



Revista AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica

Volúmen 1, número 4, año 2008 ISSN 0718-378X
PP

CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS GENERADO EN SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS ÚRBANOS EN LUGARES SELECCIONADOS DE LA ZONA CENTRO MÉXICO

CHARACTERIZATION OF BIOGAS GENERATED IN FINAL DISPOSAL SITES OF URBAN SOLID WASTES
SELECTED IN THE CENTER ZONE OF MEXICO

Gábor Kiss
Sergio Flores
Guillermo Encarnación
Gustavo Solórzano

ABSTRACT

The results of the characterization of biogas generated in 13 final disposal sites of urban solid wastes in México showed uniform data relative to methane and carbon dioxide concentrations, with average values between 50% and 60% of CH₄, and between 35% and 45% of CO₂, in all sites, with slight ranges in percentage for each site. As regards nitrogen, its concentrations showed higher differences partly caused by the presence of air among the disposed wastes and elsewhere by probable differences in the waste composition, considering the original nitrogen content in the organic fraction. Oxygen concentration in the samples were very low and in several sites they fell below the equipment detection limit, which indicated that waste ages are higher than the necessary time to consume all the oxygen in the air trapped inside the cells, but, on the other hand, proved the insulation efficiency of the covering layers. As regards total methane and carbon dioxide emissions—considering the biogas flows measured—it was found that sites with larger methane production are generally the larger producers of carbon dioxide. The results show trends that lead to the interpretation that the sites with larger greenhouse gas production are the oldest sites and/or are managed as sanitary landfills with sufficient compaction and appropriate covering of the disposed wastes. Nevertheless, equivalent CO₂ emissions are considerably lower in sites where biogas is burned. Finally it was found that most of sanitary landfills have lower emissions of greenhouse gases, at least in relation to the size of the site and the quantity of the disposed wastes.

KEYWORDS: Solid wastes, final disposition, biogas, greenhouse effect.

V-Kiss-México-001

CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS GENERADO EN SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LUGARES SELECCIONADOS DE LA ZONA CENTRO DE MÉXICO

Gábor Kiss

Subdirector de Investigación sobre el Manejo Integral de los Residuos. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología (CENICA-INE), MÉXICO

Sergio Flores

Jefe de Departamento de Investigación Aplicada en Residuos. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología (CENICA-INE), MÉXICO

Guillermo Encarnación

Jefe de Departamento de Tecnologías Aplicadas al Manejo de Residuos. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología (CENICA-INE), MÉXICO

Gustavo Solórzano

Director de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología (CENICA-INE), MÉXICO

Dirección: UAM Unidad Iztapalapa, Edificio W, 2° piso - Av. San Rafael Atlixco 186 - Col. Vicentina, Del. Iztapalapa - MÉXICO, D.F. - C.P. 09340 - MÉXICO - Tel.: (+52) 55 5613 3787 - Fax: (+52) 55 5613 3821 - e-mail: gkiss@ine.gob.mx

RESUMEN

Los resultados de la caracterización del biogás generado en 13 sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México, muestran uniformidad de los datos relativos a las concentraciones de metano y bióxido de carbono, con valores promedio entre 50 y 60% de CH₄, así como entre 35 y 45% de CO₂ considerando todos los sitios, y con rangos estrechos de apenas unas unidades porcentuales en cada sitio. Respecto al nitrógeno, sus concentraciones mostraron mayores diferencias, lo cual se atribuye en parte a la presencia de aire entre los residuos dispuestos y, por otra, a las probables diferencias en la composición de la basura considerando el contenido original de nitrógeno en la fracción orgánica. Las concentraciones de oxígeno en las muestras resultaron muy bajas e incluso por debajo del límite de detección del equipo en varios sitios, lo cual indica edades de residuos mayores a los tiempos necesarios para que se consumiera todo el oxígeno del aire atrapado dentro de las celdas, y por otra parte demuestra la eficiencia de aislamiento de las capas de cubierta. Con respecto a las emisiones totales de metano y bióxido de carbono, considerando los flujos medidos de biogás, se nota que los sitios con mayor producción de metano por lo general son también los mayores productores

de bióxido de carbono. Los resultados muestran tendencias que permiten interpretar que los sitios con mayor producción de gases de efecto invernadero son los más antiguos y/o los que son manejados como rellenos sanitarios con suficiente compactación y adecuada cobertura de los residuos dispuestos. No obstante, las emisiones de CO₂ equivalente se reducen considerablemente en los sitios en donde el biogás es quemado, resultando finalmente que la mayoría de los rellenos sanitarios tienen menores emisiones de efecto invernadero, al menos en valores proporcionales al tamaño del sitio y a la cantidad de residuos dispuestos.

Palabras clave: Residuos sólidos, disposición final, biogás, efecto invernadero, calentamiento global

INTRODUCCIÓN

En México, según datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en el año 2005 aproximadamente el 97% de los residuos sólidos urbanos generados se disponía en tierra, ya sea en rellenos sanitarios (con la obra de ingeniería necesaria e infraestructura adecuada para su operación y control), en sitios controlados (sin infraestructura completa pero con vigilancia y cobertura de los residuos con cierta frecuencia), o en tiraderos a cielo abierto (sin control alguno y violando la mayoría de las normas y reglamentos ambientales).

En los sitios de disposición final de residuos, independientemente del grado de control que se tenga en el lugar, por causa de la descomposición de la basura se generan emisiones con importantes efectos al medio ambiente como es el biogás, cuyos dos componentes principales – metano y bióxido de carbono– son considerados como gases de efecto invernadero objetos del Protocolo de Kyoto, compromiso internacional para enfrentar el cambio climático global. Razón por la cual se hace necesario realizar proyectos de investigación que evalúen las características del biogás generado en sitios representativos de la República Mexicana, con la finalidad de generar información para la toma de decisiones, considerando por ejemplo las oportunidades ofrecidas a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), instrumento de incentivo financiero derivado del Protocolo de Kyoto.

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El presente estudio se deriva de un proyecto realizado por la Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados (DIRSC) del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), perteneciente al Instituto Nacional de Ecología (INE), que comprendió la caracterización del biogás generado en algunos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos de la zona centro de México.

El objetivo general del proyecto fue establecer una base de datos representativa sobre las propiedades de las emisiones generadas en sitios de disposición final de diferentes características en cuanto a la ubicación geográfica, condiciones climáticas, población atendida, dimensiones del sitio y control de operación, con la finalidad de facilitar la toma de decisiones en materia ambiental y manejo de residuos, así como asentar las bases para futuras investigaciones.

Considerando la problemática del cambio climático que experimenta la Tierra, las emisiones de contaminación a la atmósfera –por su impacto ambiental regional e incluso global– cobran cada vez mayor importancia; razón por la cual el presente artículo está enfocado, entre otros, a los gases de efecto invernadero que se generan en los sitios de estudio.

2. SITIOS DE ESTUDIO

Los sitios de estudio se ubican en la Región Centro de la República Mexicana, representando diferentes condiciones climáticas, dimensiones y métodos de operación, lo cual permite generar información más representativa. Se han incluido rellenos sanitarios (RS) y sitios controlados (SC), tanto municipales como regionales, siendo operados por empresas privadas concesionarias, por los propios municipios correspondientes, o bien, vigilados por el Gobierno del Distrito Federal (GDF), en el caso de los dos sitios clausurados que se encuentran en la capital. La siguiente tabla muestra el resumen de todos los sitios considerados en esta etapa del proyecto:

Tabla 2.1. Sitios de disposición final considerados en el proyecto

Sitio	Entidad Federativa	Tipo	Operador
Prados de la Montaña	Distrito Federal	RS clausurado	GDF
Santa Catarina	Distrito Federal	RS clausurado	GDF
Tlalnepantla	Estado de México	RS en operación	Proactiva MA
Tepotzotlán	Estado de México	SC en operación	Municipio
Chimalhuacán	Estado de México	SC en operación	Municipio
Querétaro	Querétaro	RS en operación	Proactiva MA
Puebla	Puebla	RS en operación	RESA
Tehuacán	Puebla	RS en operación	Municipio
San Andrés Cholula	Puebla	SC clausurado	Municipio
San Pedro Cholula	Puebla	SC en operación	Municipio
Huejotzingo	Puebla	RS en operación	RESA
Jalapa	Veracruz	RS en operación	Proactiva MA
Poza Rica	Veracruz	SC en operación	Constructo SA de CV

3. METODOLOGÍA DE LOS MUESTREOS Y ANÁLISIS

Dentro del marco de una estrategia metodológica que permitió estudiar un buen número de sitios representativos de la zona centro de la República Mexicana, se aplicaron diferentes metodologías de muestreos y análisis en los diferentes tipos de sitios.

Con la selección de dos ó tres puntos de muestreo que fueron identificados en un sistema de geoposicionamiento (GPS), se pretendió lograr una representatividad de cada sitio, no obstante la selección fue influenciada por la ubicación de los pozos de venteo y/o quemadores de biogás adecuados para el muestreo, mientras en los sitios sin sistema de venteo dependió del lugar donde fue posible perforar la superficie de la celda.

La metodología empleada para acondicionar el punto para la toma de muestra, dependió de las características del sitio de disposición final y del punto específico de emisión (perforación en la cubierta de las celdas, pozos de venteo y extracción, quemadores de biogás). En todo caso, se buscó realizar el muestreo de una forma hermética, evitando la fuga de biogás alrededor del punto de muestreo, así como la entrada de aire al equipo y la dilución de las muestras.

En la medición de flujo de biogás se empleó el equipo primario de medición de flujo SKC modelo 311, que consistía de un tubo vertical de vidrio en el cual el flujo de biogás conectado por la parte inferior del equipo hacía ascender una burbuja de jabón, mientras tanto con un cronómetro se tomaban los tiempos de recorrido entre la marca de inicio (0 mL) y final (1,000 mL). Se hacía una serie de repeticiones (8 a 10) de medición de tiempos y el flujo se calculaba como promedio aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo}(ml / \text{min}) = \frac{60}{\text{Tiempo}(\text{seg})} \times (\text{volumen_aforado_mL})$$

Después de la determinación de unos parámetros de campo (monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, entre otros), con un analizador multigases marca MultiRAE®, se prosiguió a la toma de muestra y preservación. El biogás fue almacenado en bolsas TEDLAR® con capacidad de 5 L llenadas al 80%. En la mayoría de los casos las muestras fueron tomadas a través de una manguera apropiada, aplicando sólo el flujo libre del biogás, mientras que en el caso de las perforaciones en las celdas cubiertas resultó necesario inducir el flujo generando presión negativa con bombas eléctricas marca SKC®, para muestreo de gases. Una vez alcanzado el volumen requerida para la muestra, las bolsas fueron selladas por las válvulas, y con las etiquetas de muestreo adecuadas eran finalmente colocadas en bolsas oscuras de mayor tamaño.

El análisis de las muestras de biogás se llevó a cabo en el Laboratorio de la Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados del CENICA, mediante cromatografía de gases, utilizando un cromatógrafo de gases tipo SRI 8610C con columna empacada CTR I y Detector de Conductividad Térmica (TCD), para determinar metano (CH₄), bióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂).

Previo a los muestreos se realizó una curva de calibración y respuesta del equipo bajo los procedimientos de aseguramiento y control de calidad para su aplicación en el CENICA. Una vez que la muestra llegó al laboratorio, se procedió a verificar la respuesta (señal) del equipo, posteriormente se inyectó muestra por triplicado (400 µL), aplicando también la repetida inyección de estándares de control como parte del aseguramiento de calidad, con cada lote de diez muestras.

4. RESULTADOS

Los muestreos se llevaron a cabo durante los meses de agosto y septiembre del 2006, con mediciones realizadas en los diferentes puntos de cada sitio en una misma oportunidad. En las tablas y figuras subsecuentes se presentan los resultados obtenidos, derivados de los valores determinados en cada punto de muestreo.

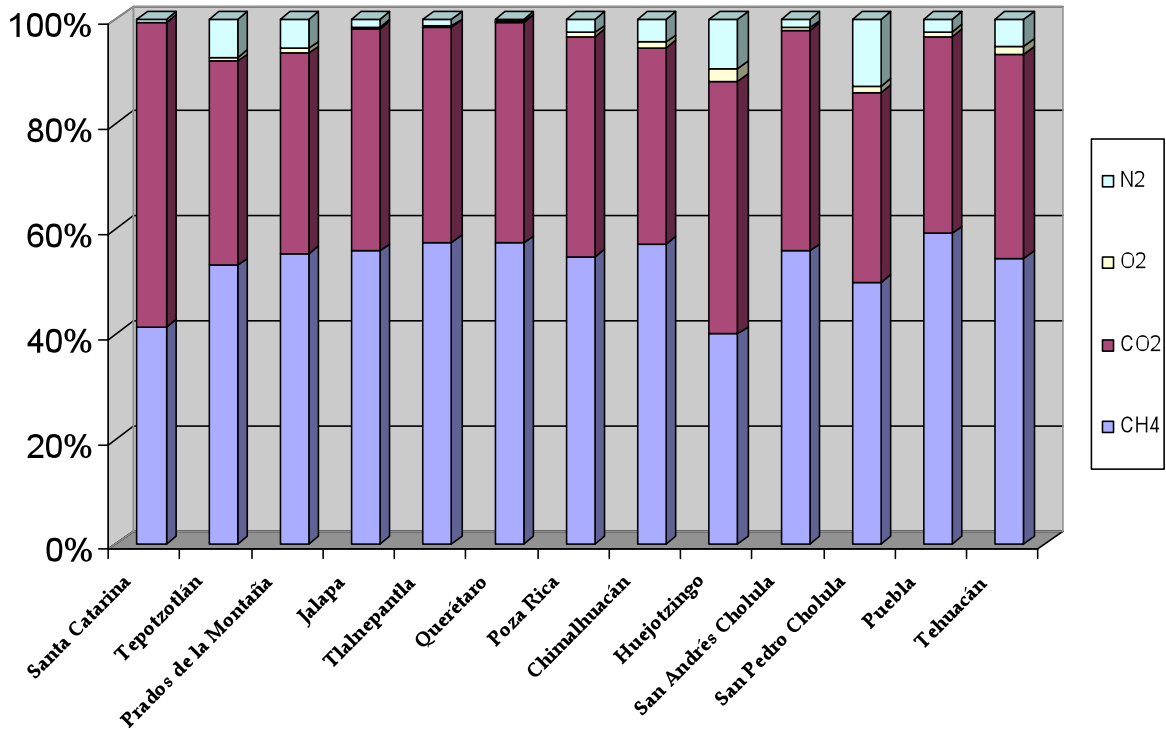
En la *Tabla 4.1* y *Figura 4.1* se presentan las composiciones promedio del biogás (media de valores de los puntos muestreados) que se determinaron para cada sitio. Cabe mencionar que en algunos muestreos se empleó una bomba portátil para inducir el flujo, lo cual podría interferir en la dilución del biogás. Además, se observó la presencia de aire en algunas muestras, posiblemente debido a la dificultad para acondicionar el punto de muestreo, sobre todo cuando se tuvo que realizar una perforación manual a través de la capa de cubierta de tierra sobre los residuos. No obstante a lo anterior, se pudo lograr una buena precisión en la metodología de muestreo, lo cual se refleja en la relativa uniformidad de los valores obtenidos en los análisis,

siendo las composiciones similares a las que suelen resultar de una adecuada degradación (dominantemente anaerobia) de los residuos sólidos urbanos.

Tabla 4.1. Datos de composición promedio del biogás por sitio

SITIO	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	N₂ (%)
Prados de la Montaña	55.31	38.09	0.94	5.66
Santa Catarina	41.28	58.08	0.00	0.64
Tlalnepantla	57.41	40.95	0.23	1.40
Tepotzotlán	52.99	38.91	0.70	7.40
Chimalhuacán	57.08	37.50	0.98	4.43
Querétaro	57.27	42.17	0.08	0.48
Puebla	59.13	37.54	0.83	2.50
Tehuacán	54.43	38.82	1.44	5.30
San Andrés Cholula	55.76	42.04	0.47	1.72
San Pedro Cholula	49.75	36.26	1.26	12.72
Huejotzingo	39.98	48.04	2.55	9.43
Jalapa	55.80	42.31	0.39	1.50
Poza Rica	54.62	42.09	0.70	2.60

Fig. 4.1. Diagramas de composición promedio del biogás por sitio



Los valores de flujo que se obtuvieron con las mediciones en cada punto de muestreo, se presentan en la *Tabla 4.2*.

Tabla 4.2. Datos de flujos máximos, mínimos y promedios en los sitios de disposición final

SITIO	FLUJO (L/min)		
	MAX	MIN	Promedio
Prados de la Montaña	2.98	0.95	1.67
Santa Catarina	8.13	2.99	5.29
Tlalnepantla	20.41	2.00	8.35
Chimalhuacán	1.48	1.47	1.47
Querétaro	31.58	0.41	10.21
Puebla	9.58	7.16	8.42
Tehuacán	4.08	3.62	3.78
San Andrés Cholula	1.27	1.17	1.21
Huejotzingo	1.39	1.35	1.37
Jalapa	3.72	1.62	2.35
Poza Rica	1.78	1.56	1.67

Cabe notar que en dos sitios (Tepotzotlán y San Pedro Cholula) la presión del biogás fue insuficiente para elevar la burbuja en la columna del aparato, lo cual impidió determinar los valores de aforo demasiado bajos para la resolución de este equipo.



5. DISCUSIÓN

En los resultados obtenidos para la composición del biogás, se observa que ésta mostró bastante homogeneidad y apenas ligeras variaciones entre todos los sitios.

Las *Tablas 5.1 a 5.4* presentan los rangos de concentración de metano, bióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno, observados en cada uno de los sitios. Se observa la relativa homogeneidad en los datos de CH₄ y CO₂ (*Tablas 5.1 y 5.2*), con rangos estrechos de apenas unas unidades porcentuales (siendo la única excepción los valores de una muestra tomada en Santa Catarina).

Respecto al nitrógeno, sus concentraciones mostraron mayores diferencias, sobre todo en Tepotzotlán, Chimalhuacán, San Pedro Cholula y Huejotzingo (*Tabla 5.3*). También son estos sitios en donde se determinaron los valores más altos para este componente, en unas muestras puntuales.

Tabla 5.1. Rangos de concentración de CH₄

Sitio	Rangos de CH ₄ (%)
Prados de la Montaña	53.1 a 59.5
Santa Catarina	24.3 a 58.2
Tlalnepantla	55.4 a 58.6
Tepotzotlán	47.7 a 58.2
Chimalhuacán	51.5 a 63.0
Querétaro	56.6 a 57.6
Puebla	56.7 a 61.5
Tehuacán	53.4 a 55.4
San Andrés Cholula	54.2 a 57.3
San Pedro Cholula	44.6 a 54.9
Huejotzingo	34.6 a 45.3
Jalapa	52.5 a 58.5
Poza Rica	54.5 a 54.7

Querétaro	0.0 a 0.9
Puebla	1.4 a 3.6
Tehuacán	4.6 a 6.0
San Andrés Cholula	1.5 a 1.9
San Pedro Cholula	5.5 a 19.9
Huejotzingo	3.0 a 15.9
Jalapa	0.5 a 2.9
Poza Rica	1.5 a 3.7

Tabla 5.3. Rangos de concentración de N₂

Sitio	Rangos de N ₂ (%)
Prados de la Montaña	3.6 a 9.5
Santa Catarina	0.4 a 0.8
Tlalnepantla	0.5 a 2.7
Tepotzotlán	0.2 a 14.5
Chimalhuacán	1.2 a 10.2

Tabla 5.2. Rangos de concentración de CO₂

Sitio	Rangos de CO ₂ (%)
Prados de la Montaña	35.9 a 41.9
Santa Catarina	41.3 a 74.9
Tlalnepantla	40.4 a 41.2
Tepotzotlán	36.2 a 41.5
Chimalhuacán	34.8 a 40.9
Querétaro	41.9 a 42.4
Puebla	36.4 a 38.7
Tehuacán	38.7 a 38.9
San Andrés Cholula	40.7 a 43.3
San Pedro Cholula	34.3 a 38.2
Huejotzingo	45.2 a 50.9
Jalapa	40.8 a 43.9
Poza Rica	40.8 a 43.4

Tabla 5.4. Rangos de concentración de O₂

Sitio	Rangos de O ₂ (%)
Prados de la Montaña	0.7 a 1.1
Santa Catarina	0.0 a 0.0
Tlalnepantla	0.0 a 0.7
Tepotzotlán	0.0 a 1.4
Chimalhuacán	0.5 a 1.6
Querétaro	0.0 a 0.2
Puebla	0.6 a 1.0
Tehuacán	1.2 a 1.6
San Andrés Cholula	0.4 a 0.5
San Pedro Cholula	1.1 a 1.4
Huejotzingo	0.7 a 4.3
Jalapa	0.1 a 0.8
Poza Rica	0.4 a 1.0

En los casos de Tepotzotlán, Chimalhuacán y San Pedro Cholula se puede descartar la dilución de la muestra por aire del ambiente, ya que las proporciones relativas entre oxígeno y nitrógeno en las muestras críticas no coinciden con la relación conocida para la atmósfera ($O_2/N_2 = 21/78 = 0.27$). Por lo tanto, los valores relativamente altos de nitrógeno en estos sitios se asocian probablemente a los procesos de desnitrificación de la fracción orgánica de los residuos que se llevan a cabo en condiciones anaerobias. En Huejotzingo, sin embargo, claramente se trata de la presencia de aire en una de las muestras en donde dicha relación fue exactamente el valor mencionado, lo cual indica una cantidad de aire atrapada aún dentro de las pilas de basura, en esta celda de residuos recientemente dispuestos.

Los rangos de oxígeno (*Tabla 5.4*) resultaron aún más uniformes que los de metano, ya que de acuerdo a la metodología empleada y sus límites de detección no se determinaron concentraciones de O₂ en varias muestras, y sus valores máximos de apenas 1.5% en otras. El único valor fuera de este rango fue el 4.3% que se observó en una muestra de Huejotzingo, lo cual se puede explicar con la edad de este sitio que es el más reciente de todos. No obstante, aún en el mismo ya se constatan condiciones predominantemente anaerobias, con apenas 0.79% de oxígeno encontrado en la otra muestra del mismo lugar.

En cuanto a otros componentes determinados en campo con el analizador multigases, se observa que los valores promedio más altos de concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) se obtuvieron en Poza Rica, Puebla, Tlalnepantla y Tehuacán (*Tabla 5.5*). Cabe destacar que en estos lugares se cuantificaron concentraciones muy similares para los diferentes puntos de muestreo en cada sitio. Además, se observaron valores relativamente altos en Santa Catarina y Prados de la Montaña, pero ya con mayores diferencias entre los puntos de muestreo dentro del mismo sitio.

Respecto a los valores de monóxido de carbono (CO), destacan los sitios de Tepetzotlán, Huejotzingo, Poza Rica y Jalapa, y se midieron valores relativamente altos en San Andrés Cholula también (*Tabla 5.6*). La aparición de CO generalmente indica concentraciones de oxígeno muy limitadas para la oxidación completa de los compuestos orgánicos. Estas condiciones podrían prevalecer durante cierto tiempo en muchos sitios entre los residuos recientemente depositados y/o poco compactados y consolidados, como eran probablemente los casos aquí mencionados.

Tabla 5.5. Mayores concentraciones de H₂S

Sitio	H ₂ S promedio (ppm)
Poza Rica	224
Puebla	212
Tlalnepantla	208
Tehuacán	169

Tabla 5.6. Mayores concentraciones de CO

Sitio	CO promedio (ppm)
Tepetzotlán	842
Huejotzingo	670
Poza Rica	665
Tlalnepantla	664

Si se analizan los resultados de las mediciones de flujo de biogás (*Tabla 4.2*), se nota que los sitios con mayores aforos fueron Querétaro, Tlalnepantla, Puebla y Santa Catarina, lo cual se sustenta por las características similares de estos sitios que los distinguen de los otros. Los primeros tres sitios son rellenos sanitarios que llevan muchos años en operación, y el último incluso está ya clausurado después de haber operado durante décadas como tiradero a cielo abierto, con la basura dispuesta suficientemente consolidada y con los procesos de descomposición estabilizados que mantienen una estable y abundante generación de biogás. Además, todos cuentan con un adecuado sistema de conducción del gas generado, con redes de conductos que abarcan toda el área y terminan en puntos fijos de venteo y quema.

Desde este punto de vista, parece sorprendente el bajo aforo que se observó en el sitio clausurado de Prados de la Montaña, sin embargo hay que notar que en este sitio existe un sistema de extracción forzada del biogás con una red de conductos que llevan a los quemadores instalados. Durante el muestreo se tuvo que apagar el quemador y esperar a que se estabilizara el flujo natural del biogás; esta condición parece que no se logró por las limitaciones de tiempo para el muestreo, lo cual resultó valores de aforos medidos por debajo de lo esperable. Por lo tanto, en este sitio sería necesario realizar una nueva medición de aforo, permitiendo mucho más tiempo (varias horas o incluso un día) para la estabilización del flujo natural después de cortar la extracción forzada.

Los flujos más bajos de biogás se experimentaron en Tepetzotlán y San Pedro Cholula, donde el flujo natural incluso fue insuficiente para hacer posible su medición por el equipo aplicado. Los sitios con más bajos valores de aforo medidos fueron los de San Andrés Cholula, Huejotzingo, Chimalhuacán y Poza Rica, por no hacer mención del caso de Prados de la Montaña, ya explicado anteriormente.

Para tener una idea sobre la cantidad total de las emisiones a la atmósfera, se puede hacer un ejercicio de cálculo presentado en la *Tabla 5.7*. Conociendo el flujo promedio (L/min) y las

concentraciones medias (%) de metano y bióxido de carbono en el biogás de los puntos muestreados, se puede calcular la cantidad total de las emisiones de CH₄ y CO₂ (t/año), considerando las densidades de dichos componentes. De los resultados se nota bien que los sitios con mayor producción de metano por lo general son también los mayores productores de bióxido de carbono.

Tabla 5.7. Emisiones de CH₄ y CO₂ a través de los pozos muestreados en cada sitio

Sitio	Flujo prom. del biogás (L/min)	CH ₄ prom. en el biogás (%)	Emisión de CH ₄ por pozo (m ³ /año)	Emisión de CH ₄ por pozo (t/año)	CO ₂ prom. en el biogás (%)	Emisión de CO ₂ por pozo (m ³ /año)	Emisión de CO ₂ por pozo (t/año)
Querétaro	10.2	57.3	3,072	2.20	42.2	2,262	4.48
Puebla	8.4	59.1	2,609	1.87	37.5	1,656	3.28
Tlalnepantla	8.4	57.4	2,534	1.82	41.0	1,810	3.58
Santa Catarina	5.3	41.3	1,150	0.82	58.1	1,618	3.20
Tehuacán	3.8	54.4	1,087	0.78	38.8	775	1.53
Jalapa	2.4	55.8	704	0.50	42.3	534	1.06
Poza Rica	1.7	54.6	488	0.35	42.1	376	0.74
Prados de la M.	1.7	55.3	494	0.35	38.1	340	0.67
Chimalhuacán	1.5	57.1	450	0.32	37.5	296	0.59
San Andrés Ch.	1.2	55.8	352	0.25	42.0	265	0.52
Huejotzingo	1.4	40.0	294	0.21	48.0	353	0.70

Hay que notar que considerando las deficiencias en la aplicación de promedios “representativos” para cada sitio (sin poder verificar su verdadera representatividad, debido al insuficiente número de puntos, muestreos y mediciones), también se decidió aplicar otra simplificación para este ejercicio. Así, para la densidad de metano y bióxido de carbono se emplearon los valores correspondientes a condiciones estándares de 25 °C y 100 kPa ($\rho_{CH_4} = 0.717 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{CO_2} = 1.980 \text{ kg/m}^3$), no olvidando que para determinaciones de mayor precisión se requeriría un ajuste de éstos a las condiciones locales de cada sitio.

Se recuerda además, que los resultados obtenidos se refieren apenas a 2 ó 3 puntos muestreados por cada sitio una sola vez, sin certeza de su representatividad para todo el sitio, lo que no permite extender los promedios resultantes para la totalidad de pozos de venteo en un sitio. Para ello, se debería muestrear un mayor número de puntos y por un mayor número de veces, así como faltaría verificar si los pozos son los únicos puntos de emisiones o habrá migraciones de biogás hacia otras salidas también.

Para realizar una verdadera comparación de los sitios de disposición final de residuos, con respecto al grado de contaminación que significan sus emisiones a la atmósfera, es necesario considerar la contribución de sus componentes al calentamiento global del planeta. El metano y el bióxido de carbono son ambos importantes gases de efecto invernadero, sin embargo el grado de la contribución de cada uno es muy diferente, lo que hace necesario calcular las emisiones totales en toneladas de CO₂ equivalente, sabiendo que el efecto del metano es 23 veces mayor

al del bióxido de carbono, de acuerdo con el Tercer Reporte de Evaluación elaborado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, organismo internacional establecido por la Organización de las Naciones Unidas para evaluar los riesgos del cambio climático inducido por la actividad humana.

Tabla 5.8. Emisiones de CO₂ equivalente a través de los pozos muestreados en cada sitio

Sitio	Emisión total de CO ₂ equivalente por pozo (t/año), con venteo de biogás	Emisión total de CO ₂ equivalente por pozo (t/año), con quema de biogás*
Querétaro	55.1	10.5
Puebla	46.3	8.4
Tlalnepantla	45.4	8.6
Santa Catarina	22.1	5.5
Tehuacán	19.5	3.7
Jalapa	12.6	(2.4)
Poza Rica	8.8	(1.7)
Prados de la Montaña	8.7	1.6
Chimalhuacán	8.0	(1.5)
San Andrés Cholula	6.3	(1.2)
Huejotzingo	5.5	(1.3)

* Los datos entre paréntesis son valores hipotéticos para los sitios en donde no se quema el biogás.

La *Tabla 5.8* presenta una comparación de las emisiones de efecto invernadero de los diferentes sitios de disposición final, a través de los pozos considerados en cada sitio. Para los cálculos de las emisiones en CO₂ equivalente, se consideraron dos casos: cuando el biogás generado se emite a la atmósfera con simple venteo, y cuando el biogás es quemado en los mismos pozos o en un quemador central. En el primer caso, las emisiones de efecto invernadero se componen de metano y bióxido de carbono en las cantidades ya determinadas (*Tabla 5.7*), y para el impacto total se deberá considerar que 1 tonelada de CH₄ en su efecto equivale a 23 toneladas de CO₂. En el segundo caso, el componente metano se transforma en bióxido de carbono y agua, conforme a la siguiente ecuación: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$, y considerando los pesos moleculares correspondientes (CH₄ ≈ 16 g/mol; CO₂ ≈ 44 g/mol) resulta que 1 tonelada de metano será equivalente a 2.75 toneladas de bióxido de carbono.

Es notable que los resultados para la emisión total de CO₂ equivalente muestran tendencias que permiten interpretar que los sitios con mayor producción de gases de efecto invernadero son los más antiguos y/o los que son manejados como rellenos sanitarios con suficiente compactación y adecuada cobertura de los residuos dispuestos, en donde los procesos de descomposición estabilizados ya mantienen una abundante generación de biogás. No obstante, de la *Tabla 5.8* se ve claramente que las emisiones de CO₂ equivalente se reducen considerablemente en los sitios en donde el biogás es quemado, resultando finalmente que varios sitios de menor producción de gases de efecto invernadero tengan mayores emisiones equivalentes en este sentido, por la falta de implementación de algún sistema de aprovechamiento o quema del biogás.

Con todo lo anterior, se debe recordar que los datos presentados en las *Tablas 5.7 y 5.8* son sólo de carácter informativo sobre la aplicación de esta metodología para determinar factores de emisión, y aún se deberá llevar a cabo una investigación con más mediciones sistemáticas, tanto en tiempo como en espacio.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente proyecto de caracterización del biogás tiene como objetivo establecer una metodología para el muestreo y análisis de las emisiones gaseosas generadas en los diferentes sitios de disposición de residuos, así como asentar las bases para la construcción de una base de datos representativos, ya que en México no existe aún información sistemática y completa al respecto. En esta primera fase del proyecto se realizó una campaña de muestreo, considerando la toma de dos muestras de biogás en 8 sitios y tres muestras en 5 sitios, por lo cual los resultados permiten obtener información preliminar de las características de dichas emisiones, y faltaría aún verificar las variaciones y tendencias de los resultados, tanto en tiempo como en espacio, con el objetivo de realizar también comparaciones con otros sitios en la misma o en otra región.

De los análisis se obtuvieron resultados importantes que reflejan una relativa uniformidad en los datos de metano y bióxido de carbono en el biogás, ya que en promedio los sitios mostraron concentraciones de CH_4 entre 50 y 60%, y de CO_2 entre 35 y 45%, con rangos estrechos de apenas unas unidades porcentuales en cada sitio. Respecto al nitrógeno, sus concentraciones mostraron mayores diferencias, lo cual se debió en parte a la presencia de aire entre los residuos dispuestos en los sitios y secciones más jóvenes y, por otra parte, a las diferencias en la composición de la basura considerando el contenido original de nitrógeno en la fracción orgánica.

Las concentraciones de oxígeno en las muestras resultaron muy bajas e incluso por debajo del límite de detección en varios sitios, lo cual indica edades de residuos mayores a los tiempos necesarios para que se consumiera todo el oxígeno del aire atrapado dentro de las celdas, y por otra parte demuestra la eficiencia de aislamiento (impermeabilidad) de las capas de cubierta que no permiten la infiltración de aire hasta los residuos, manteniendo así condiciones anaerobias para la descomposición de los mismos.

Un logro importante de este proyecto fue la medición del flujo de biogás en varios sitios, para llevar a cabo posteriormente un ejercicio de cálculo sobre la cantidad total de emisiones a la atmósfera, considerando principalmente el metano y bióxido de carbono como principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global del planeta.

De los aforos promedio y las concentraciones medias de CH_4 y CO_2 en el biogás de los puntos muestreados, se calcularon las cantidades totales emitidos en toneladas al año, así como la emisión total en toneladas de CO_2 equivalente para los pozos en cuestión de cada sitio. Aún

considerando que los cálculos se referían sólo a pozos puntuales y no a sitios enteros, resultó notable, que los valores obtenidos para la emisión total de CO₂ equivalente mostraron tendencias indicando que los sitios más antiguos y/o los que son manejados como rellenos sanitarios con suficiente compactación y adecuada cobertura de los residuos, producen mayores cantidades de metano y bióxido de carbono que los sitios controlados o tiraderos a cielo abierto. No obstante, respecto a las emisiones reales de CO₂ equivalente, éstas se reducen considerablemente en los sitios en donde el biogás es quemado, resultando finalmente que la mayoría de los rellenos sanitarios tienen menores emisiones de efecto invernadero, al menos en valores proporcionales al tamaño del sitio y a la cantidad de residuos dispuestos en el lugar.

Para la continuación del estudio sería conveniente concentrar una investigación en algún sitio seleccionado, realizando un monitoreo continuo que incluya más puntos, de tal manera que se obtenga una demostrada representatividad de los parámetros determinados para las emisiones generadas en el sitio. Para ello, se debería muestrear un mayor número de puntos y por un mayor número de veces, y verificar al mismo tiempo que se incluyan todos los puntos de emisión considerando otras salidas posibles de biogás aparte de los pozos de venteo.

Los resultados de los análisis realizados en las muestras tomadas, podrán servir de referencia para futuras investigaciones y tomas de decisiones. En el estudio se han probado varias metodologías para mediciones de campo y determinaciones en laboratorio de un amplio rango de parámetros, que serán útiles tanto para los encargados del manejo integral de los residuos y los propios operadores de los sitios de disposición final, como para los investigadores y responsables de políticas públicas en la materia, considerando aspectos regionales y globales cada vez más importantes como es el cambio climático y calentamiento global del planeta.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACURIO, G., ROSSIN, A., TEXEIRA, P.F., ZEPEDA, F. (1999): Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. Serie Ambiental No. 18. 2ª edición. OPS-OMS, Washington, D.C.
2. BAGCHI, A. (1990): Design, Construction and Monitoring of Sanitary Landfill. John Wiley & Sons, New York, New York
3. CAMACHO REA, I. (2001): Estimación de Emisiones Contaminantes de Rellenos Sanitarios en México. Tesis para obtener el título de Ingeniera Química. Facultad de Química, UNAM.
4. CHRISTENSEN, T.H., COSSU, R., STEGMANN, R. (1989): Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact. Academic Press, London
5. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA [INEGI] (2005) Estadísticas Ambientales – Residuos. www.inegi.gob.mx
6. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC] (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido
7. JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY [JICA] (1999): The Study on Solid Waste Management for Mexico City in the United Mexican States. Final Report. Vol. II. Main Report. 395 p.
8. JOHANNESSEN, L.M. (1999): Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills. World Bank, Urban Development Division, Urban Waste Management Thematic Group, Working Paper Series 4
9. JOHANNESSEN, L.M., BOYER, G. (1999): Observations of Solid Waste Landfills in Developing Countries: Africa, Asia and Latin America. World Bank, Urban Development Division
10. KISS, G., ENCARNACIÓN, G. (2006): Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. Gaceta Ecológica, N° 79, p. 39-51.
11. KISS, G., FLORES, S., ENCARNACIÓN, G., ÁVILA, P., RAMÍREZ, M., SOLÓRZANO, G. (2006): Caracterización de lixiviados y biogás generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en lugares seleccionados de la zona centro de México. Reporte Final. CENICA-INE. 84 p.
12. KISS, G., MENDOZA, F. (1998): Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales. Ingeniería y Ciencias Ambientales, N° 38, p. 6-9.
13. MCBEAN, E.A., ROVERS, F.A., FARQUHAR, G.J. (1995): Solid Waste Landfill Engineering and Design. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
14. MERAZ, L., DOMÍNGUEZ, A., VALDERRÁBANO, M.L. (2002): ¿Qué gases emanan de un relleno sanitario? IV Simposio de Contaminación Atmosférica. El Colegio Nacional, UAM-Iztapalapa

15. RHYNER, C.R., SCHWARTZ, L.J., WENGER, R.B., KOHRELL, M.G. (1995): Waste Management and Resource Recovery. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida
16. ROSAS, A., FLORES, S., VELASCO, J.A., SOLÓRZANO, G. (2004): Caracterización de lixiviados y biogás generados en sitios de disposición de residuos sólidos municipales de México. Reporte Final Etapa I. CENICA-INE. 29 p.
17. SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL [SEDESOL] (2001): Manual para la Operación de Rellenos Sanitarios. México
18. SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL [SEDESOL] (2005): Metodología para el Desarrollo de un Proyecto de Biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México
19. SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL [SEDESOL] (2005): Modelo Mexicano de Biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México
20. SOLÓRZANO, G. (2000): Metodología para la determinación de la emisión de gases invernadero de sitios de disposición final de residuos sólidos municipales. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, Brasil
21. SOLÓRZANO, G. (2003): Aportación de gases de efecto invernadero por el manejo de residuos sólidos en México: el caso del metano. Gaceta Ecológica, N° 66, p. 7-15.
22. TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. (1994): Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill, New York, New York
23. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [USEPA] (1995): Decision Maker's Guide to Solid Waste Management. Second Edition. Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA530-R-95-023