tanto existe una degradación anaeróbica y presenta un Factor de Correlación de Metano (MCF) de 1.0 basado en la profundidad.



Fig. 1. Sitio de Disposición Final de Acapulco, Guerrero; México (Imagen Satelital DG, 2016).

En la Figura 2, se presenta la composición de los RSU de Acapulco, Guerrero. El 67.8 % de los residuos generados son orgánicos y el 32.2% inorgánicos. La clasificación incluye residuos de comida, papel, cartón, poda de jardines, madera, caucho, piel, huesos, paja, textiles, papel higiénico, pañales (asumiendo 20% orgánico y 80% inorgánico), metales, residuos de construcción y demolición, vidrio, cerámica y plásticos. Aguilar-Virgen, Q., Ojeda-Benítez, S., Taboada-González, P. y Quintero-Núñez, M. [16] reportan valores promedio de 64% de residuos orgánicos generados en comunidades urbanas de Baja California (Mexicali 66.43% y Ensenada 68.57%); al igual que en el municipio de Acapulco, el grado de componentes orgánicos es alto lo cual determina el índice de generación de metano (k) y el potencial de generación de metano (L_0).

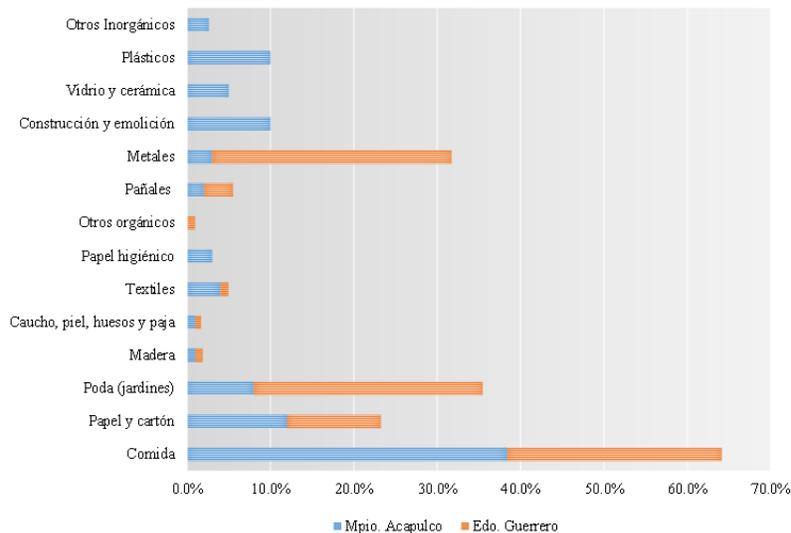


Fig. 2. Caracterización de RSU (datos específicos para el área de estudio).

En la Figura 3, se muestran las proyecciones de disposición de RSU estimadas para cada año, desde el inicio de las actividades del SDF en el año 1998 hasta el 2020, año de cierre proyectado; asimismo se presentan las toneladas de residuos acumulados durante todo el ciclo de vida útil del SDF del municipio. Las estimaciones se realizaron con los datos de generación de RSU contenidos en la parte A de este

trabajo y se estima un aumento de generación de RSU del 2% anual. En el año 1998 se depositaron 222,100 ton/a de residuos; en el año actual se estiman 317,173 ton/a y para el año de clausura se estima una disposición de residuos de 343,300 ton/a de RSU. En el año 2020 habrá una disposición acumulada de 6, 403,773 toneladas de RSU en el SDF de Acapulco, Guerrero. Mebarki, B., Adouane, B., Khaldi, F., Dehimi, S. y Haddad, D. [17] señalan la importancia del reciclaje de materiales no sólo para minimizar el uso de recursos no renovables, sino también para reducir la cantidad de residuos añadidos a los vertederos. En el municipio sólo se recicla el 6% de los residuos por el sector informal, el 94% de los RSU se depositan en el SDF controlado, un medio que se considera económico pero que sigue representando un riesgo para el ambiente y la salud pública.

A Valores del índice de generación de metano (k).

La Tabla V, muestra los valores de (k) para la región Oeste de acuerdo con la ubicación del municipio de Acapulco, Guerrero. Se observan valores para cada categoría de degradación dentro del rango 0.07 para sitios húmedos. El rango de (k) se basa en la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, el pH, la temperatura y sobre todo el contenido de humedad con más de 1,000 mm de lluvia anual, debido a que en el área de estudio la precipitación pluvial anual varía de 1,500 a 2,000 mm.

Tabla V. Valores del índice de generación de metano (k) para el SDF de Acapulco, Gro.

<i>Grupos de residuos orgánicos</i>	<i>Índice de generación de CH₄ (k)</i>
Degradación rápida (DR)	0.220
Degradación moderadamente rápida (DMR)	0.100
Degradación moderadamente lenta (DML)	0.040
Degradación lenta (DL)	0.020

B Valores para la generación potencial de metano (L_o).

En la Tabla VI, se observan los valores de (L_o) basados en el contenido de materia orgánica (67.8%) y las prácticas de operación del SDF tales como el control de la disposición en un área específica, la ausencia de incendios y explosiones, el recubrimiento de las celdas 2-5 con geomembranas sintéticas, la profundidad superior a los 5 metros, los RSU cubiertos diariamente con material originado de las celdas lo cual reduce las emisiones de biogás a la atmosfera así como la infiltración de aire y lluvia, la compactación es mayor a 600 kg/m³ por lo que habrá menos infiltración de aire y la calidad de biogás podría ser mejor. Las características señaladas estiman un alto potencial de generación de metano que podría producirse en el SDF de Acapulco por tonelada de residuos degradados. Sin embargo, los niveles de lixiviados también son altos, lo que limita la eficiencia de captura asociada a la alta precipitación del lugar que determina un nivel de humedad elevado.

Tabla VI. Valores para la generación potencial de metano (L_o) del SDF de Acapulco, Guerrero.

<i>Categoría de residuos orgánicos</i>	<i>Potencial de generación de CH₄ (L_o) (m³/ton)</i>
Degradación rápida (DR)	69
Degradación moderadamente rápida (DMR)	126
Degradación moderadamente lenta (DML)	214
Degradación lenta (DL)	202

C Factor de corrección de metano (MCF).

El factor de corrección de metano estima un valor de 1.0 basado en las características de profundidad y las prácticas de manejo realizadas en el SDF de Acapulco, Guerrero. Este ajuste de estimación para la generación de biogás considera un grado de degradación anaeróbica aceptable y un 50% de contenido de metano en el biogás.

D Proyecciones de generación y recuperación de biogás.

En la Tabla VII, se muestra la disposición anual y acumulada del SDF de Acapulco, Guerrero (*Status Quo*). En el año 2020 se propone la implementación del sistema de captura de biogás para la mitigación de emisiones de GEI. Las estimaciones realizadas suponen la recuperación de biogás con una eficiencia de captura típica para un SDF controlado de 61% y una reducción de 170,743 ton/a CO₂-eq durante el primer año de captura de biogás, esto representa una disminución del 45.05% respecto de la huella de carbono determinada en la primera parte de esta investigación que se totaliza en 378,930 ton/a CO₂-eq. Aguilar-Virgen, Q., Ojeda-Benítez, S., Taboada-González, P. y Quintero-Núñez, M. [16] reportan una eficiencia de captura de 66% para el SDF de Tijuana que presenta el 76.75% de materia orgánica, en ambos casos un porcentaje mayor determinado por la generación de RSU fuertemente relacionado con el tipo de economía y el número de habitantes en comparación con el municipio de Acapulco, Guerrero. En el año 2003, el proyecto de captura de biogás de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, obtuvo 8 MW de electricidad con el que abasteció el 52% del alumbrado público de siete municipios; aunque la capacidad para generar energía eléctrica en el SDF de Acapulco, Guerrero sólo representa 4.3 MW en su contenido más elevado, de acuerdo con Themelis-Nickolas, J. y Ulloa-Priscilla, A. [18] la captura y combustión de biogás es un método eficaz a considerar ya que contribuye a mejorar la calidad del agua, del aire y la reducción de emisiones de GEI mediante la recolección de lixiviados y los combustibles fósiles evitados durante los procesos convencionales de generación de electricidad, del mismo modo, disminuye el riesgo y la vulnerabilidad al evitar la exposición de la población aledaña al olor del metano.

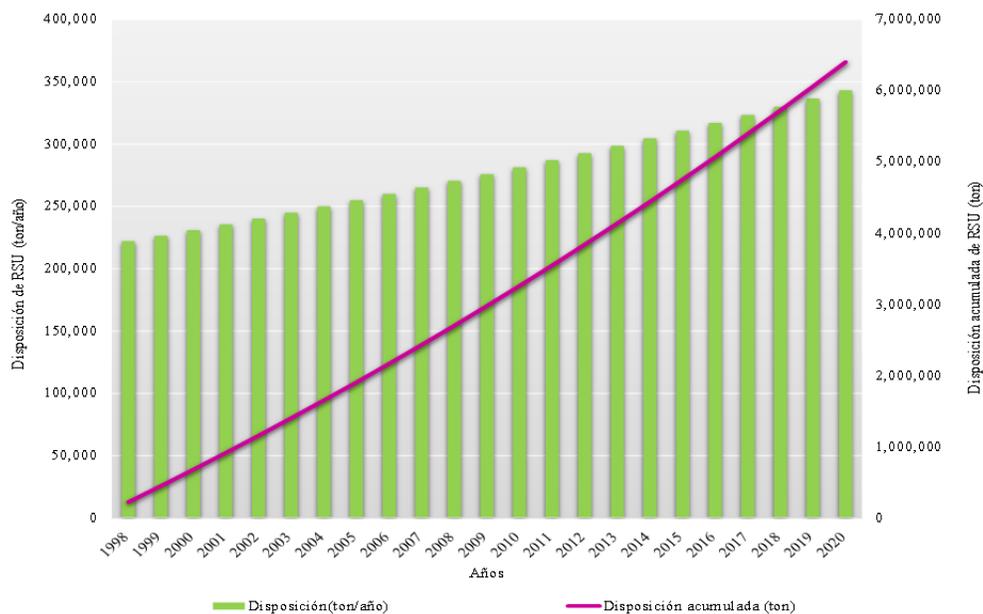


Fig. 3. Proyecciones de disposición de RSU estimada y acumulada en el SDF de Acapulco, Gro.

Tabla VII. Proyecciones de generación y recuperación de biogás del SDF de Acapulco, Guerrero.

Año	Disposición (ton/año)	Disposición acumulada (ton)	Generación biogás (m ³ /hr)	Eficiencia captura (%)	Recuperación biogás estimada (m ³ /hr)	Capacidad electricidad (MW)	Reducción Emisión Estimadas	
							CH ₄ ton/a	CO ₂ -eq ton/a
2016	317,173	5,070,373	3,732					
2017	323,500	5,393,873	3,863					
2018	330,000	5,723,873	3,993					
2019	336,600	6,060,473	4,122					
2020	343,300	6,403,773	4,250		2,593	4.3	8,131	170,743
2022		6,403,773	3,897		2,377	3.9	7,454	156,540
2024		6,403,773	3,129		1,909	3.2	5,985	125,693
2026		6,403,773	2,554		1,558	2.6	4,885	102,587
2028		6,403,773	2,115		1,290	2.1	4,046	84,960
2030	Clausura	6,403,773	1,774	61%	1,082	1.8	3,394	71,275
2032		6,403,773	1,505		918	1.5	2,880	60,471
2034		6,403,773	1,290		787	1.3	2,467	51,811
2036		6,403,773	1,114		680	1.1	2,132	44,772
2038		6,403,773	970		592	1.0	1,856	38,978
2040	Posclausura	6,403,773	850		519	0.9	1,627	34,158

En la Figura 4, se visualizan los resultados de las proyecciones de generación y recuperación de la situación actual del municipio de Acapulco; existe una disminución exponencial a medida que se consume la fracción orgánica de los residuos; transcurridos 20 años desde la clausura del SDF, el modelo mexicano de biogás asume el consumo total de la fracción orgánica para la etapa de posclausura; resultando oportuno el aprovechamiento del metano durante los primeros 10 años del ciclo de vida del vertedero, momento en el que se obtiene una importante fuente de electricidad; después la clausura el metano disminuye gradualmente, el vertedero se considera maduro y entra a la fase de fermentación presentando un rápido porcentaje de degradación.

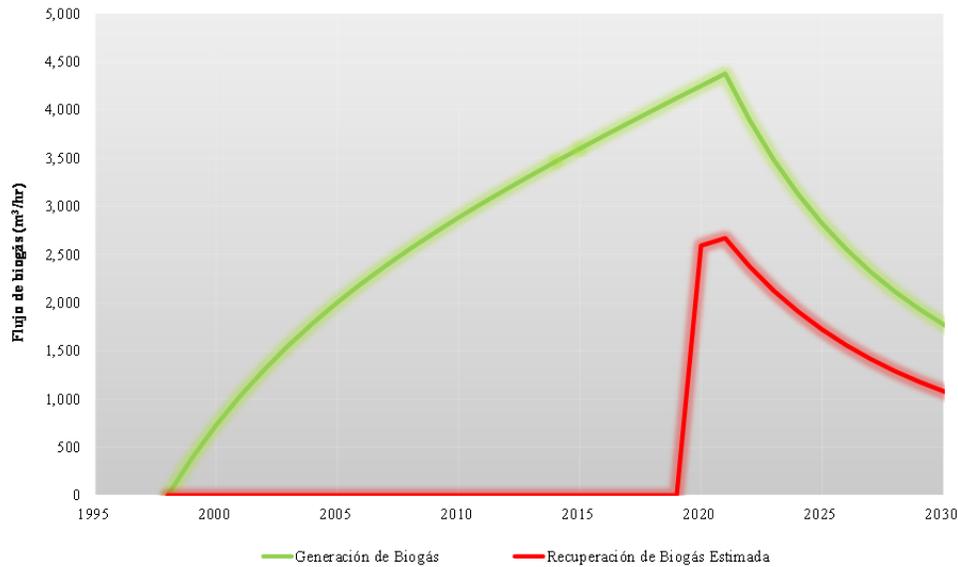


Fig. 4. Proyecciones de generación y recuperación de biogás del SDF de Acapulco, Gro. (*Status Quo*).

Mambeli-Barros, R., Tiago-Filho, G. L. y Rodrigo-Da Silva, T. [20] determinan que la producción de electricidad a partir de biogás es sustancialmente rentable a través de mecanismo de incentivos para mejorar y ampliar las plantas de energía, en países desarrollados existen políticas de incentivos que ofrecen una garantía adicional de retorno de la inversión y la rentabilidad. Sin embargo, Zamorano, M., Pérez-Pérez, J. I., Aguilar-Pavés, I. y Ramos-Ridao, Á. [19] señalan que a pesar de los beneficios ambientales y sociales que representa la captura y el uso del biogás, su aplicación en los países en vías de desarrollo podría verse limitado por la falta de cumplimiento de la legislación, el rendimiento financiero desfavorable para los fondos de inversión, la falta de conocimientos tecnológicos, y la disponibilidad de infraestructura. A efecto de lo anterior, es importante considerar que la viabilidad económica también depende de la calidad del biogás, los precios locales de la energía, las especificaciones de los criterios económicos para la tecnología de generación de electricidad, el costo de operación y mantenimiento así como los impuestos sobre el carbón y la energía para la protección del ambiente.

IV. CONCLUSIONES

Para el año 2017 se estima una disposición de 323,500 ton/a y para el año 2020 habrá una disposición acumulada de 6, 403,773 toneladas de residuos en el SDF de Acapulco, Guerrero. El índice de generación de metano (k) basado en la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, el pH, la temperatura y la precipitación, se define con una degradación rápida de 0.220 m³/ton para un SDF con alto contenido de humedad. El valor para la generación potencial de metano (L_0) (69 m³/ton) es determinado por la caracterización de residuos específica para el municipio: 67.8 % orgánicos y 32.2% inorgánicos. El porcentaje de la fracción orgánica determina un alto potencial de generación de metano que podría producirse en el SDF de Acapulco; sin embargo, la eficiencia de captura se ve afectada por los altos niveles de lixiviados a causa de la precipitación del área de estudio. El factor de corrección de metano (MCF) estima un valor de 1.0 considerando un grado de degradación anaeróbica aceptable y un 50% de contenido de metano en el biogás del SDF de Acapulco, Gro. La eficiencia de captura para la recuperación de biogás es de 61%, un valor típico para SDF controlados. Se estima una reducción de 170,743 ton/a CO_{2-eq} durante el primer año de captura de biogás, esta cantidad representa una disminución del 45.05% respecto de la huella de carbono determinada en la primera parte A de esta investigación. Para el SDF de Acapulco, Guerrero se estima una baja capacidad de generación de

energía eléctrica (4.3 MW) debido a que se define como un vertedero maduro (>10 años) donde el metano entra en una fase de fermentación presentando un rápido porcentaje de degradación (>70%). No obstante, resulta un método a considerar debido a la capacidad de reducción de las emisiones de GEI; los valores de (k) y (Lo) podrían aumentar a fin de mejorar la capacidad de generación de energía a través de mejoras en las prácticas de manejo del SDF para evitar las fugas de emisiones a la atmósfera y las infiltraciones al subsuelo.

Las estimaciones de recuperación y generación de biogás enfrentan una incertidumbre significativa por la falta de información precisa; sin embargo es necesario estimar los riesgos ambientales para proponer medidas de valorización para los residuos; si se colecta todo el CH₄ de los vertederos se podría generar una importante fuente de electricidad, pero debido a las limitaciones económicas y de infraestructura como en el caso del municipio de Acapulco, Guerrero se enfrenta a un reto superior; aun así, es importante predecir la cantidad de biogás producido y su evolución en el tiempo a través de métodos indirectos como el Modelo Mexicano de Biogás debido a los altos costos de análisis, la complejidad y duración de las estimaciones directas. Los resultados de este trabajo aportan parámetros necesarios para el aprovechamiento de los residuos como fuente de energía renovable e información de utilidad para las autoridades en el proceso de planificación a través de acciones específicas como la reducción de materia orgánica, el reciclaje y la captura del biogás; cabe destacar la importancia del reciclaje no sólo para minimizar el uso de recursos no renovables, sino también para reducir la cantidad de residuos depositados en los vertederos a consecuencia de aumentar el ciclo de vida útil, ya que se sigue considerando un medio económico en los países en vías de desarrollo aunque en la práctica el costo resulta elevado y representan un riesgo para el ambiente y la salud pública. El estudio de las emisiones de GEI en vertederos de RSU. Parte A. Huella de carbono y parte B. Mitigación de biogás en el Acapulco, Guerrero; México provee una evaluación de factibilidad para proyectos futuros a nivel local y estatal diseñados para hacer frente al cambio climático global.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de una beca de estudios de doctorado con número de registro 333627. A la División de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas por el acceso a las bases de datos internacionales durante la estancia de movilidad nacional.

REFERENCIAS

- [1] N. S. Bolan, R. Thangarajan, B. Seshadri, U. Jena, K. C. Das, H. Wang, and R. Naidu, “Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas,” *Bioresour. Technol.*, vol. 135, pp. 578–87, May 2013.
- [2] C. A. Bareither, G. L. Wolfe, K. D. McMahon, and C. H. Benson, “Microbial diversity and dynamics during methane production from municipal solid waste,” *Waste Manag.*, vol. 33, no. 10, pp. 1982–92, Oct. 2013.
- [3] F. Caresana, G. Comodi, L. Pelagalli, P. Pierpaoli, and S. Vagni, “Energy production from landfill biogas: An Italian case,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 10, pp. 4331–4339, Oct. 2011.
- [4] J. Wang, X. Fang-Fang, Y. Bai, F. Cheng-Ran, S. Dong-Sheng, and H. Ruo, “Methane oxidation in landfill waste biocover soil: kinetics and sensitivity to ambient conditions,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 5, pp. 864–70, May 2011.
- [5] H. R. Amini, D. R. Reinhart, and K. R. Mackie, “Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties,” *Waste Manag.*, vol. 32, no. 2, pp. 305–16, Feb. 2012.
- [6] S. L. Machado, M. F. Carvalho, G. Jean-Pierre, O. M. Vilar, and J. C. F. Do Nascimento, “Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 153–161, Jan. 2009.

- [7] SEMARNAT, “Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos.” Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación., 2004.
- [8] SEMARNAT, “Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos,” *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 2012. [Online]. Available: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnosticobasico2012.pdf>. [Accessed: 08-May-2016].
- [9] INECC, *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2010, p. 53.
- [10] J. A. Saldaña-Munive, A. Lozada-Carrera, M. Á. Valera-Pérez, and E. M. Otazo-Sánchez, “Emisiones de N₂O estimadas mediante la Evaluación Rápida de Fuentes de Contaminación Ambiental,” *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 4, pp. 79–94, 2015.
- [11] M. E. Valdez, M. E. Orozco, L. Romero-Salazar, and C. Aguilar, “Modelo de emisión-captura de gases de efecto invernadero en el Estado de México,” *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 3, pp. 31–42, 2015.
- [12] H. J. Arellano-Wences, M. L. Sampedro-Rosas, R. B. E. Cabrera-Cruz, A. L. Juárez-López, J. L. Rosas-Acevedo, and E. Cortes-Badillo, “Generación de emisiones de gases efecto invernadero en unidades académicas de la Universidad Autónoma de Guerrero,” *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 7, pp. 61–67, 2015.
- [13] O. Vargas, E. Alvarado, C. López, and V. Cisneros, “Plan de manejo de residuos sólidos generados en la Universidad Tecnológica de Salamanca,” *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 5, pp. 83–91, 2015.
- [14] N. Sánchez-Santillán, G. Lanza-Espino, R. Garduño, and R. Sánchez-Trejo, “La influencia antropogénica en el Cambio Climático bajo la óptica de los Sistemas Complejos,” *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 6, pp. 69–84, 2015.
- [15] USEPA, *Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás, Versión 2.0*. Phoenix, Arizona: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2009, p. 35.
- [16] Q. Aguilar-Virgen, S. Ojeda-Benítez, P. Taboada-Gonzalez, and M. Quintero-Nuñez, “Estimación de las constantes k y Lo de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 28, no. 1, pp. 43–49, 2012.
- [17] B. Mebarki, B. Adouane, F. Khaldi, S. Dehimi, and D. Haddad, “Theoretical estimation of the production of biogas from the landfill of Batna city and its electrical conversion by a SOFC,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 39, pp. 13799–13805, Oct. 2015.
- [18] J. Themelis-Nickolas and A. Ulloa-Priscilla, “Methane generation in landfills,” *Renew. Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1243–1257, Jun. 2007.
- [19] M. Zamorano, J. I. Pérez-Pérez, I. Aguilar-Pavés, and Á. Ramos-Ridao, “Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 5, pp. 909–922, Jun. 2007.
- [20] R. Mambeli-Barros, G. L. Tiago-Filho, and T. Rodrigo-Da Silva, “The electric energy potential of landfill biogas in Brazil,” *Energy Policy*, vol. 65, pp. 150–164, Feb. 2014.