

# Caracterización del biogás generado en trece sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México

GÁBOR KISS,\* SERGIO FLORES,\* GUILLERMO ENCARNACIÓN\* Y GUSTAVO SOLÓRZANO\*

Instituto Nacional de Ecología, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados. Correos-e: gkiss@ine.gob.mx, sflores@ine.gob.mx, gencarna@ine.gob.mx y gsolorza@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  $CH_4$ , así como entre 35 y 45% de  $CO_2$  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 debió en parte a la presencia de aire entre los residuos dispuestos y, por otra parte, 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. Los resultados de los análisis realizados en las muestras tomadas podrán servir de referencia para futuras investigaciones y tomas de decisiones, considerando aspectos regionales y globales cada vez más importantes como el cambio climático y calentamiento global del planeta.

Palabras clave: residuos sólidos, disposición final, biogás, gases efecto invernadero

**Summary.** The results of the characterization of the landfill gas generated at 13 final disposal sites of municipal solid wastes in Mexico, show uniformity of the data regarding methane and carbon dioxide concentrations, with average values between 50 and 60% of  $CH_4$ , as well as between 35 and 45% of  $CO_2$  considering all landfills, and with small ranges of just some percentage units at each site. With regard to nitrogen, its concentrations showed major differences, due to either the presence of air among the wastes disposed of, or the differences in the waste composition considering the original nitrogen content in the organic fraction. The oxygen concentrations in the samples resulted very low and even below the detection limit of the equipment at several sites, indicating waste ages over the time necessary to consume all the oxygen of the air trapped inside the cells, and demonstrating the isolation efficiency of the cover layers. The analytical results of the samples can serve as a reference for future research and decision making, considering regional and global aspects of increasing interest as climate change and global warming of the Earth.

Keywords: solid wastes, final disposal, landfill gas, greenhouse effect gases



## INTRODUCCIÓN

En México, según datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en el año 2005 aproximadamente 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 re-



sidos 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 Kioto, compromiso internacional para enfrentar el cambio climático global. Por esta razón resulta 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 Kioto.

#### **ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El presente artículo se deriva del proyecto Caracterización de lixiviados y biogás generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en lugares seleccionados de la zona centro de México, 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).

El objetivo general del proyecto es establecer una base de datos sobre las propiedades de los lixiviados y biogás generados en diferentes sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, su 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 establecer las bases para futuras investigaciones.

Considerando la problemática del cambio climático que experimenta la Tierra, las emisiones 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 a los resultados de la caracterización del biogás y emisión de los gases de efecto invernadero en los sitios seleccionados.

#### **LOS 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, 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 del país. El cuadro 1 (página siguiente) muestra el resumen de todos los sitios considerados en esta etapa del proyecto.

#### **LA METODOLOGÍA DE LOS MUESTREOS Y ANÁLISIS**

Con la selección de los puntos de muestreo, que fueron identificados en un sistema de geoposicionamiento (GPS), se pretendió lograr una represen-

CUADRO 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

tatividad 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.

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 llenas 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 requerido para la muestra, las bolsas fueron selladas por las válvulas, y con las etiquetas de muestreo adecuadas fueron 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 Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (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 (CH<sub>4</sub>), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>).

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.

CUADRO 2. DATOS DE COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS POR SITIO Y POR PUNTO

Sitio	Punto	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
Prados de la Montaña	PM1	53.12	41.91	1.07	3.89
	PM2	53.29	36.47	0.77	9.47
	PM3	59.50	35.91	0.99	3.60
Santa Catarina	STC1	24.37	74.85	0.00	0.78
	STC2	58.19	41.32	0.00	0.49
Tlalnepantla	TL1	55.40	41.19	0.70	2.71
	TL2	58.55	40.45	0.00	1.00
	TL3	58.28	41.22	0.00	0.50
Tepotztlán	TPZ1	47.78	36.29	1.40	14.53
	TPZ2	58.21	41.52	0.00	0.27
Chimalhuacán	CH1	51.51	36.74	1.60	10.15
	CH2	56.69	40.91	0.53	1.86
	CH3	63.04	34.85	0.82	1.29
Querétaro	QRO1	57.59	41.90	0.00	0.51
	QRO2	56.62	42.23	0.23	0.92
	QRO3	57.61	42.39	0.00	0.00
Puebla	PUE1	56.74	38.68	0.99	3.59
	PUE2	61.52	36.41	0.67	1.40
Tehuacán	TEH1	55.38	38.72	1.28	4.62
	TEH2	53.49	38.93	1.61	5.97
San Andrés Cholula	SACH1	54.26	43.33	0.47	1.92
	SACH2	57.26	40.75	0.47	1.52
San Pedro Cholula	SPCh1	54.86	38.22	1.37	5.54
	SPCh2	44.65	34.31	1.15	19.90
Huejotzingo	HJ1	34.64	45.21	4.30	15.85
	HJ2	45.33	50.87	0.79	3.01
Jalapa	JAL1	58.51	40.82	0.11	0.55
	JAL2	52.50	43.89	0.77	2.85
	JAL3	56.39	42.21	0.30	1.10
Poza Rica	PZR1	54.50	40.83	0.99	3.68
	PZR2	54.74	43.35	0.41	1.51

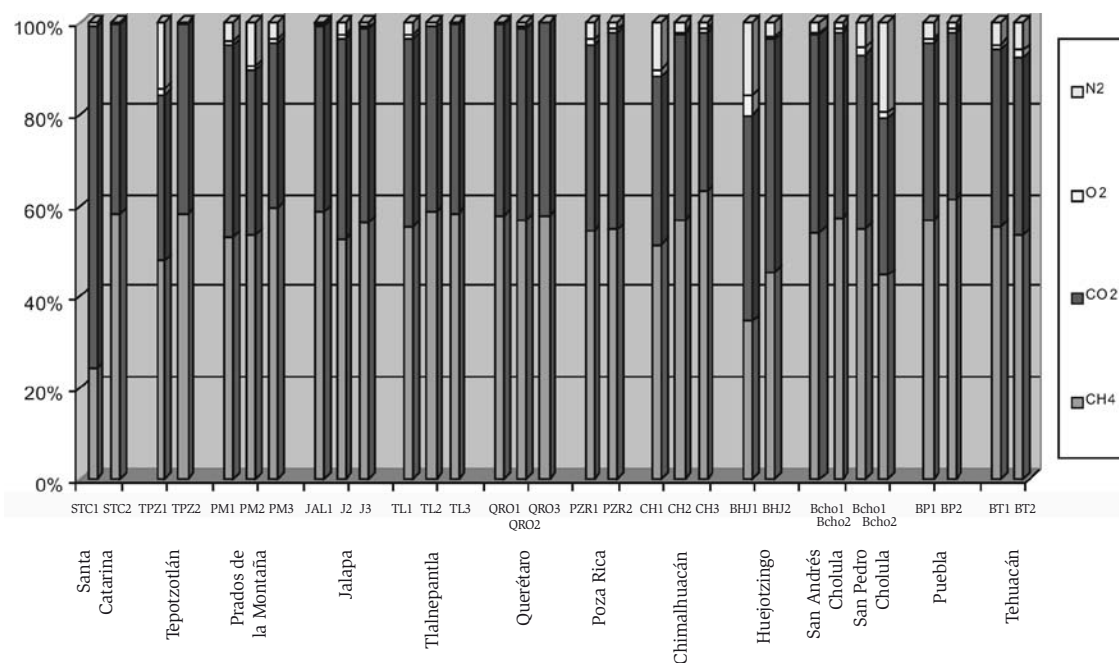
## LOS RESULTADOS

En los cuadros y figuras subsecuentes se presentan los resultados obtenidos para cada punto de muestreo, así como los promedios para cada sitio, en los muestreos realizados en agosto y septiembre del 2006.

En el cuadro 2 y en la figura 1 se presentan las composiciones del biogás determinadas en cada sitio y punto de muestreo. 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, 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

FIGURA 1. DIAGRAMAS DE COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS POR SITIO Y POR PUNTO



CUADRO 3. DATOS DE COMPOSICIÓN PROMEDIO DEL BIOGÁS POR SITIO

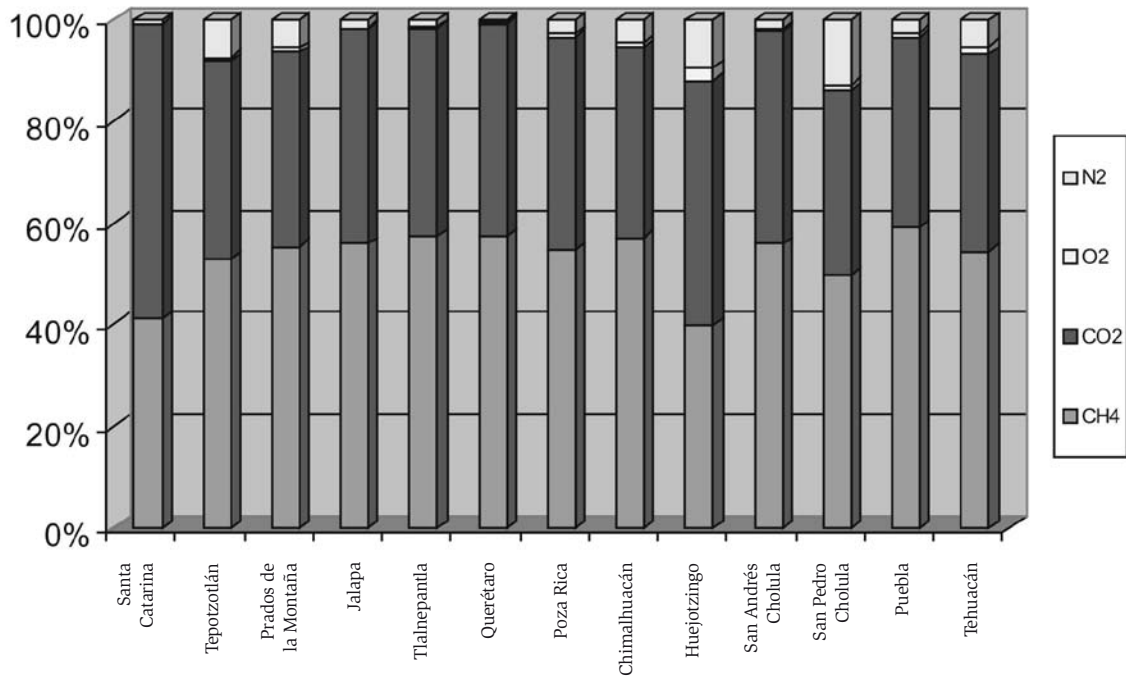
Sitio	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
Prados de la Montaña	55.31	38.09	0.94	5.66
Santa Catarina	41.28	58.08	0.00	0.64
Tlalnepantla	57.41	40.95	0.23	1.40
Tepotzotlán	52.99	38.91	0.70	7.40
Chimalhuacán	57.08	37.50	0.98	4.43
Querétaro	57.27	42.17	0.08	0.48
Puebla	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

degradación (dominantemente anaerobia) de los residuos sólidos urbanos. La composición promedio del biogás (media de valores de los puntos muestreados) para cada sitio se presenta en el cuadro 3 y en la figura 1.

## DISCUSIÓN

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

FIGURA 2. DIAGRAMAS DE COMPOSICIÓN PROMEDIO DEL BIOGÁS POR SITIO



CUADRO 4. RANGOS DE CONCENTRACIÓN DE CH<sub>4</sub>

Sitio	Rangos de CH <sub>4</sub> (%)
Prados de la Montaña	53.1 a 59.5
Santa Catarina	24.3 a 58.2
Tlalnepantla	55.4 a 58.6
Tepozotlán	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

CUADRO 5. RANGOS DE CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>

Sitio	Rangos de CO <sub>2</sub> (%)
Prados de la Montaña	35.9 a 41.9
Santa Catarina	41.3 a 74.9
Tlalnepantla	40.4 a 41.2
Tepozotlán	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

Los cuadros 4, 5, 6 y 7 presentan los rangos de concentración de metano, bióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno, observados en cada uno de los sitios. Se puede ver la relativa homogeneidad en los datos

de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (cuadros 4 y 5), con rangos estrechos de apenas unas unidades porcentuales (siendo la única excepción los valores de una muestra tomada en Santa Catarina).

CUADRO 6. RANGOS DE CONCENTRACIÓN DE N<sub>2</sub>

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

Respecto del nitrógeno, sus concentraciones mostraron mayores diferencias, sobre todo en Tepotztlán, Chimalhuacán, San Pedro Cholula y Huejotzingo (cuadro 6). También son estos sitios en donde se determinaron los valores más altos para este componente, concretamente en las muestras de SPCh2 (~20%), HJ1 (~16%), TPZ1 (~15%) y CH1 (~10%), como se puede verificar en el cuadro 1 y la figura 1.

En los casos de Tepotztlán, 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 ( $1.40/14.53 = 0.10$  en TPZ1;  $1.60/10.15 = 0.16$  en CH1;  $1.15/19.90 = 0.06$  en SPCh2) 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, se trata claramente de la presencia de aire en la muestra HJ1, ya que dicha relación aquí fue  $4.30/15.85 = 0.27$ , lo cual indica una cantidad de aire atrapada aún dentro de las pilas de basura en esta celda de residuos recientemente dispuestos.

CUADRO 7. RANGOS DE CONCENTRACIÓN DE O<sub>2</sub>

Sitio	Rangos de O <sub>2</sub> (%)
Prados de la Montaña	0.7 a 1.1
Santa Catarina	0.0 a 0.0
Tlalnepantla	0.0 a 0.7
Tepotztlán	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

Los rangos de oxígeno (cuadro 7) resultaron aún más uniformes que los de metano, ya que de acuerdo con la metodología empleada y sus límites de detección no se determinaron concentraciones de O<sub>2</sub> en varias muestras, y sus valores máximos fueron de apenas 1.5% en otras. El único valor fuera de este rango fue el 4.3% que se observó en Huejotzingo (HJ1), lo cual se puede explicar con la edad de este sitio, 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 de Huejotzingo.

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 (H<sub>2</sub>S) se obtuvieron en Poza Rica, Puebla, Tlalnepantla y Tehuacán (cuadro 8). 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 de los valores de monóxido de carbono (CO), destacan los sitios de Tepotztlán, Huejotzingo,

CUADRO 8. MAYORES CONCENTRACIONES DE H<sub>2</sub>S

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

Poza Rica y Jalapa, y también se midieron valores relativamente altos en San Andrés Cholula (cuadro 9). La aparición de CO generalmente indica concentraciones de oxígeno muy limitadas para la oxidación completa de los compuestos orgánicos. Estas condiciones pueden prevalecer durante cierto tiempo en todo sitio entre residuos recientemente depositados y/o poco compactados y consolidados, como eran probablemente los casos aquí mencionados.

Cabe recordar que los resultados mostrados reflejan parte de un muestreo exploratorio o diagnóstico, significando que el proyecto aún deberá ser complementado con estudios que contemplen muestreos repetidos y un monitoreo continuo en los sitios a lo largo del tiempo.

#### 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 ocho sitios y tres muestras en cinco sitios, por lo cual los resultados permiten obtener información preliminar de las características de dichas emisiones; y faltaría aún verificar las variaciones y tendencias

CUADRO 9. MAYORES CONCENTRACIONES DE CO

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

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<sub>4</sub> entre 50 y 60%, y de CO<sub>2</sub> entre 35 y 45%, con rangos estrechos de apenas unas unidades porcentuales en cada sitio. Respecto del 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. 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.

Para realizar una comparación significativa de los sitios de disposición final de residuos, con respecto al grado de contaminación que significan sus emisiones a la atmósfera, sería necesario considerar los flujos promedio y los volúmenes totales del biogás generado, y así la contribución de sus componentes al calen-



tamiento 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 hará necesario calcular las emisiones totales en toneladas de CO<sub>2</sub> 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.

Para los cálculos de las emisiones en CO<sub>2</sub> equivalente se deberán considerar 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, y para el impacto total se deberá considerar que una tonelada de CH<sub>4</sub> en su efecto equivale a 23 toneladas de CO<sub>2</sub>. En el segundo caso, el componente metano se transforma en bióxido de carbono y agua, conforme a la siguiente ecuación: CH<sub>4</sub> + 2O<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O, y considerando los pesos moleculares correspondientes (CH<sub>4</sub> ≈ 16 g/mol; CO<sub>2</sub> ≈ 44 g/mol) resulta que una tonelada de metano será equivalente a 2.75 toneladas de bióxido de carbono.

Para continuar este 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 el cambio climático y calentamiento global del planeta.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la valiosa e imprescindible colaboración de la Dirección General de Servicios Urbanos del Gobierno del Distrito Federal (Prados de la Montaña y Santa Catarina), de la Dirección de Prevención y Control de la Contaminación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Puebla (Puebla, Tehuacán, San Andrés Cholula, San Pedro Cholula y Huejotzingo), de la empresa Proactiva Medio Ambiente MMA, S.A. de C.V. (Tlalnepantla, Querétaro y Jalapa), de los gobiernos municipales de Tepetzotlán, Chimalhuacán y Poza Rica, así como de todos los demás municipios involucrados a través de los sitios correspondientes arriba mencionados, quienes nos facilitaron el acceso a los sitios de disposición final, acompañaron a nuestro equipo de muestreo en cada sitio, y proporcionaron la información necesaria para la realización de los trabajos de campo y elaboración de este estudio.

Para la realización de esta etapa del proyecto fue importante contar con el apoyo de los prestadores del servicio social de la Subdirección de Investigación sobre el manejo Integral de los Residuos, por lo que se reconoce la colaboración en los trabajos de campo y análisis de laboratorio, de las estudiantes pasantes de ingeniería Jacqueline Mireya Guadarrama Sánchez, Martha Berenice Jiménez Chávez, Anabel Patiño Hernández y Nayeli

Graciela Reynoso Muñoz. Finalmente, reconocemos la importante colaboración de todo el personal de la Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados, en la realización de los muestreos, y agradecemos el valioso apoyo continuo brinda-



do al proyecto, por el personal técnico y administrativo del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) del Instituto Nacional de Ecología.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acurio, G., A. Rossin, P. F. Texeira y F. Zepeda. 1999. *Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe*. Segunda edición. Serie Ambiental No. 18. OPS-OMS, Washington, D.C.
- Bagchi, A. 1990. *Design, Construction and Monitoring of Sanitary Landfill*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- 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, México.
- Christensen, T. H., R. Cossu y R. Stegmann. 1989. *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*. Academic Press, Londres.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. *Estadísticas ambientales-Residuos*. Disponible en: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Gran Bretaña.
- 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 pp. 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.
- Johannessen, L. M. y G. Boyer. 1999. *Observations of Solid Waste Landfills in Developing Countries: Africa, Asia and Latin America*. World Bank, Urban Development Division.
- Kiss, G. y G. Encarnación. 2006. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta ecológica* 79: 39-51.
- Kiss, G., S. Flores, G. Encarnación, P. Ávila, M. Ramírez y G. Solórzano. 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 pp.
- Kiss, G. y F. Mendoza. 1998. Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales. *Ingeniería y ciencias ambientales* 38: 6-9.
- McBean, E. A., F. A. Rovers y G. J. Farquhar. 1995. *Solid Waste Landfill Engineering and Design*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Nueva Jersey.

- Meraz, L., A. Domínguez y M. L. Valderrábano. 2002. ¿Qué gases emanan de un relleno sanitario? *IV Simposio de Contaminación Atmosférica*. El Colegio Nacional, UAM-Iztapalapa, México.
- Rhyner, C.R., L. J. Schwartz, R. B. Wenger y M. G. Kohrell. 1995. *Waste Management and Resource Recovery*. Lewis Publishers, Boca Raton, EE.UU.
- Rosas, A., S. Flores, J. A. Velasco y G. Solórzano. 2004. Caracterización de lixiviados y biogás generados en sitios de disposición de residuos sólidos municipales de México. Reporte Final Etapa I. CENICA-INE. 29 pp. Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2001. *Manual para la operación de rellenos sanitarios*. SEDESOL, México.
- . 2005. Metodología para el desarrollo de un proyecto de biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México.
- . 2005. Modelo Mexicano de Biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México.
- 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.
- . 2003. *Aportación de gases de efecto invernadero por el manejo de residuos sólidos en México: el caso del metano*. *Gaceta ecológica* 66: 7-15.
- Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill, Nueva York, EE.UU.
- 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.



---

**Artículo aceptado:** el 04 del 06 de 2007.  
**Ilustraciones:** Istockphoto.com.