

Determinación de la emisión de sustancias tóxicas gaseosas en el relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín

*Francisco Fernando García Rentería**, *Rubén Alberto Agudelo García***
(Recibido el 11 de agosto de 2004. Aceptado el 7 de marzo de 2005)

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada en el relleno sanitario de Curva de Rodas, el cual recibe los desechos sólidos producidos en el Valle de Aburrá, dirigida a determinar la emisión y migración de sustancias tóxicas gaseosas presentes en el biogás. Se encontraron trazas de benceno, tolueno, cloruro de vinilo y xileno. En ningún caso la concentración de estas sustancias sobrepasó los valores umbrales límite y su concentración desaparece antes de llegar a las zonas pobladas adyacentes al relleno sanitario.

----- *Palabras clave:* biogás, NMOC, COV, rellenos sanitarios, emisiones gaseosas, simulación.

Determination of the gaseous emission of toxic substances in the “Curva de Rodas” sanitary landfill in Medellín

Abstract

Results of the investigation conducted at the sanitary landfill Curva de Rodas, aimed to determine the emission and migration of toxic substances are presented. Traces of benzene, toluene, hexane, vinyl chloride and xylene were found. Concentrations of these substances were, however, below threshold limits at the landfill and below detectable limits in the air of populated areas adjacent to the sanitary landfill.

----- *Key words:* landfill gas, NMOC, VOC, sanitary landfill, emission, simulates.

* Profesor del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad del Magdalena. francisco.garcia@unimag.edu.co.

** Profesor del Departamento de Ingeniería Sanitaria. Universidad de Antioquia. ragudelo@udea.edu.co.

Introducción

Un relleno sanitario se comporta como un reactor bioquímico, con residuos y agua como entradas, y gases y lixiviado como principales salidas. Cualquier material biodegradable que sea dispuesto en un relleno, sufrirá el ataque de microorganismos hasta descomponerlo y producir gases que se emiten a la atmósfera [1]. La composición y cantidad de los gases producidos depende de una serie de factores que son específicos para cada relleno, entre ellos se cuentan su antigüedad, extensión, temperatura, pluviosidad, tipo y cantidad de materiales dispuestos, tipo de cobertura y densidad de compactación, entre otros [2]. Los gases emitidos en un relleno sanitario son: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), así como compuestos orgánicos no metanogénicos (NMOC, del inglés Nonmethane Organic Compounds), estos últimos en muy baja proporción frente a los otros [3]. El CH_4 y el CO_2 son los principales gases producidos. A la combinación de estos gases se le conoce como biogás, o gas de vertedero. Los NMOC pueden ser tóxicos y significar riesgos para la salud pública. Muchos de ellos clasifican dentro de los compuestos orgánicos volátiles (VOC), tales como la acetona, benceno, clorobenceno, cloroformo, diclorometano, bromuro de etileno, etilbenceno, tolueno, xileno y acetato de vinilo [4].

La generación de biogás es el segundo problema medioambiental en importancia, detrás de la producción de lixiviados, derivado de la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios [5]. Entre los impactos que se le atribuyen, están los efectos potenciales sobre la seguridad y la salud de los trabajadores y población vecina al relleno sanitario, además de su contribución al calentamiento de la tierra mediante el denominado efecto invernadero [6]. Los efectos directos e indirectos del CH_4 se estiman 20 veces mayores a una masa equivalente de CO_2 [2, 7]. La emisión global de CH_4 se estima entre 20 y 70 tg/año ($1 \text{ tg} = 10^{12} \text{ g}$) [5].

Los NMOC son compuestos orgánicos (contienen carbono) diferentes al CH_4 , el cual a pesar de su contenido de carbono no es clasificado entre estos, se pueden formar naturalmente o son sintetizados mediante procesos químicos; su concentración y presencia en el biogás tiene relación con el tipo de desecho dispuesto y la magnitud de las reacciones que producen los variados compuestos de la descomposición anaeróbica del desecho [8]. El biogás es generalmente conocido por representar riesgos para la seguridad personal debido a su carácter explosivo y los daños a la vegetación circundante a los sitios donde éste se genera, pues su principal componente, el CH_4 , es inflamable y en determinadas proporciones con el oxígeno del aire es explosivo. Pero sin duda el aspecto que más atención debería merecer es la presencia de una variedad de sustancias químicas volátiles peligrosas que son una significativa amenaza a la salud pública. [9].

En Estados Unidos algunos investigadores universitarios [10, 11] desarrollaron estudios sobre el efecto en la calidad del aire de las emisiones gaseosas originadas en rellenos sanitarios, encontrando que estos emiten toxinas aerotransportadas en el ambiente local. El código de salud y seguridad de California (EE. UU.), determina que en todos los rellenos sanitarios deben monitorearse las emisiones de gases de carácter tóxico. Esta es quizás la única región en el planeta donde el biogás originado en los rellenos sanitarios es sometido a medidas de vigilancia y control por los efectos tóxicos y deletéreos sobre la salud de las personas y no por medidas de protección ambiental y de control de emisiones de gases invernadero. El CARB (The California Air Resources Board) de California seleccionó diez (10) sustancias tóxicas presentes en el biogás para ser monitoreados en rellenos sanitarios, la selección de estos gases obedeció a sus efectos sobre la salud (particularmente el cáncer) en personas que han estado expuestas a los mismos, por largos periodos de tiempo. Estas sustancias son: cloruro de vinilo, benceno, dibromuro del etileno, dicloruro de etileno, cloruro metileno, percloroetileno, carbonato de tetracloruro, 1,1,1-

tricloroetano, diclorometano, tricloroetileno y cloroformo. Entre los hallazgos reportados por el CARB tenemos [12]:

- Al menos uno o más de estas diez sustancias químicas tóxicas están presentes en el ambiente próximo de 240 (67%) rellenos sanitarios de un total de 356 sitios analizados.
- Los rellenos sanitarios de residuos peligrosos y residuos sólidos municipales presentaron una habilidad similar para producir gases tóxicos.

Las investigaciones sobre este tema efectuadas en California no estudian el problema con gran detalle, pero proporcionan evidencia clara sobre la presencia de gases tóxicos en el ambiente próximo a rellenos sanitarios. Por ejemplo, más de la mitad de las emisiones de sustancias aerotransportadas medidas en 356 rellenos sanitarios analizados en California contenían benceno en una concentración promedio de 2,5 ppm. En la tabla 1 se muestran otras concentraciones promedio de sustancias químicas tóxicas presentes en el aire en las cercanías a los rellenos estudiados.

Tabla 1 Concentración de gases tóxicos en los alrededores de relleno sanitario en California, EE. UU. [12]

| <i>Sustancia química</i> | <i>Concentración promedio</i> |
|--------------------------|-------------------------------|
| Diclorometano | 4,8 ppm |
| Percloroetileno | 1,1 ppm |
| 1,1,1-tricloroetano | 650 ppb |
| Tricloroetileno | 840 ppb |

El 50 % de los análisis efectuados en diferentes rellenos sanitarios reportaron la presencia de cloruro de vinilo (con concentraciones promedio de 2,2 ppm). En la tabla 2 se reporta el porcentaje de muestras positivas a la presencia de contaminantes, al igual que la concentración máxima de las determinaciones efectuadas para detectar gases tóxicos emitidos desde los rellenos sanitarios y que fueron percibidos en el “ambiente” en las cercanías a los rellenos sanitarios estudiados. En

todos los casos se encontró migración de gases considerados como tóxicos.

Tabla 2 Presencia de sustancias químicas peligrosas en el ambiente próximo a rellenos sanitarios

| <i>Sustancia química</i> | <i>% de rellenos estudiados</i> | <i>Concentración máxima</i> |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 1,1,1-tricloroetano | 57 | 51 ppb |
| Percloroetileno | 49 | 269 ppb |
| Diclorometano | 45 | 1,3 ppm |
| Benceno | 40 | 500 ppb |
| Tricloroetileno | 32 | 130 ppb |
| Tetracloruro de carbono | 22 | 15 ppb |
| Cloroformo | 13 | 32 ppb |

Con las evidencias arrojadas por estas investigaciones, queda clara la necesidad de monitorear las emisiones atmosféricas originadas por la descomposición de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios.

Descripción del área de estudio

El sitio donde se realiza la disposición final de los residuos sólidos producidos en el Valle de Aburrá y parte del oriente cercano (Medellín, Bello, Barbosa, Girardota, Guarne, Itagüí, Sabaneta, Caldas, Copacabana, Envigado, La Estrella, El Retiro, Rionegro) además de los residuos generados en el municipio de Fredonia, está localizado sobre la margen izquierda de la autopista Medellín-Bogotá, en la cuenca de la quebrada Rodas, de la cual toma su nombre, aproximadamente un kilómetro aguas arriba de la comunidad de Machado y Fontidueño en jurisdicción de los municipios de Bello y Copacabana (véase figura 1), donde habita una población cercana a las 30.000 personas, distante del municipio de Medellín diez (10) kilómetros (tomando como referencia el punto cero en carabineros).

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se atendieron cuatro actividades básicas, en su orden:



Figura 1 Panorámica aérea del relleno sanitario Curva de Rodas, agosto de 1998

determinación del caudal de biogás emitido, composición del mismo, simulación de la emisión de los componentes del biogás incluyendo los NMOC y análisis de la dispersión de sustancias tóxicas.

Medición del caudal de biogás

Para determinar la cantidad de biogás generado por la descomposición de los residuos sólidos se efectuaron actividades de campo dirigidas a medir el caudal en los pozos de desfogue construidos para evacuar este a la atmósfera. Al momento de las mediciones existían en el relleno sanitario Curva de Rodas (RSCR), 121 pozos de desfogue que conforman el sistema de drenaje del biogás. Estas son estructuras en tubería de PVC de 12 pulgadas de diámetro colocadas en forma vertical y perforadas, para facilitar la salida del gas. En la parte superior de la tubería se coloca un quemador metálico, de 1 m de altura, el cual se adapta al tubo reduciendo su diámetro hasta dos (2) pulgadas. Este facilita la combustión del biogás dado el contenido de CH_4 , con lo cual se controla su emisión.

Para bloquear al máximo las posibles variaciones que se dan por la ubicación y la profundidad de

los pozos de desfogue y la antigüedad de los residuos sólidos dispuestos, entre otros factores, se dividió el área de disposición en tres zonas, diferenciadas como zonas 1, 2 y 3. La zona 1, corresponde a la parte superior del relleno sanitario. En esta se encuentran los residuos de mayor antigüedad (unos quince a diecinueve años) y los pozos de desfogue menos profundos (hasta unos 25 m). La zona 2 contiene residuos de una antigüedad media (unos diez años), presentando los pozos de desfogue con mayor profundidad, hasta unos 50 m. La zona 3 se ubicó en la parte inferior del área de disposición de residuos sólidos, presenta los residuos más recientes (unos dos a cinco años) y pozos con profundidades hasta de 25 m.

En cada una de estas zonas se tomó un tamaño de muestra representativo mediante la técnica de muestreo estratificado aleatorio simple (MEAS), que considera cada zona como un estrato o como una subpoblación. El total de la muestra fue de 31 pozos, el número de pozos muestreado en cada zona se presenta en la tabla 3.

La actividad de medición de caudal se realizó adaptando a la boca de cada pozo un sistema de

Tabla 3 Número de pozos muestreados por estrato o zona

| Estrato | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Número de elementos del estrato | 33,00 | 44,00 | 44,00 |
| Ponderación del estrato | 0,27 | 0,36 | 0,36 |
| Tamaño de la muestra | 9,00 | 11,00 | 11,00 |

válvulas que permitió sellar el mismo y dirigir el flujo de gas por una manguera hasta un medidor de gas. El ensayo en cada pozo se efectuó durante 1 hora con una repetición o réplica. En la figura 2 se puede apreciar el montaje efectuado para realizar estas determinaciones.

Composición del biogás

Para determinar los niveles de CH₄, CO₂, O₂ y H₂S en el biogás se empleó un analizador portátil por infrarrojos GA94 Geotechnical Instruments (rango de operación CH₄ 0-100 ± 0,1%; CO₂ 0-50 ± 0,1%; O₂ 0-21 ± 0,1%, equipado con una sonda adicional para la determinación de H₂S en un rango de concentración de 0 - 10,000 ± 1 ppm, flujo característico de la bomba de 300 cm³/min, con corrección y compensación por temperatura y



Figura 2 Medición del caudal de biogás en un pozo de desfogue en el RSCR

presión). La concentración de sustancias tóxicas se midió utilizando un detector de fotoionización Passport PID marca MSA (con un rango de detección de 0,1 a 10,000 ± 0,1 ppm, con capacidad para medir 69 gases preprogramados y 10 definidos por el usuario, lámpara de 10,6 eV) y un analizador para vapores orgánicos 580s Thermo Electron Corporation, con los cuales se pueden tomar lecturas directas de cada uno de los gases analizados. Las variables respuesta a la presencia de sustancias tóxicas fueron el benceno, cloruro de vinilo, xileno, hexano y tolueno.

Modelación y simulación de la generación de biogás

En esta actividad se empleó el modelo Landfill Gas Emission Model (LandGEM), dado que es un modelo fácil de calibrar y con resultados que se acercan a la realidad con mayor precisión que otros. El LandGEM se puede usar para estimar la tasa de emisión de CH₄, CO₂, NMOC y otros contaminantes del aire originados en rellenos sanitarios. Se basa en una ecuación cinética de primer orden que representa la producción de biogás. Se puede correr usando datos específicos para cualquier sitio y en su proceso de calibración hay que estimar y determinar los parámetros de alimentación. Para simular la generación de CH₄ se utilizan los parámetros Lo, o capacidad potencial de generación de CH₄ por parte del desecho, y k, que es la constante de la tasa de generación de CH₄. Para estimar la producción de CH₄, CO₂ y NMOC el modelo se basa en factores de emisión determinados por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) [8]. Con respecto a los parámetros básicos de alimentación del modelo (Lo, o capacidad potencial de generación de metano por parte del desecho, y k, que es la constante de la tasa de generación de metano) se asumieron los valores propuestos por el Clean Air Act (CAA) para residuos con una composición media de materia orgánica entre el 50 y el 70% características de los residuos dispuestos en el RSCR: k = 0,05 L/año y Lo = 170 m³/Mg (1 Mg = 0,989 toneladas).

Dispersión de sustancias tóxicas

La capacidad de migración en el aire de sustancias gaseosas tóxicas hacia los alrededores del área de disposición final del RSCR se determinó mediante la ayuda del *software* Air Force Toxic Chemical Dispersion Model (AFTOX) con el cual se simula la distancia a la cual puede dispersarse una determinada sustancia gaseosa dado un rango de peligrosidad que por defecto se fija como el valor umbral límite-promedio ponderado en tiempo (TLV-TWA) o pueden ser definidos por el usuario. Con la ayuda de este *software* se encuentra el corredor tóxico que representa el límite de la distancia hasta donde el contaminante puede migrar conservando una concentración en niveles que representan peligro para la salud de las personas [13]. El modelo de dispersión fue alimentado con los datos meteorológicos de la estación Tulio Ospina de la red climatológica y meteorológica del IDEAM.

Resultados y discusión

Caudal de biogás

Los resultados (media y varianza) del caudal de biogás obtenidos en los muestreos se presentan en la tabla 4.

En la zona 1 se encontró un caudal promedio de 459,566 Nm³/día de biogás, este es el valor más pequeño comparando los caudales de 865,146 y 1.206,963 Nm³/día obtenido en las zonas 2 y 3 respectivamente. El resultado concuerda con lo esperado, pues es sabido que en esta zona se ubican los residuos con mayor antigüedad de disposición, por tanto su capacidad para producir biogás será menor. Desde este punto vista los

Tabla 4 Media y varianza muestral de los resultados de la medición del biogás (caudal en Nm³/día)

| Estadístico | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Media | 459,566 | 865,146 | 1.206,983 |
| Varianza | 96.929,223 | 143.203,958 | 189.883,292 |

datos obtenidos son consistentes, ya que en las zonas donde se tienen residuos con una edad de disposición menor se encontraron caudales mayores. Según las mediciones de campo el caudal promedio emitido a la atmósfera por cada pozo de desfogue en el RSCR es de 870,049 Nm³/día, lo cual arroja un caudal total de 105.275,960 Nm³/día.

Composición del biogás en el RSCR

De acuerdo con las determinaciones efectuadas la composición media del biogás en el RSCR corresponde al 55% de CH₄, 41 de CO₂ y 72 ppmv de H₂S. La presencia de aire en las muestras analizadas fue alrededor de un 2%. Para este tipo de mediciones se estipula un límite aceptable de dilución por aire del 5%. En la tabla 5 se presentan los datos de la composición del biogás en los pozos monitoreados en el RSCR.

Determinación de sustancias tóxicas

En la tabla 6 se presentan los resultados de la medición de la concentración (ppmv) de las sustancias tóxicas gaseosas monitoreados en el biogás emitido desde el RSCR.

Se encontró una concentración máxima de 7,6 ppmv de benceno. El valor promedio reportado para este gas fue de 1,2 ppmv. Su nivel máximo está relativamente cercano al límite de exposición TWA el cual es de 10 ppm o 32 mg/m³. Este gas al ser inhalado produce vértigo, somnolencia, dolor de cabeza, náuseas, jadeo, convulsiones y hasta pérdida del conocimiento. El vapor del benceno es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; dada esta condición por su volatilización a 20 °C, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva en el aire. El principal riesgo de esta sustancia es que es carcinógena para los seres humanos. Puede afectar la sangre, el hígado y el sistema inmunológico. El tolueno, presentó una concentración máxima de 27,1 ppm, esta es la concentración más alta reportada en las mediciones, su concentración media fue de 5,6 ppm. Las exposiciones prolongadas afectan el sistema nervioso central y producen alteraciones del cua-

Tabla 5 Análisis de la composición del biogás del RSCR

| <i>Pozo</i> <i>N.º</i> | <i>CH₄</i> (%) | <i>CO₂</i> (%) | <i>O₂</i> (%) | <i>H₂S</i> (ppm) | <i>Pozo</i> <i>Nº.</i> | <i>CH₄</i> (%) | <i>CO₂</i> (%) | <i>O₂</i> (%) | <i>H₂S</i> (ppm) |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 58,7 | 37,4 | 0,8 | 14 | 57 | 51,0 | 45,6 | 1,2 | 36 |
| 6 | 56,5 | 39,1 | 0,9 | 11 | 70 | 50,2 | 44,1 | 1,4 | 154 |
| 14 | 54,8 | 44,2 | 0,0 | 129 | 74 | 54,3 | 43,1 | 0,5 | 28 |
| 16 | 56,9 | 40,2 | 0,6 | 24 | 85 | 60,0 | 36,7 | 1,2 | 37 |
| 19 | 60,6 | 36,7 | 0,5 | 25 | 88 | 55,0 | 43,1 | 0,4 | 194 |
| 29 | 54,8 | 37,6 | 1,5 | 28 | 92 | 52,3 | 47,0 | 0,7 | 68 |
| 30 | 52,5 | 46,0 | 0,0 | 68 | 93 | 51,0 | 47,3 | 0,0 | 74 |
| 33 | 59,8 | 36,4 | 0,0 | 104 | 94 | 52,4 | 43,0 | 0,0 | 95 |
| 36 | 63,7 | 30,2 | 1,4 | 84 | 97 | 55,2 | 43,0 | 0,0 | 64 |
| 37 | 52,6 | 44,0 | 0,7 | 52 | 101 | 51,2 | 45,6 | 0,7 | 58 |
| 40 | 57,8 | 35,4 | 1,4 | 100 | 102 | 50,9 | 46,8 | 0,4 | 49 |
| 41 | 58,0 | 37,6 | 0,9 | 76 | 103 | 55,0 | 44,6 | 0,0 | 83 |
| 44 | 54,2 | 38,1 | 1,5 | 74 | 105 | 57,3 | 41,6 | 0,0 | 154 |
| 50 | 55,3 | 40,0 | 0,0 | 56 | 106 | 62,3 | 32,7 | 0,7 | 127 |
| 56 | 49,3 | 45,0 | 1,0 | 28 | 117 | 54,3 | 41,0 | 1,1 | 37 |
| | | | | | 118 | 60,1 | 36,9 | 0,3 | 98 |

Tabla 6 Concentración (ppmv) de sustancias tóxicas

| <i>Pozo</i> | <i>Benceno</i> | <i>Tolueno</i> | <i>Xileno</i> | <i>Cloruro de vinilo</i> | <i>Hexano</i> | <i>Pozo</i> | <i>Benceno</i> | <i>Tolueno</i> | <i>Xileno</i> | <i>Cloruro de vinilo</i> | <i>Hexano</i> |
|-------------|----------------|----------------|---------------|--------------------------|---------------|-------------|----------------|----------------|---------------|--------------------------|---------------|
| 1 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 94 | 0,4 | 14,0 | 1,2 | 0,0 | 1,4 |
| 6 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 105 | 0,1 | 13,2 | 2,1 | 1,1 | 7,1 |
| 14 | 0,7 | 0,0 | 2,1 | 0,0 | 0,0 | 117 | 0,0 | 7,4 | 2,3 | 0,0 | 4,1 |
| 19 | 1,2 | 0,7 | 1,1 | 0,0 | 0,1 | 118 | 0,2 | 4,8 | 2,5 | 0,0 | 2,1 |
| 56 | 0,6 | 0,4 | 0,0 | 0,1 | 1,0 | 30 | 2,7 | 2,6 | 3,0 | 0,0 | 0,0 |
| 57 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,0 | 33 | 0,8 | 0,0 | 3,4 | 0,0 | 3,3 |
| 74 | 0,0 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36 | 0,5 | 21,0 | 1,5 | 0,0 | 0,0 |
| 93 | 0,6 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 37 | 0,9 | 14,1 | 1,6 | 0,0 | 2,5 |
| 103 | 0,0 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 40 | 2,5 | 27,1 | 4,2 | 0,7 | 1,7 |
| 16 | 0,0 | 2,2 | 0,1 | 0,7 | 2,0 | 88 | 3,2 | 12,4 | 7,4 | 0,0 | 4,2 |
| 29 | 0,5 | 0,0 | 0,4 | 0,0 | 0,7 | 92 | 7,6 | 0,0 | 5,6 | 0,0 | 2,3 |
| 41 | 0,9 | 0,0 | 2,1 | 0,0 | 0,3 | 97 | 1,2 | 7,6 | 6,2 | 0,1 | 3,1 |
| 44 | 2,2 | 1,4 | 0,3 | 0,6 | 0,0 | 101 | 4,8 | 9,1 | 3,4 | 0,0 | 1,6 |
| 50 | 1,4 | 0,6 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 102 | 1,2 | 17,3 | 2,7 | 0,0 | 2,2 |
| 70 | 0,7 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 106 | 1,3 | 5,1 | 2,9 | 0,0 | 5,1 |
| 85 | 0,0 | 7,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | | | |

dro hemático. Los valores de la concentración máxima y promedio encontrada para el xileno son de 7,4 y 1,8 ppm respectivamente, mientras que para el cloruro de vinilo la concentración máxima medida fue de 1,1 ppm con un promedio de 0,1 ppm. Este gas además de poseer las concentraciones más bajas, no se detecto en la mayoría de los pozos monitoreados, su TWA es igualmente bajo (5 ppm o 13 mg/m³), por tanto es deseable la condición que no se detecte en el biogás del RSCR. La TWA del xileno es de 100 ppm o 434 mg/m³ valores que permiten afirmar que el riesgo frente a estas sustancias es muy bajo, casi nulo. La concentración máxima de hexano es de 7,1 ppm con un valor medio de 1,5 ppm. Ninguno de los gases analizados en esta investigación superó los valores umbrales límite fijados en razón a los efectos sobre la salud de las personas.

Simulación de la producción de biogás

Una vez calibrado y alimentado el modelo LandGEM, se procedió a su corrida, proceso en el cual se obtuvo como resultado la proyección de la producción de biogás en la clausura y posclausura del RSCR; en las figuras 3 y 4 se grafican las proyecciones de la producción de CH₄ y CO₂ componentes mayoritarios del biogás

y en la figura 5 la proyección de la producción de biogás.

De acuerdo con estos resultados la cantidad de biogás producida en el RSCR puede estimarse como una mezcla de los caudales de CH₄, CO₂, los componentes minoritarios que este contiene y la proporción de cada uno de estos en el gas emitido. La figura 3 muestra la proyección de la producción de caudal del biogás en el RSCR dados los resultados del modelo LandGEM. La máxima producción de biogás se estima para el año 2009 en 111.678.849 Nm³/año, a partir de este año la producción comienza a disminuir paulatinamente. Para el año 2002 en el cual se realizaron las determinaciones de campo corresponde según el modelo un caudal de 69.378.853 Nm³/año lo que equivale a un caudal diario de 190.079 Nm³ correspondiente a un caudal aproximado por pozo de desfogue de 1.571 Nm³/día. Este valor es el doble del caudal medido en las determinaciones de campo (870,049 Nm³/día por pozo o 105.275,9605 Nm³/día en total).

La diferencia entre los resultados arrojados por el modelo de simulación y las determinaciones de campo son atribuidas principalmente a que gran parte del gas generado no es evacuado por las estructuras de drenaje donde se efectuaron

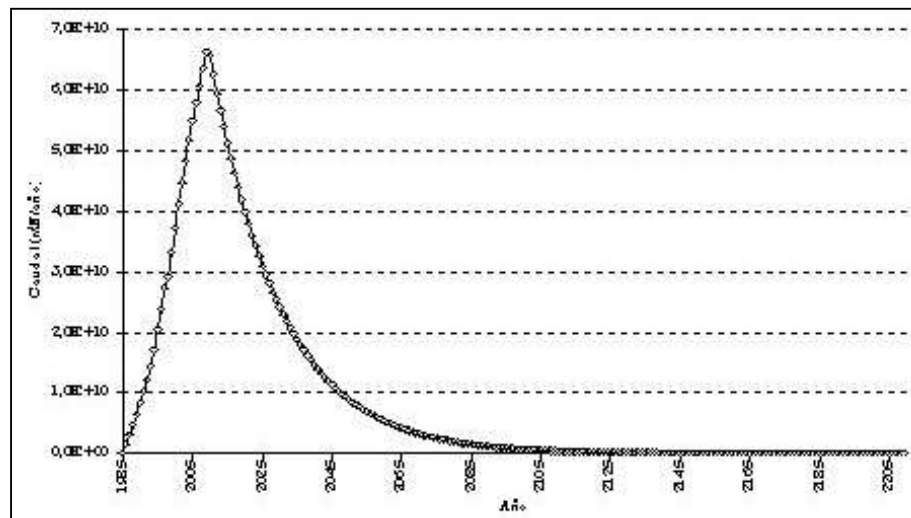


Figura 3 Proyección de la producción de CH₄ en el RSCR

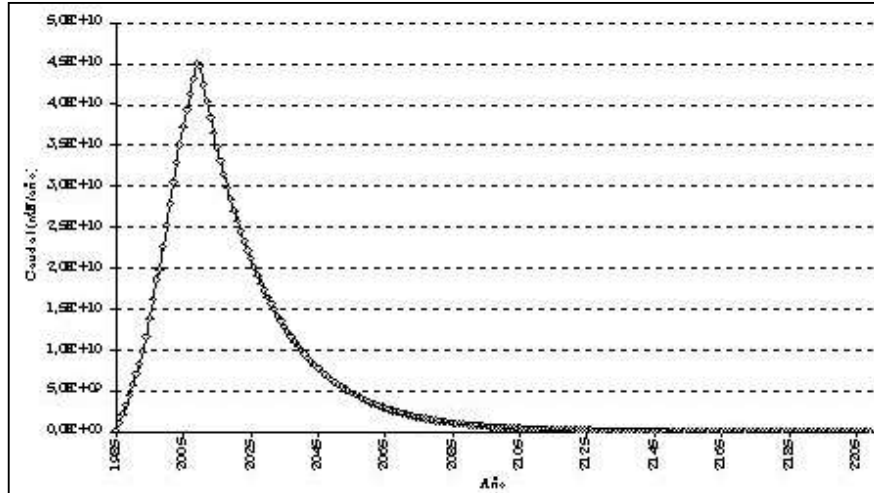


Figura 4 Proyección de la producción de CO₂ en el RSCR

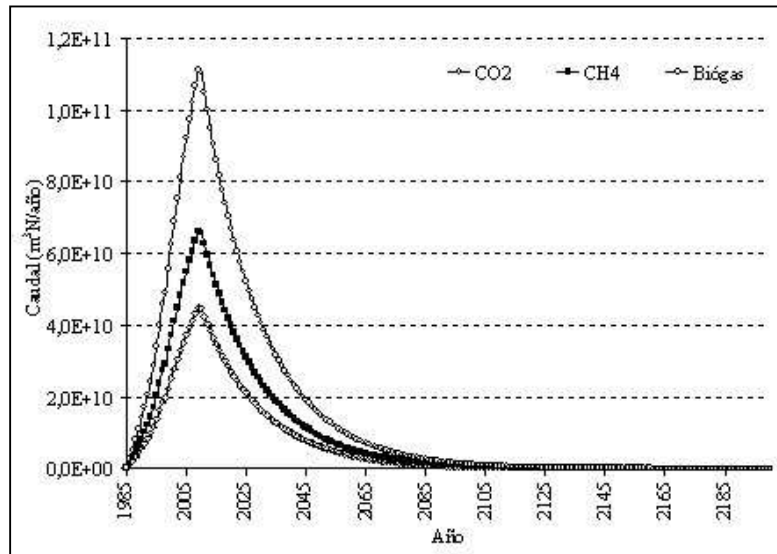


Figura 5 Proyección de la producción de biogás en el RSCR (Nm³/año)

las mediciones, pues este puede migrar hasta el suelo adyacente a los rellenos sanitarios o puede ser evacuado por grietas en el material de cobertura. En el caso concreto del RSCR el material arcilloso utilizado como cobertura de residuos tiende a disgregarse, lo que puede permitir la fuga incontrolada del biogás desde esta superficie; esto sucede principalmente en periodos secos (sin precipitaciones). Algunos autores afirman

que entre el 30 y el 70% del biogás generado en rellenos sanitarios sale a la atmósfera utilizando estos mecanismos [1, 14]. Descontadas todas las posibles causas de error en las mediciones de campo, podemos afirmar que las diferencias encontradas entre dichas determinaciones y los resultados del modelo de simulación corresponden a la cantidad de biogás que sale en forma incontrolada desde la superficie, es decir, que hay

una cantidad importante del biogás generado que no es evacuado por las estructuras de drenaje dispuestas para tal fin, sino por otros medios, como grietas y surgencias (emisiones fugitivas) en el material de cobertura. Las emisiones fugitivas se estiman en 84.804 Nm³/día lo que equivale a aproximadamente el 45% de lo producido.

Este hallazgo tiene significativa importancia desde el punto de vista ambiental, pues tradicionalmente ha existido la suposición de que para controlar la emisión de biogás desde un relleno sanitario basta con la construcción de estructuras de drenaje y generar su combustión en las mismas. Pues bien, a la luz de nuestro análisis tal medida de control sólo influye sobre el 55% del biogás generado, por lo cual considerar esta como única acción de manejo para el problema es insuficiente para controlar los impactos generados.

El modelo LandGEM tiene a su vez la facultad de simular la producción de benceno y otras 46 sus-

tancias consideradas tóxicas, las cuales se han detectado en el gas generado en los rellenos sanitarios [15]. Con la ayuda de este modelo se simuló la producción de benceno como componente del biogás del RSCR. Para el año 2002 el modelo arroja un caudal estimado en 90,40 Nm³/año. En la tabla 7 se muestran las tasas de emisión para el año 2002 de cada uno de los gases tóxicos monitoreados en esta investigación. Se destaca la presencia del tolueno como el gas con la mayor tasa de emisión.

Dispersión de contaminantes tóxicos

Con la ayuda del modelo AFTOX se determinaron las distancias hasta las cuales migran las sustancias gaseosas presentes en el biogás del RSCR. El modelo se calibró y alimentó con los factores de emisión encontrados por el modelo LandGEM y los datos climatológicos de la estación Tulio Ospina, seleccionada por su cercanía al RSCR. Los resultados mostrados

Tabla 7 Tasa de emisión de algunos COV en el RSCR para el año 2002

| Tasa de emisión | Benceno | Tolueno | Xileno | Cloruro de vinilo | Hexano |
|------------------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|
| (m ³ N/año) | 90,40 | 421,80 | 124,40 | 7,53 | 113,00 |
| (m ³ N/min) | 1.7 E-4 | 8.02 E-4 | 2.4 E-4 | 1.43 E-5 | 2.14 E-4 |
| (kg/min) | 6.16 E-4 | 3.37 E-3 | 1.25 E-3 | 4.09 E-5 | 8.49 E-2 |

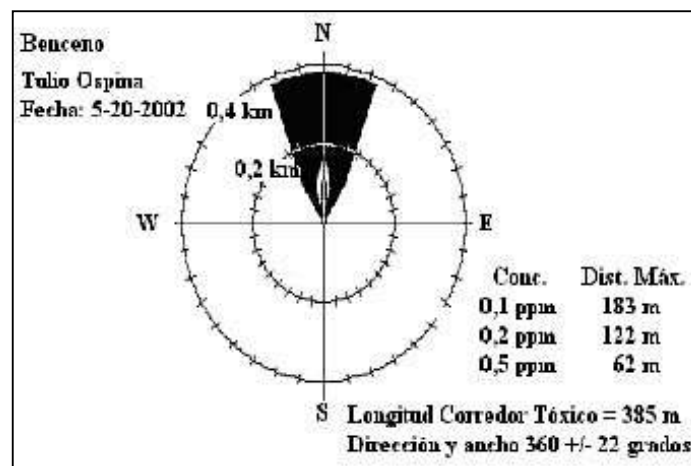


Figura 6 Simulación de la dispersión del benceno emitido en el RSCR

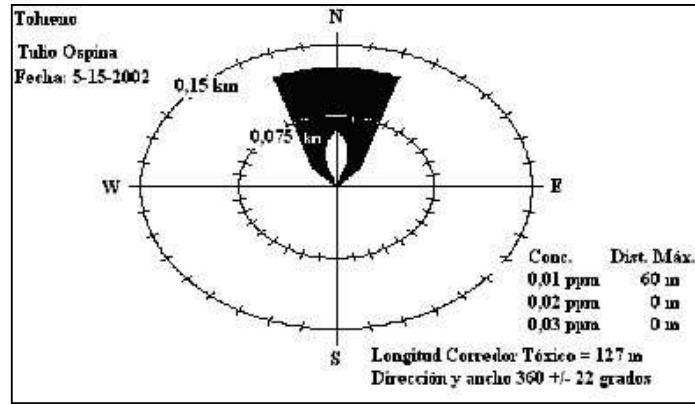


Figura 7 Corredor tóxico generado por la migración del tolueno desde el RSCR

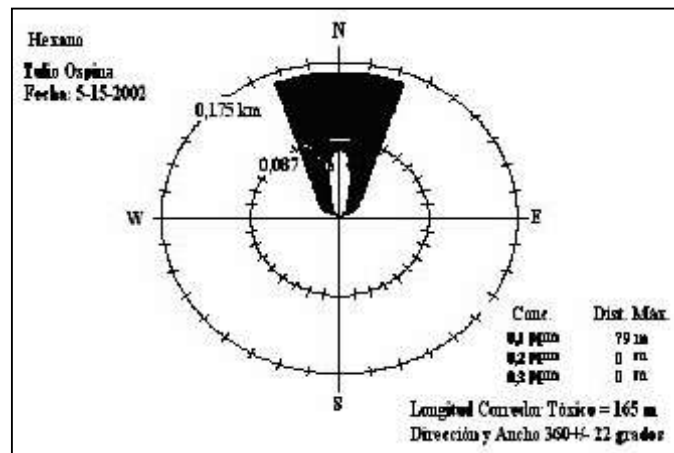


Figura 8 Corredor tóxico generado por la migración del hexano desde el RSCR

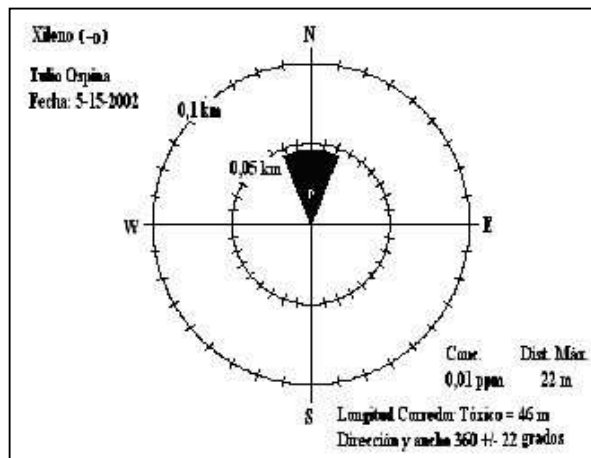


Figura 9 Corredor tóxico generado por la migración del xileno desde el RSCR

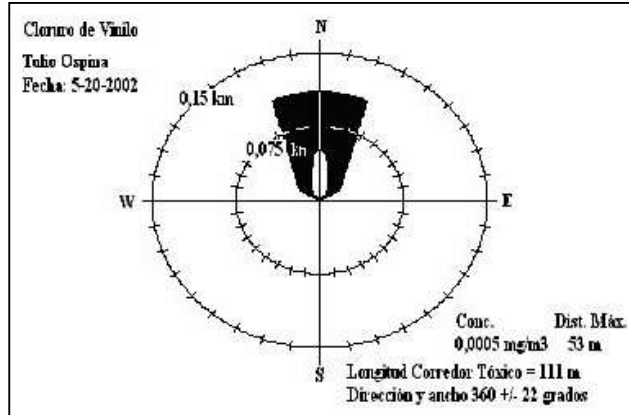


Figura 10 Corredor tóxico generado por la migración del cloruro de vinilo desde el RSCR

por el modelo se presentan en las figuras de la 6 a la 10. Las concentraciones reportadas por el modelo AFTOX están calculadas a ras de piso, para alturas máximas de 2 m.

El corredor tóxico generado por la dispersión del benceno (figura 6) emitido desde el RSCR tiene una longitud de 385 m a partir del borde del área de disposición de residuos sólidos con una dirección predominante sur-norte y un ancho de más o menos 22 ° (direction & width 360 ± 22 DEG). De acuerdo con este resultado la emisión de benceno a pesar de estar dirigida hacia los barrios Fontidueño y Machado de los municipios de Bello y Copacabana, no alcanza a afectar las áreas pobladas de los mismos, por tanto, no representa ningún riesgo para la salud de las personas que allí habitan dado que la zona de retiro existente entre el área de disposición final de residuos en el RSCR y las casas adyacentes es suficiente para proteger a las mismas de los efectos de esta sustancia tóxica (las primeras casas de estos poblados se ubican a 800 m). En el área afectada por la migración del benceno (área interna del RSCR), la concentración de este gas no alcanza el valor umbral límite de exposición que para el TWA es de 10 ppm. Según estos resultados los trabajadores que laboran en el RSCR pueden estar expuestos a dichas concentraciones en repetidas ocasiones, día tras día, sin sufrir efectos adversos.

Una situación similar presentan el tolueno (figura 7), el hexano (figura 8), el xileno (figura 9) y el cloruro de vinilo (figura 10), es decir, todos estos gases se dispersan en la misma dirección, dado que su movimiento en el aire está gobernado por la dirección y velocidad del viento en la zona. Estos no alcanzan a afectar las áreas pobladas aledañas al RSCR por cuanto su concentración en el ambiente desaparece antes de llegar a estos sitios. La emisión de estas sustancias se remite a ser un problema de salud ocupacional pues potencialmente afectaría sólo a los trabajadores y personas que permanecen en las instalaciones del RSCR, sin embargo, en ningún caso, ni en las mediciones de campo ni en los resultados de las simulaciones efectuadas, se detectó que sus concentraciones en el ambiente sobrepasaran los valores umbrales límite.

En la tabla 8 se muestra el resumen de los datos arrojados por el modelos AFTOX.

Conclusiones

El biogás producido en el RSCR presenta una composición típica de 55,42% de CH₄, 40,97 de CO₂, 0,64 de O₂ y 71,90 ppm de H₂S. En las mediciones de campo se encontró un caudal promedio de 105.275,96 m³N/día, valor que difiere del estimado mediante la utilización del *software* de simulación de la producción de biogás en rellenos sanitarios LandGEM, el cual arrojó un

Tabla 8 Resumen de los resultados de la simulación con el AFTOX

| Gas | Corredor tóxico (m) | Dirección (grado) | Ancho (± grados) | Concentración máxima (ppm) | Distancia (m) | TWA (ppm) |
|-------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------|
| Benceno | 385 | 360 | 22 | 0,1000 | 183 | 10 |
| Tolueno | 127 | 360 | 22 | 0,0100 | 60 | 100 |
| Xileno | 46 | 360 | 22 | 0,0100 | 22 | 100 |
| Cloruro de vinilo | 111 | 360 | 22 | 0,0005 | 53 | 5 |
| Hexano | 165 | 360 | 22 | 0,1000 | 79 | 50 |

caudal de 190.079 m³N/día para el año 2002. La máxima producción se espera en el año 2009 con un caudal de 305.969 m³N/día. Las emisiones fugitivas o incontroladas de biogás en el RSCR son de 84.804 m³N/día, lo que equivale aproximadamente a 47.000 m³N/día de CH₄.

Se encontraron trazas de VOC. Para efectos de esta investigación se analizó la presencia de benceno, tolueno, xileno, cloruro de vinilo y hexano. Al analizar las concentraciones de emisión que presenta cada uno de estos, se encontró que ninguno excede el valor umbral límite de exposición como TWA. La dispersión de estos gases no alcanza a afectar las áreas pobladas aledañas al RSCR. El corredor tóxico generado por su migración va desde el borde del área de disposición final de residuos sólidos hasta una distancia de 385 m en la dirección sur-norte para el caso del benceno que representa el corredor tóxico de mayor longitud.

Agradecimientos

Los investigadores agradecen a EE. VV. M E. S. P., por haber permitido el acceso al relleno Sanitario para tomar las muestras referenciadas en la investigación y poder utilizar otra del relleno, necesaria para el presente análisis.

Referencias

1. Jeuseelan, S. "A simple Mathematical model for anaerobic digestion process". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35. N.º 8. 1997.pp. 185-191.

2. Cicerone, R. J. et al. "Seasonal variation of methane flux from a Californian rice paddy". *J. Geophys. Res.* N.º 88. 1983.pp. 11022-11024.
3. Eliassen, R. "Decomposition of Landfills". *American Journal of Public Health*, Vol. 32. N.º 3. 1942.
4. Craner, J. "Toxic gases emitted from landfills". *Rachel's hazardous waste news.* N.º. 226. 1991.
5. Agudelo R. y F. García. "Producción de biogás en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos". *Cuaderno Ambiental.* N.º 1. 2000. pp. 64-73.
6. EPA. "Regulatory package for new source performance standards and III(d) Guidelines for municipal solid waste air emissions". *Public docket* N.º. A-88-09 (proposed May 1991). Research triangle park, NC. U.S. Environmental protection agency. 1991.
7. Bingermer, H. G. et al. "The production of methane from solid wastes". *J. Geophys. Rs.* N.º 92. 1987. pp. 2181-2187.
8. EPA. *Compilation of air pollutant emission factors.* AP-42, 5th ed., Supplement C. office of air quality planning and standards. Research triangle park, NC. U.S. Environmental protection agency. 1997
9. Landg, R. J. T. A. Herrera, D. P. Chang, y G. Tchobanoglous, *Trace organic constituents in landfill gas, preparado para California wasted management boar.* Department of civil engineering, University of California - Davis, Davis, CA. Noviembre de 1987.
10. Roy Albert, et al. *Review and evaluation of the monument street (baltimore) landfill* [pu/cees report #154]. (Princeton, NJ: Center for energy and environmental studies, school of engineering/applied science, Princeton University, 1983.
11. CRANER, J. A. *Monitoring air emissions of volatile organic pollutants from landfills: A technical and policy analysis and the design, construction, and operation of a landfill air sampling system.* (Princeton, NJ: Chemistry Department, Princeton University. 1984.

- □
12. *California Air Resources Board*. "Evaluation Test on a Landfill Gas-Fired Flare at the BKK Landfill Facility". West Covina, CA, ARB-SS-87-09, July 1986.
13. Bruce Kunkel. "Manual del Usuario Air Force Toxic" *Chemical Dispersion Model (AFTOX)*. 1993.
14. Barlaz, M A. "Mass-balance analysis of anaerobically decomposed refuse". *J. Envir. Enger. Asce*, Vol. 115. N.º 6. 1989. pp. 1088-1102.
15. "Criteria for municipal solid waste landfills". *40 CFR Part 258*, Vol. 56. N.º 196, October 9, 1991.