

En español

Potencial de producción eléctrica del biogás generado en un relleno sanitario

Quetzalli Aguilar-Virgen¹, Paul Taboada-González², Sara Ojeda-Benítez³

RESUMEN

El papel de la energía en la vida de las sociedades modernas ocupa un lugar central en casi todos los sectores económicos, sociales y culturales. La energía se considera como un ingrediente irremplazable para las sociedades económicas y el progreso industrial. El objetivo de esta investigación fue estimar la generación de biogás del relleno sanitario de Ensenada (estado mexicano de Baja California) con la finalidad de conocer la cantidad de energía que se podría generar con los residuos sólidos depositados en él. La estimación de biogás se llevó a cabo en dos etapas: 1) se realizó un estudio de caracterización de residuos; 2) se siguieron los lineamientos propuestos por SCS Engineers (2009) del Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0. Los resultados muestran una gran cantidad de materia orgánica (aproximadamente el 70%), lo cual es un aspecto clave en el proceso anaeróbico de los residuos. En cuanto a la generación de energía, se tiene que se llegará a una capacidad máxima de 1,90 MW en el 2019. Dicha energía podría aumentar la capacidad de generación eléctrica existente en Ensenada aproximadamente en un 3,46% y abastecer el 60% de la energía necesaria para alumbrado público, con un ahorro de 1.423 millones de dólares.

Palabras clave: generación de energía, residuos sólidos municipales, biogás, energía renovable.

Recibido: octubre 8 de 2010

Aceptado: octubre 26 de 2011

Introducción

El papel de la energía en las sociedades modernas ocupa un lugar central en casi todos los sectores económicos, sociales y culturales, al punto que se la considera un ingrediente irremplazable para las sociedades económicas y el progreso industrial (Alazraque-Cherni, 2008).

La generación de energía en México se ha hecho en su mayoría con los combustibles fósiles. Sin embargo, esto ha traído consecuencias negativas al ambiente por la liberación de gases de

In English

Potential production of electricity from biogas generated in a sanitary landfill

Quetzalli Aguilar-Virgen⁴, Paul Taboada-González⁵, Sara Ojeda-Benítez⁶

ABSTRACT

Energy forms the cornerstone of almost every economic, social and cultural sector in modern societies. Energy is regarded as an irreplaceable ingredient in such societies' industrial development. The aim of this research was to estimate the generation of biogas in the city of Ensenada's sanitary landfill to ascertain the amount of energy which could be generated from the solid waste being disposed of. Biogas estimates were conducted in two stages: a waste characterisation study followed by implementing the regulations proposed by SCS Engineers (SCS Engineers, 2009) regarding the Mexican biogas model (version 2.0). The results showed that a large quantity of organic matter (around 70%) is a key element in anaerobic degradation of waste. As to energy generation, it is believed that a full 1.90 MW capacity will be reached in 2019. Such energy could increase Ensenada's current electricity generation capacity by 3.46% and provide 60% of the energy needed for street lighting, thereby leading to USD \$1.423 million in savings.

Keywords: energy generation, municipal solid waste, biogas, renewable energy

Received: October 8th 2010

Accepted: October 26th 2011

Introduction

The role of energy in modern societies is central in almost all economic sectors and social and cultural activities as well. Energy is considered an irreplaceable ingredient for economic societies and industrial progress (Alazraque-Cherni, 2008).

Energy has mostly been generated in Mexico by fossil fuels. However, this has brought negative consequences for the environment by releasing greenhouse gases (GHGs), so that the use

¹ Ingeniero Industrial, M.Sc. Ingeniería Industrial, Ph.D. en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Profesor-Investigador, Instituto Tecnológico de Culiacán, México. qaguilar@itculiacan.edu.mx

² Ingeniero Eléctrico, M.Sc. Ingeniería Industrial, Ph.D. en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Profesor-Investigador, Instituto Tecnológico de Culiacán, México. ptaboada@itculiacan.edu.mx

³ Lic. en Ciencias de la Educación, M.Sc. Ingeniería, Ph.D. en Ciencias. Grupo de Investigación en Residuos Sólidos, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde 1998, Coordinadora del Área de Medio Ambiente en el Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. México. sara.ojedabenitez@uabc.edu.mx

⁴ Industrial Engineer, M.Sc. Industrial Engineering, Ph.D. Science, Universidad Autónoma de Baja California. Research Professor, Instituto Tecnológico de Culiacan, Mexico. qaguilar@itculiacan.edu.mx

⁵ Electrical Engineering, M.Sc. Industrial Engineering, Ph.D. Science, Universidad Autónoma de Baja California. Research Professor, Instituto Tecnológico de Culiacan, Mexico. ptaboada@itculiacan.edu.mx

⁶ B.Sc., in Science of education, M.Sc. Engineering, Ph.D. in Science. Research Group on Solid Waste, belongs to the National System of Researchers since 1998, Coordinator of the Environment Department at the Institute of Engineering, Universidad Autónoma de Baja California. Mexico. sara.ojedabenitez@uabc.edu.mx

En español

efecto invernadero (GEI), por lo que el uso de energías alternativas es una solución adecuada en la actualidad. Una de estas energías podría ser el biogás generado por los residuos sólidos urbanos (RSU) depositados en un relleno sanitario (RESA).

Está ampliamente reconocido que el biogás es una fuente potencialmente significativa de energía. Las primeras investigaciones en este campo comenzaron en Estados Unidos al iniciarse la década de los setenta y a partir de los ochenta muchos países iniciaron programas que alentaban la utilización del gas proveniente de los rellenos sanitarios (Lawson, 1989).

Aspectos fundamentales del biogás en un relleno sanitario

Un RESA se conceptualiza generalmente como un reactor bioquímico. En este, los residuos y el agua son los principales insumos, mientras que el gas y los lixiviados son los principales productos (Machado *et al.*, 2009). El gas de un RESA es el resultado biológico de la descomposición anaeróbica de materiales orgánicos de un relleno (Machado *et al.*, 2009; Marshall, 2007). Si él no es capturado, ni se aprovecha, puede ser una fuente potente de GEI y uno de los principales responsables del cambio climático (Marshall, 2007; EPA, 1996).

Los principales componentes del gas de los rellenos son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), pero el gas del relleno comúnmente está saturado en vapor de agua y presenta cantidades pequeñas de componentes orgánicos no metanos y varios otros compuestos traza (Machado *et al.*, 2009; Marshall, 2007).

El metano puede ser aprovechado en la generación de electricidad o como combustible para el transporte. Entre las ventajas de usarlo se incluyen la mitigación de emisiones de GEI y la reducción de riesgo de fuego y explosión dentro de los rellenos (Marshall, 2007; Garg *et al.*, 2006; Christophersen *et al.*, 2001; EPA, 1996).

A nivel mundial los rellenos representan la tercera fuente más grande de emisiones antropogénicas de metano, lo que constituye aproximadamente el 13% o más de las emisiones de metano (Zhang *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2004).

El metano tiene una equivalencia de 21 veces la del CO₂, en cuanto a su contribución al efecto invernadero, debido a su mayor coeficiente de absorción molar de la radiación infrarroja y al prolongado tiempo de residencia en la atmósfera (Batool y Chuadhry, 2008; Christophersen *et al.*, 2001). Esto tiene importancia porque la implementación de cualquier política para reducir el metano podría tener impactos inmediatos en las emisiones de GEI y los beneficios aparecerían de corto a mediano plazo (Batool y Chuadhry, 2008).

El gas de un RESA es generado por la degradación de la fracción biodegradable de los residuos depositados, influenciada por la composición fisicoquímica de los residuos y por las variables ambientales. Diversos factores interfieren en la generación de metano de un RESA, pero los más importantes son la cantidad total de material orgánico depositado, edad, contenido de humedad, técnicas de compactación usadas, temperatura, tipo de residuo, tamaño de las partículas y nutrientes, entre otros (Kong, 2008; Kumar *et al.*, 2004). Las condiciones óptimas para la producción de metano son: contenido de humedad de 50 a 60%, temperatura de 40 °C, tamaño pequeño de las partículas y un pH neutral (Kong, 2008).

In English

of alternative energy is an appropriate solution today. One of these energies could be the biogas generated by municipal solid waste (MSW) deposited in sanitary landfills.

It is widely recognised that biogas from landfills is a significant potential source of energy. Early research in this area began in the USA at the beginning of the 1970s; many countries have initiated programmes for encouraging the use of gas from landfills since the 1980s (Lawson, 1989).

Fundamental aspects concerning landfill biogas

A sanitary landfill is usually conceptualised as being a biochemical reactor; waste and water are thus the main inputs, while gas and leachate are the main products (Machado *et al.*, 2009). Landfill gas is the biological result of the anaerobic decomposition of organic materials (Machado *et al.*, 2009; Marshall, 2007); if it is not captured and harnessed, it can become a potent source of GHGs and a major contributor to climate change (Marshall, 2007; EPA, 1996).

The main constituents present in landfill biogas are methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), but landfill gas is commonly saturated by water vapour and presents small quantities of non-methane organic components and various other trace compounds (Machado *et al.*, 2009; Marshall, 2007).

Methane can be exploited for generating electricity or used as fuel in transportation. Some of the advantages of biogas use include the mitigation of GHG emissions and fire risk reduction and explosion in landfills (Marshall, 2007; Garg *et al.*, 2006; Christophersen *et al.*, 2001; EPA, 1996).

Landfills represent the third largest source of anthropogenic methane emissions worldwide, constituting around 13% or more of global methane emissions (Zhang *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2004).

Methane contributes 21 times that of CO₂ to the greenhouse effect, due to its stronger molar absorption coefficient regarding infrared radiation and longer residence time in the atmosphere (Batool and Chuadhry, 2008; Christophersen *et al.*, 2001). This is important because implementing any policy aimed at reducing methane would have an immediate impact on GHG emission and the benefits of the initiatives could appear in the short- to medium-term (Batool and Chuadhry, 2008).

Landfill gas is generated by degrading the biodegradable fraction and is influenced by physical-chemical composition of waste and environmental variables. Many factors interfere with the generation of methane from sanitary landfills, but the most important ones include the total amount of organic matter disposed of, its age and moisture content, compaction techniques used, temperature and type of waste, particle size and nutrients (Kong, 2008; Kumar *et al.*, 2004). Optimum methane production conditions are 50% to 60% moisture content, 40°C temperature, small particle size and a neutral pH (Kong, 2008).

Por lo anterior, es importante contar con información sobre generación y composición de residuos para ayudar en la selección y operación del equipo de manejo y tratamiento de residuos, así como las instalaciones para recuperación de energía y recursos, entre otros (Chang y Davila, 2008; Zeng *et al.*, 2005).

Modelación de la producción de metano

Para predecir la velocidad de producción de metano en los rellenos sanitarios se han desarrollado diversos modelos, entre los que se encuentran los empíricos, estequiométricos y bioquímicos (Aronica *et al.*, 2009; Chiemchaisri y Visvanathan, 2008; Meraz *et al.*, 2008; Garg *et al.*, 2006).

Los modelos empíricos son particularmente dependientes de las condiciones locales. En el lado opuesto se encuentran los modelos fundamentales que describen la fermentación mediante una secuencia de reacciones microbianas, comenzando por una etapa de degradación aerobia y prosiguiendo con las diversas etapas de la degradación anaerobia (hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis). Si bien esta última clase de modelos heredan su certidumbre de la ciencia básica, también sufren de una falta de datos confiables relacionados con la actividad microbiana y tienden a ser complejos, lo que frecuentemente demanda grandes requerimientos computacionales. Como a la fecha no existe una manera rigurosa y funcional de modelar la producción de metano en los RESA, las ecuaciones empíricas son la práctica más común (Meraz *et al.*, 2008).

La literatura especializada muestra diversos modelos usados para predecir la producción de metano, tales como:

Método de la Tier 3, el cual implica extraer gas de uno o más pozos de extracción de celdas completas y medir la respuesta de la presión resultante en una serie de sondas de monitoreo, completada a distintas profundidades y distancias desde los pozos de extracción (Walter, 2003).

Método IPCC, donde la estimación depende de las categorías de residuos, la fracción de carbón orgánico degradable y el gas CH₄ en el relleno (Machado *et al.*, 2009; Chiemchaisri y Visvanathan, 2008).

Método de cámara de flujo cerrado: el flujo se estima con base en los cambios de concentración de CH₄ con el tiempo en la cámara y se mide por la cámara 60 minutos después de que se haya colocado en la superficie del suelo (Chiemchaisri y Visvanathan, 2008).

Modelo de la EPA, que utiliza una ecuación de degradación de primer orden y se basa en dos parámetros fundamentales: L_0 , el potencial de generación de metano (m³CH₄/Mg de RSU) y k , la tasa constante de generación de metano (año⁻¹) (Machado *et al.*, 2009; Garg *et al.*, 2006).

Modelo Mexicano de Biogás, método que utiliza una ecuación de degradación de primer orden donde se asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un período de tiempo antes de la generación de metano. En este modelo se 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 k y L_0 (SCS Engineers, 2009).

From the above, it is important to have information regarding the generation and composition of waste to assist in selecting and operating equipment for the treatment and handling of waste, as well as energy recovery facilities and resources (Chang and Davila, 2008; Zeng *et al.*, 2005).

Modelling methane production

Some empirical, stoichiometric and biochemical models have been developed for predicting the rate of methane production in sanitary landfills (Aronica *et al.*, 2009; Chiemchaisri and Visvanathan, 2008; Meraz *et al.*, 2008; Garg *et al.*, 2006).

Empirical models are particularly dependent on local conditions. Some basic models describe fermentation using microbial reaction sequences, beginning with a period of aerobic degradation and continuing through the various stages of anaerobic degradation, such as hydrolysis, acetogenesis and methanogenesis. While this class of model inherits its certainty regarding basic science, it also suffers from a lack of reliable data related to microbial activity and tends to be complex, often demanding large computational requirements. Since no rigorous and functional model of methane production in sanitary landfills has been advanced to date, empirical equations represent the most common practice (Meraz *et al.*, 2008).

The specialised literature describes several models which are used to predict methane production.

The *Tier 3 method* involves gas extraction from one or more extraction wells in all cells and measure the response regarding the resulting pressure in a number of monitoring probes, at different depths and distances from the extraction well (Walter, 2003).

The estimate in the *IPCC method* depends on the categories of waste, the degradable organic carbon fraction and CH₄ gas in a landfill (Machado *et al.*, 2009; Chiemchaisri and Visvanathan, 2008).

Flow is estimated in the *closed-chamber flow method* on CH₄ concentration changes related to time spent in the chamber and measured by a camera 60 min after it was placed on the soil surface (Chiemchaisri and Visvanathan, 2008);

The *EPA model* uses a first order degradation equation and is based on two fundamental parameters: L_0 , being methane generation potential (m³CH₄/Mg of MSW) and k , the constant rate of methane generation (year⁻¹) (Machado *et al.*, 2009; Garg *et al.*, 2006).

The *Mexican biogas model method* uses a first order decay equation which assumes that maximum biogas generation is reached after a period of time before methane generation. This model requires that a user enter specific data, such as the opening year, the year of closure, annual disposal rates, average annual precipitation and collection system efficiency. The model automatically provides values for k and L_0 (SCS Engineers, 2009).

Los dos últimos modelos consideran que el potencial de generación de metano (L_0) está en función de la composición de los residuos y la tasa constante de generación (k) depende de muchos parámetros específicos del sitio, tales como 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 (SCS Engineers, 2009; Garg *et al.*, 2006).

El objetivo de esta investigación fue el de estimar la generación del biogás en el RESA de Ensenada con la finalidad de conocer la cantidad de energía que se podría generar a partir de la descomposición de los residuos sólidos depositados en ese sitio de disposición final.

Metodología

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Ensenada, Baja California, al noroeste de México. Esta ciudad se encuentra ubicada a los 31° 52' de latitud norte y los 116° 36' de longitud oeste. La precipitación promedio anual histórica es de 250 mm, con un clima mediterráneo, temperatura templada la mayor parte del tiempo y lluvias principalmente en invierno. Su población en el 2005 era de 260.075 habitantes, según el Censo de Población y Vivienda.

La estimación de biogás generado se llevó a cabo en dos etapas: 1) se realizó un estudio de caracterización de residuos; 2) se siguieron los lineamientos propuestos por SCS Engineers (2009) del Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0.

Estudio de caracterización

El estudio de caracterización se hizo en dos temporadas representativas del clima de la ciudad de Ensenada, durante cinco días consecutivos (lunes a viernes) en febrero y junio del 2009. Los residuos analizados fueron los depositados en el RESA por los camiones recolectores municipales. Debido a que la frecuencia de recolección por parte del ayuntamiento de Ensenada es de una vez por semana, se considera que los residuos recolectados en las colonias corresponden a la generación de una semana. Se tomaron muestras de aproximadamente 260 kg por día, cantidad mayor a la propuesta en la norma mexicana NMX-AA-015-1985, pero acorde con otras investigaciones (Zeng *et al.*, 2005; Chung y Poon, 2001).

Los residuos de la muestra se clasificaron, pesaron y registraron. Para el registro de la cuantificación de los subproductos se utilizó una ficha de registro basada en la norma mexicana NMX-AA-022-1985. Los subproductos se agruparon en catorce categorías de acuerdo con lo propuesto por SCS Engineers (2009): comida, papel y cartón, poda (jardines), madera, caucho, piel, huesos y paja, textiles, papel higiénico, otros orgánicos, pañales, metales, construcción y demolición, vidrio y cerámica, plásticos y otros inorgánicos.

A los fines de determinar la tasa de generación per cápita, se utilizaron los datos de los pesajes diarios de los camiones recolectores del ayuntamiento de Ensenada en las fechas de muestreo, el número de habitantes y el programa Minitab® 14.1. Se consideró un intervalo de confianza del 98% en el estadístico *t*-student.

The last two models consider that methane generation potential (L_0) is related to waste composition, generation rate constant (k) depending on many site-specific parameters, such as moisture content, temperature, waste composition, oxidation reduction potential, alkalinity and pH, density and trash particle size (SCS Engineers, 2009; Garg *et al.*, 2006).

This research was aimed at estimating biogas generation in the Ensenada sanitary landfill, to ascertain the amount of energy that could be generated from the decomposing solid waste being dumped at the disposal site.

Methodology

The study was carried out in the city of Ensenada in the state of Baja California, located in north-western Mexico; this city is located at latitude 31°52' N, longitude 116°36' W. Average annual rainfall is 250 mm; the city has a Mediterranean-like climate, having a mild temperature almost all year round and rainfall during the winter. Ensenada had 260,075 residents in 2005, according to 2005 data published by the Mexican Institute of Statistics, Geography and Data Processing (NISGDP).

Biogas estimates were made in two stages: a waste characterisation study and implementing the regulations proposed by SCS Engineers (SCS Engineers, 2009) regarding the Mexican biogas model (version 2.0).

Characterisation study

A characterisation study was carried out during two seasons representing Ensenada's climate over five days in a row (Monday to Friday) in February and June 2009. The residues analysed were dumped in the landfill by the municipality-run waste collection trucks. Since the waste is collected once a week in each route, it was considered that the samples were representative of generation during one week. Samples weighing around 260 kg per day were taken, this being more than the amount proposed in Mexican standard NMX-AA-015-1985, but in line with other studies (Zeng *et al.*, 2005; Chung and Poon, 2001).

The samples taken were classified, weighed and recorded. For the record, components were quantified based on the methodology proposed by Mexican standard NMX-AA-022-1985. The components were grouped into 14 categories proposed by SCS engineers (SCS Engineers, 2009). These were: food scraps, paper and cardboard, yard trimmings, wood, rubber, leather, bones and straw, textiles, toilet paper, other organic products, disposable diapers, metals, construction and demolition material, glass and ceramics, plastics and other non-organic materials.

Data regarding Ensenada collection trucks' daily weight recorded on the sampling dates, the number of inhabitants and MINITAB 14.1 software were used for determining the per capita generation rate (98% confidence interval, using Student's *t*-test).

Estimación de generación de biogás

Como paso inicial, se analizó la forma en que opera el sitio, para lo cual se hicieron observaciones durante junio, agosto y septiembre del 2009. Asimismo, se efectuaron entrevistas al gerente general y al gerente de operaciones del RESA. La información a obtener en las observaciones *in situ* y entrevistas, fueron las siguientes: 1) disposición anual de residuos sólidos urbanos (RSU) del año más reciente; 2) año de apertura y de clausura del RESA; 3) incremento anual estimado de la disposición; 4) profundidad promedio del RESA; 5) incendios en el RESA; 6) porcentajes de áreas con residuos, con cubierta diaria, intermedia y final; 7) porcentaje del área de residuos con recubierta inferior de arcilla/geomembrana; 8) compactación de residuos; 9) afloramientos de lixiviado en la superficie del RESA; 10) composición de residuos. Dicha información se utilizó en el modelo descrito a continuación.

Para estimar la generación de biogás del relleno de Ensenada se empleó el Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0, desarrollado por SCS Engineers (2009). El modelo estima el índice de generación de biogás cada año usando la ecuación de degradación de primer grado (ecuación 1), la cual fue modificada por Usepa en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005.

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

donde Q_{LFG} es el flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$), i es el incremento en tiempo de un 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 dispuesta en el año i (años decimales), MCF es el factor de corrección de metano y F es el factor de ajuste por incendios.

Resultados y discusión

En los siguientes apartados se muestran los resultados de la caracterización de los residuos sólidos domésticos (RSD) de la ciudad de Ensenada, así como las proyecciones de generación de biogás en el RESA. En el caso de la caracterización se tomaron diez muestras de aproximadamente 260 kg por día, con un peso total de 2.511,35 kg de toda la muestra analizada. En cuanto a la proyección, se utilizó una hoja de cálculo de Excel® publicada por SCS Engineers (2009) para calcular la recuperación de biogás, aplicando una ecuación de degradación de primer grado; de igual manera, proporciona la capacidad máxima de la planta de electricidad.

Composición de los RSD en Ensenada

Se pesaron en total 2.511,35 kg, de los cuales 1.379,66 kg se obtuvieron en el mes de febrero y 1.131,69 kg en junio (invierno y verano, respectivamente). En la tabla 1 se muestra la composición media de los RSD en las dos temporadas de Ensenada. En cuanto a la generación per cápita de los RSD, se estimó en $0,968 \pm 0,208$ kg/día-hab.

Biogas estimation

An initial step involved analysing how the site operated, so observations were made during June, August and September 2009. Interviews were held with the sanitary landfill's general manager and operations manager. The information obtained *in situ* by observations and interviews concerned the amount of waste annually disposed of in the landfill, the landfill's opening and closing years, estimated annual disposal growth, average landfill depth, landfill fires, percentage of waste area with daily cover (intermediate and final), the percentage of waste area having a clay/geomembrane, waste compaction, leached outcrops on the surface of the landfill and waste composition. This information was used in the model described below.

The Mexican biogas model (version 2.0) developed by SCS engineers (SCS Engineers, 2009) was used for estimating biogas generation in the Ensenada sanitary landfill. The model estimates the landfill biogas generation rate in a given year using the following first-order decay equation (see equation 1), modified from the US EPA's LandGEM (version 3.02, 2005):

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

where Q_{LFG} = maximum expected flow rate (m^3/yr), i = 1 year time increment, n = (year of the calculation) - (initial year of waste acceptance), j = 0.1 year time increment, k = methane generation rate (1/yr), L_0 potential methane generation capacity (m^3/Mg), M_i = mass of solid waste disposed in the i^{th} year (Mg), t_{ij} = age of the j^{th} section of waste mass M_i disposed in the i^{th} year (decimal years), MCF = methane correction factor, F = fire adjustment factor.

Results and Discussion

Regarding characterisation, 10 samples of around 260 kg per day were taken (2,511.35 kg in all). An Excel spreadsheet proposed by the SCS engineers (SCS Engineers, 2009) was used for calculating biogas recovery by applying a first order decay equation, similar to that providing maximum power plant capacity.

HSW composition in Ensenada

From the 2,511.35 kg weighed, 1,379.66 kg were obtained in February and 1,131.69 kg in June (winter and summer, respectively). Table 1 shows average HSW composition for the two seasons studied in Ensenada; 0.968 ± 0.208 kg per person per day was estimated regarding per capita HSW generation.

En español

In English

Tabla 1. Composición media de los RSD en Ensenada

Subproductos de los RSD	Kilogramos (Kg)	Porcentaje (%)
Comida	909,08	36,20
Papel y cartón	285,27	11,36
Poda (jardines)	80,35	3,20
Madera	8,71	0,35
Caucho, piel, huesos y paja	5,44	0,22
Textiles	156,60	6,24
Papel higiénico	269,33	10,72
Otros orgánicos	6,97	0,28
Pañales	146,34	5,83
Metales	64,39	2,56
Construcción y demolición	17,99	0,72
Vidrio y cerámica	118,89	4,73
Plásticos	309,87	12,34
Otros inorgánicos	132,12	5,26
Total	2.511,35	100

En la composición de los residuos se puede apreciar que el porcentaje de componentes orgánicos es del 68,57% y el de los componentes inorgánicos es de 30,30%. Investigaciones realizadas en otros lugares del país exponen distintos porcentajes de residuos orgánicos. Ojeda-Benitez *et al.* (2003) en Mexicali muestran los residuos orgánicos con un 64,78%. Por su parte, Gomez *et al.* (2008) reportaron que en Chihuahua los residuos orgánicos suman un 62,00%. Para Guadalajara, Bernache-Perez *et al.* (2001) señalan que del total de residuos el 63,50% corresponde a los orgánicos. En el caso de Morelia, Buenrostro (2001) refiere un 68,10% de residuos orgánicos. Dichas cantidades son ligeramente inferiores a las reportadas en la presente investigación, donde los residuos orgánicos disminuyeron en promedio un 4% aproximadamente.

En otros países se encontraron valores distintos a los reportados en esta investigación. En Portugal los residuos orgánicos representan el 27,40%, papel 20,30%, plástico 18%, vidrio 6%, metales 5%, textiles 3,80% (Gomes *et al.*, 2008). En Missouri, Estados Unidos, se reporta que la composición de residuos es de 41% papel, 21% orgánicos, 16% plásticos, 6% metales, 3% vidrio y 13% otros residuos (Zeng *et al.*, 2005). En Chipre se tiene que la composición de los residuos es 24% papel, 5% plástico, 39% residuos de comida, 14% residuos de jardín, 1,50% vidrio y 2% metales (Eleftheriou, 2007). En todos los estudios mencionados la composición de residuos orgánicos es menor a la reportada en Ensenada.

Estimación del biogás en el RESA de Ensenada

De observaciones *in situ* y entrevistas con el gerente del RESA se obtuvo la siguiente información: 1) la disposición anual de RSM en el año 2005 fue de 132.055 Mg; 2) las operaciones del RESA se iniciaron en el 2004 y su clausura será en el 2018; 3) no se han registrado incendios en el sitio de disposición final; 4) la profundidad promedio de cada celda es de 15 m; 5) antes de depositar residuos se instala una recubierta inferior de geomembrana; 6) los residuos depositados se cubren diariamente y solamente se han cerrado dos celdas, las cuales tienen cobertura final; 7) los residuos se compactan en un 75%; 8) no se observaron afloramientos de lixiviados.

El incremento anual estimado de la disposición de residuos en Baja California, de acuerdo con cifras reportadas en el 2008 por la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnat), es del 5%.

Table 1. Average composition of HSW in Ensenada

Type of waste	Kilograms (Kg)	Percentage (%)
Food scraps	909.08	36.20
Paper and cardboard	285.27	11.36
Yard trimmings	80.35	3.20
Wood	8.71	0.35
Rubber, leather, bones and straw	5.44	0.22
Textiles	156.60	6.24
Toilet paper	269.33	10.72
Other organic material	6.97	0.28
Disposable diapers	146.34	5.83
Metals	64.39	2.56
Construction and demolition material	17.99	0.72
Glass and ceramics	118.89	4.73
Plastics	309.87	12.34
Other non-organic material	132.12	5.26
Total	2,511.35	100.00

It can be seen that the percentage of organic components in waste composition was 68.57% and 30.30% in inorganic components. Research carried out in different places around Mexico has reported different organic waste percentages. Ojeda-Benitez *et al.*, (2003) showed organic waste in Mexicali as being 64.78%. Gómez *et al.*, (2008) reported that organic waste in Chihuahua accounted for 62.00%. As to Guadalajara, Bernache-Pérez *et al.*, (2001) reported that 63.50% of the total amount of waste generated was organic waste. Buenrostro (2001) reported 68.10% organic waste for Morelia. These amounts were slightly lower than those reported in the present investigation, where organic waste decreased by an average of 4%.

Waste composition in other countries has been found to be different to that of the present research. Organic waste in Portugal has accounted for 27.40%, paper 20.30%, plastic 18%, glass 6%, metals 5% and textiles 3.8% (Gomes *et al.*, 2008). It has been reported that waste composition in Missouri, USA, was about 41% for paper, 21% for organics, 16% for plastics, 6% for metals, 3% for glass and 13% for other waste (Zeng *et al.*, 2005). Waste composition in Cyprus has been reported as being 24% for paper, 5% for plastics, 39% for food scraps, 14% for yard trimmings, 1.5% for glass and 2% for metals (Eleftheriou 2007). Organic waste composition in all these studies was less than that reported in Ensenada.

Estimating biogas in the Ensenada sanitary landfill

The results of *in situ* research and interviews with the sanitary landfill operation manager were as follows. Annual MSW disposal in 2005 was 132,055 Mg. Sanitary landfill operations began in 2004 and the site will close in 2018. No fires have been reported in the disposal site. The average depth of each cell is 15 m. A lower geomembrane liner is placed before discarding waste. Discarded waste is covered daily and only two cells have been closed so far, having a final covering. Waste is compacted by up to 75% and no leachate release was observed.

The annual estimated increase of waste disposal in Baja California was 5% according to the 2008 figures reported by the Secretariat of the Environment and Natural Resources (SENR).

En español

In English

Con la información sobre la composición de los residuos el modelo asigna automáticamente los diferentes valores de k y L_0 de acuerdo con su nivel de degradación. Los resultados en k son: degradación rápida (DR), 0,10; degradación moderadamente rápida (DMR), 0,05; degradación moderadamente lenta (DML), 0,20; degradación lenta (DL), 0,10. Los resultados en L_0 son: DR, 69; DMR, 149; DML, 214; DL, 202.

Assuming a median 50% CH_4 and 50% CO_2 biogas composition and that biogas capture began in 2009 with the k and L_0 values described above, estimated potential biogas recovery would reach its peak during the year of closure (2019) - 1,152 m^3/hr (see Figure 1), 1.90 MW maximum capacity (see Figure 2). Afterwards, it would decrease by around 0.10 MW per year. This is because the model assumed that maximum generation would normally occur in the closure year or in the next year, and biogas generation would go down exponentially as the organic fraction of food scraps became consumed (SCS Engineers 2009).

Comparando los resultados con otros estudios (SCS Engineers, 2007) la capacidad máxima de generación de energía del RESA clausurado de Ensenada es aproximadamente menor en un 65% a la reportada en la presente investigación. Sin embargo, este aproximado se obtuvo utilizando el Modelo Mexicano de Biogás versión 1.0, en el cual los valores de k y L_0 se obtuvieron con base en la composición de residuos proporcionada por el municipio de un estudio realizado en el 2002.

The model automatically assigned values for k and L_0 according to their level of degradation from information about waste composition. The results for k were: 0.10 fast-decay (FD), 0.05 medium fast decay (MFD), 0.20 medium slow decay (MSD) and 0.10 slow-decay (SD). The results in L_0 were: 69 FD, 149 MFD, 214 MSD and 202 SD.

Assuming a median 50% CH_4 and 50% CO_2 biogas composition and that biogas capture began in 2009 with the k and L_0 values described above, estimated potential biogas recovery would reach its peak during the year of closure (2019) - 1,152 m^3/hr (see Figure 1), 1.90 MW maximum capacity (see Figure 2). Afterwards, it would decrease by around 0.10 MW per year. This is because the model assumed that maximum generation would normally occur in the closure year or in the next year, and biogas generation would go down exponentially as the organic fraction of food scraps became consumed (SCS Engineers 2009).

Comparing the results with other studies (SCS Engineers, 2007), the maximum power generation in the closed Ensenada landfill would be around 65% lower than that reported in the present investigation. However, this approximation was obtained using the Mexican biogas model (version 1.0) where k and L_0 values were based on waste composition provided by the municipality from a study conducted in 2002.

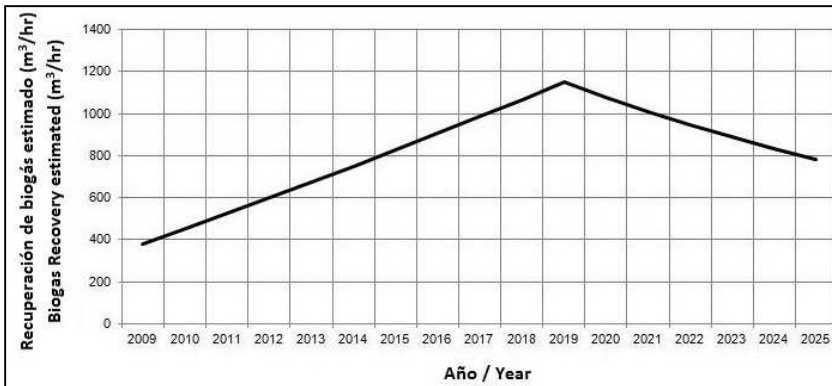


Figura 1. Proyección del potencial de recuperación de biogás en el RESA de Ensenada.

Figure 1. Projected potential biogas recovery in the Ensenada sanitary landfill

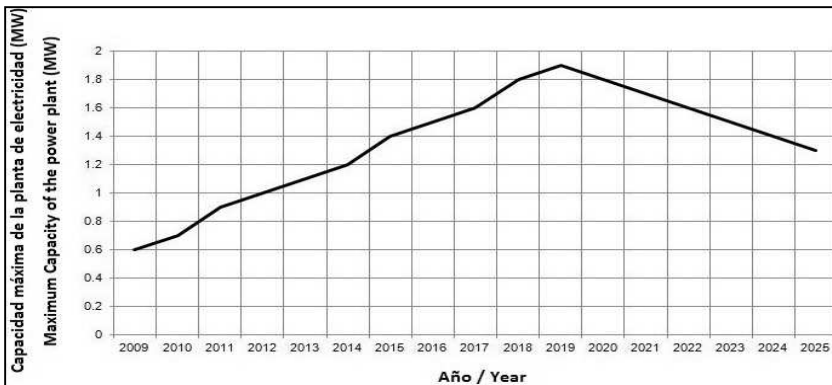


Figura 2. Proyección del potencial de generación eléctrica empleando el biogás del RESA de Ensenada.

Figure 2. Projected potential electricity generation using biogas from the Ensenada sanitary landfill

En un estudio realizado en el 2005 por SCS Engineers en el RESA de Chihuahua (México), se encontró que utilizaron el Modelo de SCS, que es una versión modificada del de la EPA. La comparación de composición de residuos se hizo con base en los

A study conducted in 2005 by SCS Engineers in the Chihuahua sanitary landfill, Mexico, used the SCS model, a modified version of the EPA Model. Waste composition was compared using typical US rates, such data determining the values of k and L_0 . Using

porcentajes típicos de Estados Unidos, datos que ayudan a determinar los valores de k y L_0 . Utilizando este modelo y en el escenario de rango medio, la capacidad máxima de generación de energía eléctrica se estimó en 3,30 MW en el 2009, ascendente hasta 4,30 MW en el 2013, descendiendo a 2,6 MW en el 2019 (SCS Engineers, 2005a). En otro estudio llevado a cabo en el mismo año por SCS Engineers, en el RESA de Querétaro (México), se utilizaron tanto el modelo de Chihuahua como los porcentajes típicos de estados Unidos. En este estudio la recuperación de biogás fue de 3,20 MW en el 2009, ascendente hasta 5,40 MW en el 2016 y descendiendo a 3,80 MW en el 2019 (SCS Engineers, 2005b).

Ambos estudios revelan cantidades muy similares en la recuperación de biogás estimada, lo cual puede deberse a que en Chihuahua la operación se inició en 1994 y la clausura será en el 2013; la composición de los orgánicos es de 68% y la cantidad de residuos aproximadamente de 390.000 Mg anuales. En el caso de Querétaro la operación comenzó en 1996 y la clausura será en el 2015, la composición de orgánicos es de 62% y la cantidad de residuos aproximadamente de 300.000 Mg anuales.

Los resultados anteriores son superiores a los obtenidos en el RESA de Ensenada, donde el valor máximo es de 1,90 MW y la cantidad de residuos anual aproximadamente de 132.055 Mg, a pesar de que la composición de orgánicos en este estudio (68,57%) es similar a los reportados en Chihuahua y Querétaro. En dichos estudios se emplearon otros porcentajes típicos en la comparación de la composición de los residuos, existiendo una diferencia muy marcada entre los porcentajes. Por ejemplo, los residuos alimentarios en Estados Unidos son el 11,50%, al contrario de México, que suman el 36,00%; o el papel, que representan el 26,60% en Estados Unidos y el 15,70% en México. Dichos porcentajes afectan los parámetros de k y L_0 , que son la parte medular del modelo. Igualmente, no se modeló de acuerdo con el Modelo Mexicano de Biogás, de manera que no se puede efectuar una comparación confiable. Adicionalmente, se encontró un estudio hecho en el RESA Simeprodeso de Monterrey, Nuevo León, en el que se empleó el modelo Usepa E-PLUS, el cual es diferente a los anteriores, usándose también una metodología distinta para evaluar la recuperación de biogás (LFG Consult, 2007). Por este motivo, tampoco los resultados derivados de ese estudio son comparables con los reportados aquí. Por esas razones, es importante estandarizar criterios con el objetivo de poder realizar comparaciones válidas respecto a la evaluación de recuperación del biogás.

Conclusiones

El conocimiento de la proporción orgánica de los residuos es relevante por ser uno de los parámetros claves a los fines de poder estimar con mayor precisión la generación de metano y aprovechar los residuos para generar energía. En ese sentido, este estudio mostró que los residuos de la ciudad de Ensenada cuentan con un componente orgánico de aproximadamente el 70%.

La energía eléctrica que se podría obtener al utilizar el biogás generado en el RESA de Ensenada sería el 3,46% de la capacidad de generación eléctrica instalada en Ensenada en el 2004. A medida que la cantidad de metano disminuya en el biogás del RESA, se reducirá el poder calorífico del biogás y la eficiencia del

this model and a mid-range scenario, maximum electric power generation was estimated to be 3.30 MW in 2009, rising to 4.30 MW in 2013 and then dropping to 2.6 MW in 2019 (SCS Engineers, 2005a). Another study by SCS Engineers in 2005 in the sanitary Queretaro landfill, Mexico, used the same model as in Chihuahua and typical US proportions. Biogas recovery in this study was 3.20 MW in 2009, rising to 5.40 MW in 2016 and dropping to 3.80 MW in 2019 (SCS Engineers, 2005b).

Both studies showed similar amounts of estimated biogas recovery. This may have been due to the Chihuahua sanitary landfill began operation in 1994 and its closure will be in 2013; organic composition is 68% and the amount of waste is around 390,000 Mg annually. Queretaro sanitary landfill began operation in 1996 and its closure will be in 2015; organic composition is 62% and the amount of waste is about 300,000 Mg annually.

The above results were higher than those obtained in the Ensenada sanitary landfill where estimated maximum electric power generation was 1.90 MW and annual amount of waste was about 132,055 Mg, although the present study's organic composition (68.57%) was similar to that reported in Chihuahua and Queretaro. Other typical rates were used in these studies when comparing waste composition, but there was a marked difference between percentages. For example, food waste in the USA was 11.50%, contrary to 36.00% in Mexico, or paper waste was 26.60% in the USA and 15.70% in Mexico. These percentages affected k and L_0 values which form the core of the model. The Mexican biogas model was not modelled, so reliable comparison cannot be made. A study of the SIMEPRODESO sanitary landfill in Monterrey, Nuevo Leon, used the "USEPA E-PLUS" model which is different from the previous ones and also used a different methodology for evaluating landfill gas recovery (LFG Consult, 2007). The results from that study are thus not comparable with those reported here. Criteria must thus be standardised to be able to make valid comparisons when evaluating biogas recovery.

Conclusions

Knowledge percentage organic waste is one of the key parameters for more accurately estimating methane generation and waste used to generate energy. This study has thus shown that Ensenada landfill waste had around 70% organic component.

The electrical energy that could be obtained from using the biogas generated from the local sanitary landfill would provide 3.46% of Ensenada's installed electricity generation capacity in 2004. As the amount of methane decreases in landfill biogas, this will reduce the biogas' calorific value and electric motor

grupo motor-generator eléctrico. Si se obtiene una eficiencia global del motor alternativo de combustión interna del 81% y una eficiencia del sistema de captura del biogás del 66%, esta energía se podría utilizar en el alumbrado público abasteciendo 11,080,80 MW/h de los 19,179,75 MW/h consumidos por la ciudad en el 2007, de acuerdo con el *Anuario Estadístico de Baja California*, edición 2008. Es decir, se cubriría aproximadamente el 60% de la energía utilizada para el servicio de alumbrado de calles, plazas, parques y jardines públicos de la ciudad de Ensenada. Considerando un tipo de cambio de 13 pesos mexicanos por dólar estadounidense, se tendría un ahorro aproximado de 1,423 millones de dólares.

Un aspecto relevante es la reducción potencial de emisiones de CO₂ equivalente (CO₂e) que dejarían de liberarse a la atmósfera si se pusieran en práctica estrategias de recuperación y uso de biogás. Estas emisiones serían de aproximadamente 747,060 toneladas métricas durante el período 2009-2022. Este volumen tiene un valor total de 8,2 millones de dólares en el mercado de bonos de carbono, tomando como referencia un costo promedio de 11 dólares cada tonelada métrica de CO₂e reducido (Flores *et al.*, 2008).

El siguiente paso sería desarrollar otros estudios empleando una metodología similar, a los objetos de identificar similitudes y correlacionar aspectos que permitan crear nuevo conocimiento. Esto coadyuvaría al aprovechamiento de los residuos sólidos como fuente de energía y al logro de la sustentabilidad.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Conacyt por el financiamiento otorgado para la realización de este estudio.

Referencias / References

- Alazraque-Cherni, J., Renewable Energy for Rural Sustainability in Developing Countries., *Bulletin of Science Technology Society*, Vol. 28, No. 2, 2008, pp. 105-114.
- Aronica, S., Bonanno, A., Piazza, V., Pignato, L., Trapani, S., Estimation of biogas produced by the landfill of Palermo, applying a Gaussian model., *Waste Management*, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 233-239.
- Batool, S.A., Chuadhry, M.N., The impact of municipal solid waste treatment methods on greenhouse gas emissions in Lahore, Pakistan., *Waste Management*, Vol. 29, No. 1, 2008, pp. 63-69.
- Bernache-Perez, G., Sanchez-Colon, S., Garmendia, A.M., Davila-Villarreal, A., Sanchez-Salazar, M.E., Solid waste characterisation study in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico., *Waste Management Research*, Vol. 19, No. 5, 2001, pp. 413-424.
- Buenrostro Delgado, O., Los residuos sólidos municipales. Perspectivas desde la investigación multidisciplinaria., *Universidad (Ed)*, México, 2001, pp. 87-91.
- Chang, N., Davila, E., Municipal solid waste characterizations and management strategies for the Lower Rio Grande Valley, Texas., *Waste Management*, Vol. 28, No. 5, 2008, pp. 776-794.
- Chiemchaisri, C., Visvanathan, C., Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thai-

land., *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), Vol. 58, No. 5, 2008, pp. 629-35.

Christophersen, M., Kjeldsen, P., Holst, H., Chanton, J., Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation., *Waste Management Research*, Vol. 19, No. 6, 2001, pp. 595-612.

Chung, S., Poon, C., Characterisation of municipal solid waste and its recyclable contents of Guangzhou., *Waste Management Research*, Vol. 19, No. 6, 2001, pp. 473-485.

Eleftheriou, P., Energy from waste: a possible alternative energy source for large size municipalities., *Waste Management Research*, Vol. 25, No. 5, 2007, pp. 483-486.

EPA, Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook: Environmental Protection Agency, United States of America, 1996. <http://www.epa.gov/landfill/res/pdf/handbook.pdf> Acceso: 04/08.

Flores, R., Muñoz Ledo, R., Flores, B., Cano, K., Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio., *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 7, No. 1, 2008, pp. 35-39.

Garg, A., Achari, G., Joshi, R.C., A model to estimate the methane generation rate constant in sanitary landfills using fuzzy synthetic evaluation., *Waste Management Research*, Vol. 24, No. 4, 2006, pp. 363-375.

If biogas recovery strategies and use were put into practice this would lead to an important reduction in CO₂ emission equivalent (CO₂e) which would no longer be released into the atmosphere. These emissions would account for around 747,060 metric tons during 2009-2022. Such volume would be worth USD\$ 8.2 million on the carbon market, having an average baseline cost of USD\$ 11.00 per metric ton of CO₂e reduced (Flores *et al.*, 2008).

The next step would be to carry out other studies using a similar methodology to identify similarities and correlate aspects for creating new know-how. This would help in the use of solid waste as an energy source and achieving sustainability.

Acknowledgements

The authors wish to thank CONACYT for the funding provided for this study.

En español

- Gomes, A., Matos, M., Carvalho, I., Separate collection of the biodegradable fraction of MSW: An economic assessment., *Waste Management*, Vol. 28, No. 10, 2008, pp. 1711-1719.
- Gomez, G., Meneses, M., Ballinas, L., Castells, F., Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico., *Waste Management*, Vol. 28, No. 12, 2008, pp. 2465-2471.
- Kong, I.C., Microbial characteristics associated with six different organic wastes undergoing anaerobic decomposition in batch vial conditions., *Waste Management Research*, Vol. 26, No. 3, 2008, pp. 261-266.
- Kumar, S., Mondal, A., Gaikwad, S., Devotta, S., Singh, R., Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study., *Atmospheric Environment*, Vol. 38, No. 29, 2004, pp. 4921-4929.
- Lawson, P., *Landfill, Microbiology and Research: An Introduction to the Workshop.*, Landfill Microbiology: R & D Workshop. Harwell. England, 1989, pp. 1-9.
- LFG Consult, Case studies of CDM - Landfill Gas Projects Monterrey, Mexico (Benlesá), 2007, http://siteresources.worldbank.org/INTLACREGTOPURBDEV/Resources/840343-117812_0035287/ModelMonterrey.pdf Acceso: 06/08.
- Machado, S.L., Carvalho, M.F., Gourc, J., Vilar, O.M., Nascimento, J.C.D., Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results., *Waste Management*, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 153-161.
- Marshall, A., Growing bigger., *Waste Management World*, Vol. 8, No. 2, 2007.
- Meraz, L., Aranda, C., Domínguez, A., Producción de metano en relleno sanitario: Un Modelo Cinético Fractal., *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales: La sustentabilidad en las grandes ciudades*, AIDIS-FEMISCA, México, 2008, pp. 1-7.
- NMX-AA-022-1985 Norma Mexicana NMX-AA-022-1985: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y cuantificación de Subproductos, 1985, pp. 1-7.

In English

- Ojeda-Benitez, S., Armijo-de Vega, C., Ramírez-Barreto, M.E., Characterization and quantification of household solid wastes in a Mexican city., *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 39, No. 3, 2003, pp. 211-222.
- SCS Engineers, Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0, 2009, http://www.epa.gov/lmop/int/users_manual_mexico_lfg_model_v2_2009.pdf Acceso: 09/09.
- SCS Engineers, Informe de la prueba de extracción y estudio de pre-factibilidad para recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario de Ensenada, México, Preparado por Landfill Methane Outreach Program, EPA-USA, 2007, pp. 29-38.
- SCS Engineers, Estudio de pre-factibilidad para la recuperación y utilización en el relleno sanitario de Chihuahua, Chihuahua, México, 2005a, http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Chihuahua_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf Acceso: 06/08.
- SCS Engineers, Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario de Querétaro, Querétaro, México, 2005b, http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Chihuahua_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf Acceso: 06/08.
- SEMARNAT, Compendio de Estadísticas Ambientales 2008, 2008, http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/03_residuos1.html Acceso: 03/09.
- Walter, G.R., Fatal flaws in measuring landfill gas generation rates by empirical well testing., *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), Vol. 53, No. 4, 2003, pp. 461-468.
- Zeng, Y., Trauth, K.M., Peyton, R.L., Banerji, S.K., Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri., *Waste Management Research*, Vol. 23, No. 1, 2005, pp. 62-71.
- Zhang, H., He, P., Shao, L., Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation., *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 22, 2008, pp. 5579-5588.