

Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás

Aguilar-Virgen, Q.¹, Taboada-González, P. A.², Ojeda-Benítez, S.³

Fecha de recepción: 10 de enero de 2011 – Fecha de aprobación: 31 de marzo de 2011

RESUMEN

La estimación de las emisiones de biogás en los sitios de disposición final ha sido fuertemente analizada por diversos investigadores en todo el mundo. El control y el uso de este gas requieren estimar, con una certidumbre razonable, tanto la producción diaria como la producción acumulativa de metano (CH₄) a largo plazo. Para ello, la literatura especializada muestra diversos modelos que son usados para predecir la generación de biogás. En el caso de México, se cuenta con el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0, un método que utiliza una ecuación de degradación de primer orden, la cual fue modificada por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA) en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005. En todos los modelos para evaluar el potencial de generación de biogás de un sitio, la composición de los residuos es uno de los factores más importante. Con la finalidad de disminuir la incertidumbre en las proyecciones, se considera que la determinación de los parámetros de generación de gas *in situ* es la mejor opción.

Palabras clave: biogás, energía renovable, gases de efecto invernadero, modelo mexicano, rellenos sanitarios.

Mexican model for the estimation of the generation of biogas

ABSTRACT

The estimate of emissions of biogas from disposal sites has been heavily studied by many researchers around the world. The control and use of this gas need to estimate, with reasonable certainty, both daily production and the cumulative production of methane (CH₄) in the long term. To do this, the literature shows various models that are used to predict biogas generation. In the case of Mexico, with Mexico LFG Model Version 2.0, a method using an equation of first order decay, which was amended by Environment Protection Agency (EPA) in LandGEM Model version 3.02 in 2005. In all models to assess the potential for generation of biogas from a site, the composition of waste is one of the most important. In order to reduce uncertainty in projections, it is considered that the determination of the parameters of *in situ* gas generation is the best option.

Keywords: Mexican model, sanitary landfill, biogas, renewable energy, greenhouse gases.

¹ Candidato a Doctor en Ciencias del programa Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. Blvd. Benito Juárez y Calle de la Norma S/N, C.P. 21280, Mexicali, Baja California, México. E-mail: qaguilarv@gmail.com

² Candidato a Doctor en Ciencias del programa Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. E-mail: taboadapa@gmail.com

³ Investigadora Titular del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. E-mail: sara.ojeda.benitez@gmail.com

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de noviembre de 2011. Este artículo de divulgación es parte de **Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**, Vol. 15, No. 1, 2011, ISSN 1665-529X.

INTRODUCCIÓN

El biogás generado en los rellenos sanitarios (RESA's) es una mezcla de gases que se producen como resultado de factores físicos, químicos y procesos microbianos que tienen lugar dentro de la basura en la fracción orgánica. Estudios realizados en los RESA's donde se usan los datos de pruebas de extracción de biogás, muestran un rango de producción de 0.05 y 0.40 m³ de biogás por kg de residuos (World Bank Group 2004). Los principales componentes del biogás son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), y pequeñas cantidades de varios compuestos trazas (Machado *et al.* 2009, Tchobanoglous *et al.* 1994, Marshall 2007).

La composición de los residuos es el factor más importante en la evaluación del potencial de generación de biogás de un sitio. El potencial máximo de volumen de biogás depende de la cantidad y tipo de materia orgánica dentro de la masa de residuos ya que la descomposición de los residuos es la fuente de todo el biogás producido. Otros factores que influyen la tasa de producción de biogás son el contenido de humedad, nutrientes, contenido bacteriano, nivel de pH, y el diseño específico del lugar y los planes de operaciones (World Bank Group 2004, Machado *et al.* 2009, Kumar *et al.* 2004b, Kong 2008).

La factibilidad de proyectos para el aprovechamiento del biogás en los RESA's depende de estimar, con una certidumbre razonable, tanto la producción diaria como la producción acumulativa de CH₄ en el largo plazo. Tales valores son usualmente calculados con expresiones matemáticas que consideran 100% de conversión (Meraz *et al.* 2008).

Los estudios de estimación de generación de biogás han cobrado fuerza debido al aumento en la demanda energética y a que los residuos sólidos urbanos (RSU) depositados en los RESA's sin un manejo apropiado, pueden producir problemas de contaminación de aire, agua y suelo, con el consecuente riesgo de la salud pública (Aguilar-Virgen *et al.* 2009). Además la contribución al efecto invernadero del CH₄, uno de los gases presentes en el biogás que se genera en los RESA's, es 21 veces más potente respecto al CO₂ (Batool y Chuadhry 2008).

Por lo expuesto anteriormente, la estimación de las emisiones de biogás en los sitios de disposición final ha sido fuertemente analizada por diversos investigadores en todo el mundo, con fines de extracción y utilización como fuente renovable de energía y mitigación de emisiones de gases de efecto

invernadero (GEI).

En México, los estudios realizados para calcular la generación de biogás en RESA's no han seguido la misma metodología, ni utilizado el mismo modelo matemático, por lo que es importante estandarizar criterios para poder realizar comparaciones válidas respecto a la evaluación de recuperación de biogás (Aguilar *et al.* 2010).

Considerando la necesidad de desarrollar estudios estandarizados en México, los objetivos de este artículo son presentar un análisis detallado del modelo mexicano de biogás y exponer brevemente otros modelos aplicados a nivel mundial.

MODELO MEXICANO DE BIOGÁS

Este modelo fue inicialmente desarrollado en el 2003 por SCS Engineers bajo contrato con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la EPA. El Modelo Mexicano de Biogás Versión 1.0 se utilizó para estimar la generación y recuperación de biogás en RESA's mexicanos que contaban o planeaban tener un sistema de recolección de biogás. Posteriormente, en el 2009, se desarrolló una actualización y mejoramiento de esta versión, logrando el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0.

Este modelo requiere que el usuario alimente datos específicos, tales como, el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, precipitación promedio anual y eficiencia del sistema de recolección. El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L_0). Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de RESA's representativos de México, y la relación entre los valores de k y L_0 observados en RESA's de E.U. Los valores de k y L_0 varían dependiendo de la precipitación promedio anual y pueden utilizarse para proyectar la generación de biogás en RESA's municipales localizados en las diferentes regiones de México.

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden que supone que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo antes de la generación de CH₄ (ver ecuación 1). El modelo asume que: (a) el período es de un año desde la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás y (b) por cada unidad de residuos después de un año la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \tag{1}$$

Donde: Q_{LFG} es el flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$), i es el incremento en tiempo de 1 año, n es el año del cálculo –año inicial de disposición de residuos–, j es el incremento de tiempo en 0.1 años, k es el índice de generación de metano ($1/año$), L_0 es la generación potencial de metano (m^3/Mg), M_i es la masa de residuos dispuestos en el año i (Mg), t_{ij} es la edad de la sección 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.

Empleando la ecuación 1 se puede estimar la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

Con la excepción de los valores de k y L_0 , el modelo mexicano de biogás requiere datos específicos del relleno en cuestión para producir las proyecciones de generación. Aunque el modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y el potencial de generación de metano (L_0) (SCS Engineers 2009), éstos pueden ser modificados de acuerdo a las características *in situ*. A continuación se describe cada uno de estos parámetros:

Índice de generación de metano (k). Representa la tasa de biodegradación de primer orden a la cual el CH_4 es generado luego de la disposición de residuo en el sitio y está relacionado con el período de vida de

los residuos de acuerdo con la ecuación: período = $\ln(2) / k$. Conforme el valor de k incrementa, la generación de CH_4 en un RESA también incrementa (siempre y cuando el RESA siga recibiendo residuos). Luego disminuye con el tiempo, después que el RESA es clausurado (IPCC 2002 & 2006, SCS Engineers 2009, World Bank Group 2004).

La constante k depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura. De ellos, el contenido de humedad dentro de un relleno es uno de los parámetros más importantes que inciden en la tasa de generación del gas, ya que sirve como medio para el transporte de nutrientes y bacterias. Su presencia dentro de un RESA depende de la infiltración de agua de lluvias a través de la cobertura del relleno, el contenido inicial de humedad del residuo, la cantidad y tipo de cobertura diaria que se usa en el sitio, la permeabilidad y tiempo de disposición de la cobertura final, el tipo de impermeabilización de la base, el sistema de recolección de lixiviados, y la profundidad del residuo (ETEISA 2006, SCS Engineers 2009, World Bank Group 2004).

En el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 se han asignado valores de k para las cuatro categorías de degradación: degradación de residuos muy rápida (DRR), degradación de residuos moderadamente rápida (DRMR), degradación de residuos moderadamente lenta (DRML), y degradación de residuos muy lenta (DRL), en cada una de las 5 regiones climáticas de México (ver Tabla 1). Estos valores varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el RESA, tipo de residuo y clima.

Tabla 1. Valores del Índice de generación de metano (k)

Categoría de Residuo	Sureste	Oeste	Centro / Interior*	Noroeste	Noroeste & Interior Norte
DRR	0.300	0.220	0.160	0.150	0.100
DRMR	0.130	0.100	0.075	0.070	0.050
DRML	0.050	0.040	0.032	0.030	0.020
DRL	0.025	0.020	0.016	0.015	0.010

* Incluye Distrito Federal
Fuente: SCS Engineers (2009)

Otros autores (ETEISA 2006, World Bank Group 2004) marcan que típicamente el rango de los valores de k van de 0.02 para sitios secos a 0.047 para sitios húmedos. Las tasas más rápidas ($k = 0,2$ o una vida

media cercana a los 3 años) están asociados a condiciones de gran humedad y de materiales altamente degradables, tal como, residuos alimenticios. Las tasas más lentas ($k = 0,02$ o una vida

media de cercana a los 35 años) están asociados a condiciones de sequedad y de materiales lentamente degradables, tales como la madera o el papel (IPCC 2006).

Potencial de generación de metano (L₀). Este parámetro describe la cantidad total de CH₄ potencialmente producida por unidad de masa de residuos cuando ésta se degrada, y depende casi exclusivamente de la composición de los residuos en el RESA, en particular de la fracción orgánica presente (ETEISA 2006, IPCC 2006, SCS Engineers 2009, World Bank Group 2004). Su valor se estima con base en el contenido de carbono del residuo, la fracción de carbono biodegradable, y el factor de conversión estequiométrico (ETEISA 2006). A mayor contenido de celulosa, mayor valor de L₀. Los valores

teóricos de L₀ varían entre 6.2 y 270 m³/Mg de residuos (SCS Engineers 2009) y los valores típicos de este parámetro están en el rango entre 125 y 310 m³/Mg de residuo (ETEISA 2006). La EPA usa un valor típico de 170 m³/Mg de residuo (World Bank Group 2004).

En el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0, se han asignado valores de L₀ para las cuatro categorías de degradación en cada una de las 5 regiones climáticas de México (ver Tabla 2). Estos varían de acuerdo a las características de los residuos de los sitios y se asume que permanecen constantes para todos los climas, excepto en la categoría 2 donde existe una variación con el clima debido a las diferencias en el tipo de vegetación local.

Tabla 2. Valores de la Generación potencial de Metano (L₀)

Categoría de Residuo	Sureste	Oeste	Centro / Interior*	Noroeste	Noroeste & Interior Norte
DRR	69	69	69	69	69
DRMR	115	126	138	138	149
DRML	214	214	214	214	214
DRL	202	202	202	202	202

* Incluye Distrito Federal
Fuente: SCS Engineers (2009)

Si se tiene información del sitio, se puede estimar el valor de L₀ empleando la ecuación 2 de la

metodología del IPCC (IPCC 2002 & 2006).

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \tag{2}$$

Donde: L₀ es el potencial de generación, MCF es el factor de corrección para el metano, DOC es el carbono orgánico degradable (fracción), DOC_F es la fracción de carbono orgánico degradable asimilado, F es la fracción de CH₄ en el biogás y $\frac{16}{12}$ es la constante estequiométrica. Las ecuaciones para determinar cada parámetro se describen a continuación.

MCF. Este es un ajuste de la estimación de la

generación de biogás en el Modelo que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. Su valor depende de la profundidad y el tipo de RESA, como lo definen las prácticas de manejo. La Tabla 3 resume los valores de MCF aplicados por el modelo (IIE 2007, IPCC 2006, Kumar et al. 2004a, SCS Engineers 2009).

Tabla 3. Factor de corrección de metano (MCF)

Manejo del Sitio	Profundidad < 5 m	Profundidad ≥ 5 m
Sin Manejo	0.4	0.8
Con Manejo	0.8	1.0
Semi-aeróbico	0.4	0.5
Condición Desconocida	0.4	0.8

Fuente: IIE (2007), IPCC (2006), Kumar et al. (2004a), SCS Engineers (2009)

DOC. Su valor depende de la composición de los residuos, por lo que puede variar de ciudad en ciudad

(IIE 2007, Kumar et al. 2004a), y se estima usando la ecuación 3.

$$DOC = 0.40(A) + 0.17(B) + 0.15(C) + 0.30(D) \quad (3)$$

Donde: A es el porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles; B es el porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos); C es el porcentaje de los residuos que corresponde a los restos de alimentos; y D es el porcentaje de los residuos que corresponde a madera y paja.

DOC_F . Esta es una porción de DOC que es convertida

$$DOC_F = 0.014T + 0.28 \quad (4)$$

Donde: T es la temperatura en °C.

F . Su valor se asume en un 0.5, debido a que el biogás se compone principalmente en un 50% de CH_4 y un 50% de CO_2 con menos del 1% de otras constituyentes trazas (IPCC 2002 & 2006, Kumar *et al.* 2004a).

OTROS MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

Existen otros modelos que son usados para predecir la generación de biogás, tales como: el Método de la Tier 3, Método IPCC, Modelo LandGEM o EMCON, Método de cámara de flujo cerrado, Modelo de la EPA, Combinación IPCC y USEPA, USEPA E-PLUS, Modelo de primer orden (TNO), Modelo multifase, GasSim, EPER modelo Frances y modelo alemán (Chiemchaisri y Visvanathan 2008, EPA 1996, Garg *et al.* 2006, LFG Consult 2007, Machado *et al.* 2009, Ngnikam *et al.* 2002, Scharff y Jacobs 2006, Walter 2003). Una breve descripción de algunos de ellos se expone a continuación.

Método Tier 3

Este método consiste en la medición de la presión

$$q_{LFG} = \frac{Q_e}{\pi r_e^2} \quad (5)$$

Donde: q_{LFG} es la tasa de generación de biogás, Q_e es la tasa de extracción del pozo y r_e es la distancia radial.

Método IPCC

En este método la estimación depende de las categorías de residuos, la fracción de carbón orgánico degradable y el gas CH_4 en el relleno (ver ecuación 6). En la estimación del potencial de emisión de CH_4 , los valores establecidos para la fracción orgánica degradable y la fracción orgánica disponible para degradación se asume como 0.12 y 0.77, respectivamente. El contenido de CH_4 en LFG es

en biogás y su estimación (ver ecuación 4) es basada en el modelo teórico que varía solo con la temperatura en la zona anaerobia del RESA (IPCC 2002, Kumar *et al.* 2004a). El valor predeterminado utilizado por la IPCC es de 0.77. No obstante, este factor puede variar de 0.42 para 10°C a 0.98 para 50°C. De hecho, en muchos rellenos profundos (>20 m) las temperaturas que se han registrado son mayores a 50 °C, condiciones claramente anaerobias (IPCC 2002).

interna en la basura bajo condiciones estáticas (no extracción de gas) para estimar la presión estática promedio. El gas es extraído a diversas tasas de inyección de aire hasta que se detecta en los pozos de extracción o en las sondas superficiales. La inyección de aire se define como mayor que 20% N_2 en la extracción de gas o sondas superficiales, o medir la presión manométrica negativa en alguna de las sondas, es decir, la presión en la basura durante la extracción menos la presión atmosférica. Una vez establecidas las tasas de extracción en las cuáles la inyección del aire no debe ocurrir, el radio de influencia ó ROI (definido como la distancia en las cuales la diferencia entre la presión absoluta del tiempo promedio durante la extracción y la presión estática del tiempo promedio es cero dentro del error de medición) es determinado a partir de la presión medida en las sondas de presión (Walter 2003).

La tasa de generación del gas del relleno (LFG) dentro del ROI es asumida como igual a la tasa de extracción de gas. La tasa de generación del LFG (q_{LFG}) por área de unidad de un relleno es determinado por la ecuación 5 (*ibidem*).

asumido como 0.55. La fracción de CH_4 que se oxida a las emisiones de CO_2 no se tiene en cuenta, por lo que el factor de oxidación (OX) se supone que es cero. Los residuos sólidos disponibles para degradación anaeróbica y generación de CH_4 se asumen como la mitad (50%) del valor usado para los rellenos. Esto sucede porque las condiciones en el relleno son más anaeróbicas comparadas con los vertederos a cielo abierto, debido a la presencia de una cobertura superior que provee de condiciones favorables para la producción de CH_4 (Chiemchaisri y Visvanathan 2008, Machado *et al.* 2009, Ngnikam *et al.* 2002).

$$CH_4 \cdot \text{emisiones (Gg/año)} = \left(\frac{MSW_T \times MSW_F \times MCF \times DOC}{\times DOC_F \times F \times 16/12 - R} \right) \times (1 - OX) \quad (6)$$

Donde: MSW_T es el total de residuos sólidos generados (Gg/año); MSW_F es la fracción de residuo sólido dispuesto; MCF es el factor de corrección de metano; DOC es el carbono orgánico degradable; DOC_F es la fracción de DOC ; F es la fracción de CH_4 ; R es el CH_4 recuperado (Gg/año); y el OX es el factor de oxidación. La estimación de los parámetros MCF , DOC , DOC_F , y F puede observarse en el apartado del Modelo Mexicano de Biogás.

Modelo LandGEM o EMCOM

Este modelo está basado en una reacción de degradación de primer orden como se muestra en la ecuación 7. El potencial de las emisiones de CH_4 es

$$Q = L_0R(e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (7)$$

Donde: Q es el volumen de gas CH_4 producido en el año actual ($m^3/año$); L_0 es el potencial de producción de CH_4 de los residuos sólidos (m^3/Mg); R es la tasa de residuos sólidos recibida durante la operación del sitio ($t/año$); k es la tasa constante de degradación de primer orden (por año); c es el periodo de clausura del sitio de disposición de residuos en el presente año; y t es el tiempo que lleva abierto del sitio de disposición final de residuos en el presente año.

Método de cámara de flujo cerrado

$$J = (V/A)dC/dt \quad (8)$$

Donde: J es el flujo de CH_4 de los residuos del sitio de disposición final ($mol/m^2 \cdot hr$); V es el volumen de la cámara (m^3); A es el área cubierta por la cámara (m^2); y dC/dt es la tasa de incremento (gradiente de concentración) del gas CH_4 ($mol/m^3 \cdot hr$).

El gradiente de concentración se obtiene de la medición de las concentraciones dentro de la cámara en diferentes intervalos de tiempo. La regresión lineal se utiliza para determinar el gradiente. Con la finalidad de obtener una mejor correlación entre los puntos de muestreo, 100 mediciones en un RESA típico son obligatorios (Eun 2004).

Modelo de la EPA “Modelo de Degradación de Primer Orden”

Este método es el más utilizado por ser el recomendado por la EPA para calcular las emisiones

calculado con base en la cantidad de residuos dispuestos cada año y las emisiones anuales de CH_4 sobre la cantidad de residuos orgánicos remanentes en un año particular. De la tasa de residuos recibidos en un relleno, las emisiones de CH_4 pueden ser estimadas por la suposición de L_0 es de $170 m^3/Mg$ y k es de $0.05/año$. Estas cantidades son las típicamente recomendadas para países en desarrollo que poseen una gran cantidad de residuos biodegradables. Para vertederos a cielo abierto, el potencial de emisión de CH_4 puede asumirse como el 50% que los rellenos o $85 m^3/Mg$ (Chiemchaisri y Visvanathan 2008, Ngnikam et al. 2002).

Este método emplea una cámara hecha de acero inoxidable que tiene un área de superficie de $0.2 m^2$ con una altura efectiva de $0.25 m$. La cámara es insertada a una profundidad de $0.1 m$ y está equipada con puertos de muestreo y un termómetro. El flujo es estimado basado en los cambios de concentración de CH_4 con el tiempo en la cámara, medido $60 min$ después de que se colocó en la superficie del suelo. La ecuación 8 es usada para calcular el flujo de CH_4 (Chiemchaisri y Visvanathan 2008).

de CH_4 del relleno (Garg et al. 2006, SCS Engineers 2009). Se basa en dos parámetros fundamentales: L_0 y k (Garg et al. 2006, Machado et al. 2009).

De acuerdo a lo indicado por la EPA (1996), el modelo de degradación de primer orden que proponen puede ser usado para contabilizar el cambio en la tasa de generación de biogás de acuerdo a la vida útil del proyecto de relleno. Este modelo requiere de mayor conocimiento de las características del relleno, al menos en las siguientes 5 variables: promedio anual de recepción de basura, el número de años que el relleno lleva abierto, el número de años que el relleno lleva cerrado sin recibir basura (si corresponde), el potencial de generación de CH_4 de la basura, y la tasa de generación anual de CH_4 de la basura. El modelo básico de degradación de primer orden se presenta en la ecuación 9.

$$LFG = 2L_0R(e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (9)$$

Donde: LFG es el biogás total generado en el año

corriente (m^3); L_0 es el potencial total de generación

de CH₄ de la basura (m³/ kg); k es la tasa anual de generación de CH₄; R es la tasa promedio de recepción de basura anual durante la vida activa (kg); t son los años desde que se abrió el relleno; y c son los años desde que se cerró el relleno.

L_0 representa la cantidad total de CH₄ por peso que la basura generaría durante su proceso de descomposición en un RESA, es decir, está en función de la composición de los residuos. k representa la tasa a la cual el metano es liberado de cada kg de basura, es decir, está en función de muchos parámetros específicos del sitio, tales como: el contenido de humedad, temperatura, composición de residuos, potencial de reducción de oxidación, alcalinidad y pH, densidad de la basura y el tamaño de las partículas (EPA 1996, Garg *et al.* 2006, SCS Engineers 2009).

Los valores de L_0 y k dependen en particular de las condiciones locales del clima y la composición de los residuos, por lo tanto, los propietarios/operadores del relleno pueden consultar otros en el área local con similitudes en los rellenos que se hayan instalado un sistema de recolección de gas para reducir la gama de valores posibles. Si se conocen los términos con certeza, el modelo de degradación de primer orden puede predecir con relativa exactitud la generación de CH₄. Sin embargo, los valores de L_0 y k varían ampliamente, y dificultan la exactitud de la estimación de un relleno en particular (EPA 1996).

CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron los diferentes modelos que son empleados para estimar o predecir la velocidad de generación de biogás. Como se apreció, existen modelos de orden cero, de primer orden y multifases como el GasSim o el EPER modelo Frances. Se puede apreciar gran similitud en algunos métodos; sin embargo, conforme se va adquiriendo

experiencia en la aplicación de dichos métodos y se va dando seguimiento a las proyecciones realizadas, los modelos van cambiando por la complejidad de los elementos necesarios para la generación de biogás. Ejemplo de esto es el modelo mexicano que nació en el 2003 y se realizó un ajuste a su fórmula en el 2009, tomando en cuenta nuevos parámetros para su proyección.

El conocimiento de los diferentes métodos para estimar el potencial energético del biogás en el RESA, permite a los interesados en el tema tener una idea más precisa de los alcances y limitaciones de cada uno de ellos y orientar sus esfuerzos y recursos en aquel que consideren más pertinente. La literatura muestra una gran variedad de modelos que se van ajustando a los requerimientos de cada región, debido a que tanto la composición de residuos como el manejo mismo del RESA es diferente para cada sitio. Tomando en cuenta que los modelos pueden subestimar y sobreestimar la generación de biogás proyectada, se debe de poner especial atención al modelo a elegir para realizar las proyecciones y utilizar en medida de lo posible la mayor cantidad de datos *in situ* para tener mayor precisión en la predicción.

Para estimar la generación de biogás, algunos de los modelos requieren que se realicen pruebas de extracción de biogás y en otros se requiere de conocer la composición de los residuos y los parámetros de funcionamiento del RESA o sitio de disposición final. El Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 brinda la posibilidad de estimarla con conocer algunos de los parámetros de funcionamiento del relleno, sin necesidad de pruebas de extracción de biogás, ni conocimiento de la composición de los residuos. Sin embargo, es necesario aclarar que la predicción de la generación con información *in situ* disminuye la incertidumbre a la toma de decisiones.

REFERENCIAS

Aguilar Q., Taboada P.A., Ojeda S. (2010). *Determinación de parámetros k y L_0 para la estimación de biogás en relleno sanitario*. En 3° Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, 2° Seminario da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos. Os resíduos sólidos no contexto das mudanças climáticas, Cláudia Coutinho Nóbrega (eds.), 1-8, Editora universitária / UFPB, João Pessoa, Paraíba, Brasil.

Aguilar-Virgen Q., Armijo-de Vega C., Taboada-González P. (2009). *El potencial energético de los residuos sólidos municipales*. Ingeniería-Revista Académica FIUADY, 13(1), 59-62.

Batool S.A., Chuadhry M.N. (2008). *The impact of municipal solid waste treatment methods on greenhouse gas emissions in Lahore, Pakistan*. Waste Management, 29(1), 63-69.

Chiemchaisri C., Visvanathan C. (2008). *Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand*. Journal of the Air & Waste Management Association, 58(5), 629-35.

- EPA. (1996). *Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook*. Environmental Protection Agency, United States of America. <http://www.epa.gov/landfill/res/pdf/handbook.pdf> (Acceso Abril 16, 2008).
- ETEISA. (2006). *Estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del biogas generado en el relleno sanitario "Don Juanito", Municipio de Villavicencio, Colombia*. <http://www.bioagricoladellano.com.co/website/documentos/?C=M;O=A> (Acceso Abril 2, 2010).
- Eun S. (2004). *Hydrogen sulfide flux measurements and dispersion modeling from construction and demolition (C&D) debris landfills*. Thesis of the Degree of Master of Science, University of Central Florida, Orlando Florida.
- Garg A., Achari G., Joshi R.C. (2006). *A model to estimate the methane generation rate constant in sanitary landfills using fuzzy synthetic evaluation*. Waste Management Research, ISWA, 24(4), 363-375.
- IIE. (2007). *Estimación de los factores de emisión*. Instituto Nacional de Ecología. www.ine.gov.mx/publicaciones/libros/457/estimacion3.pdf (Acceso Abril 2, 2010).
- IPCC. (2002). *CH₄ Emissions from Solid Waste Disposal*. En Background Papers - IPCC Expert Meetings on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan. 419-439. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpg-bgp.html> (Acceso Junio 1, 2010).
- IPCC. (2006). *Waste*. En 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> (Acceso Mayo 31, 2010).
- Kong I.C. (2008). *Microbial characteristics associated with six different organic wastes undergoing anaerobic decomposition in batch vial conditions*. Waste Management Research, ISWA, 26(3), 261-266.
- Kumar S., Gaikwad S.A., Shekdar A.V., Kshirsagar P.S., Singh R.N. (2004a). *Estimation method for national methane emission from solid waste landfills*. Atmospheric Environment, 38(21), 3481-3487.
- Kumar S., Mondal A., Gaikwad S., Devotta S., Singh R. (2004b). *Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study*. Atmospheric Environment, 38(29), 4921-4929.
- LFG Consult. (2007). *Case studies of CDM - Landfill Gas Projects Monterrey, Mexico (Benlesa)*. <http://siteresources.worldbank.org/INTLACREGTOPURBDEV/Resources/840343-1178120035287/ModelMonterrey.pdf> (Acceso Junio 16, 2008).
- Machado S.L., Carvalho M.F., Gourc J., Vilar O.M., Nascimento J.C.D. (2009). *Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results*. Waste Management, 29(1), 153-161.
- Marshall A. (2007). *Growing bigger*. Waste Management World 8(2). http://www.waste-management-world.com/display_article/289598/123/CRTIS/none/none/Growing-bigger/ (Acceso Abril 15, 2008).
- Meraz L., Aranda C., Domínguez A. (2008). *Producción de metano en relleno sanitario: Un Modelo Cinético Fractal*. En XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales: La sustentabilidad en las grandes ciudades. 159-165, AIDIS-FEMISCA, México.
- Ngnikam E., Tanawa E., Rousseaux P., Riedacker A., Gourdon R. (2002). *Evaluation of the potentialities to reduce greenhouse gases (GHG) emissions resulting from various treatments of municipal solid wastes (MSW) in moist tropical climates: Application to Yaounde*. Waste Management Research, ISWA, 20(6), 501-513.
- Scharff H., Jacobs J. (2006). *Applying guidance for methane emission estimation for landfills*. Waste Management, 26(4), 417-429.

SCS Engineers. (2009). *Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0*. http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf (Acceso Diciembre 7, 2009).

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. 1era ed., McGraw-Hill, Madrid, España.

Walter G.R. (2003). *Fatal flaws in measuring landfill gas generation rates by empirical well testing*. Journal of the Air & Waste Management Association, 53(4), 461-468.

World Bank Group. (2004). Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_008.htm (Acceso Abril 2, 2010).

APÉNDICE A.

Tabla A.1. Modelos para la predicción de generación de biogás

Metodología	Tasa de generación LFG	Autor
Tier 3	$q_{LFG} = \frac{Q_e}{\pi r_e^2}$	Walter 2003
IPCC	$CH_4 \cdot \text{emisiones (Gg/año)}$ $= \left(\begin{matrix} MSW_T \times MSW_F \times MCF \times DOC \\ \times DOC_F \times F \times 16/12 - R \\ \times (1 - OX) \end{matrix} \right)$	Chiemchaisri y Visvanathan 2008; Ngnikam et al. 2002; Machado et al. 2009
LandGEM o EMCOM	$Q = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$	Chiemchaisri y Visvanathan 2008; Ngnikam et al. 2002
Método de cámara de flujo cerrado	$J = (V/A)dc/dt$	Chiemchaisri y Visvanathan 2008
EPA	$LFG = 2L_0R(e^{-kc} - e^{-kt})$	EPA-LMOP 1996
Combinación IPCC y USEPA	$q = L_0 \cdot k \cdot e^{-k \cdot t}$	Machado et al. 2009
USEPA EPLUS	$Q_{T,X} = kR_X L_0 e^{-k(T-X)}$	LFG Consult (2007)
Modelo Mexicano de Biogás	$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{Mi}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F)$	SCS Engineers 2009
Modelo de primer orden (TNO)	$\alpha_t = \zeta 1.87AC_0 k_1 e^{-k_1 t}$	Scharff y Jacobs 2006
Modelo multifase	$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 cAC_0, k_1, e^{-k_1 i t}$	Scharff y Jacobs 2006
LandGem US EPA	$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n kL_0 M_i (e^{-kt})$	Scharff y Jacobs 2006
GasSim	Este equipado con dos enfoques para calcular la estimación de las emisiones de CH ₄ . El primer enfoque usa la ecuación multifase de GasSim el cual está basado en el modelo multifase descrito por Scheepers and Van Zanten (1994). El segundo enfoque utiliza el modelo LandGEM.	Scharff y Jacobs 2006
EPER modelo Frances	$FE_{CH_4} = \sum_X FE_0 * \left(\sum_{1,2,3} A_i * p_i * k_i * e^{-k_i t} \right)$	Scharff y Jacobs 2006
EPER modelo Alemán	$Me = M * BDC * BDC_f * F * D * C$	Scharff y Jacobs 2006

Este documento debe citarse como:

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., Ojeda-Benítez, S. (2011). **Modelo Mexicano para la estimación de la generación biogás**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 15-1, pp 37-45, ISSN: 1665-529-X.