

ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO AMBIENTAL

EMISSIONES FUGITIVAS DE CH₄ E CO₂ EM CAMADAS DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO DO ESTADO DO CEARÁ

Francisco Carlos Henrique Pio de Oliveira¹ (franciscocarlosipo@gmail.com), Eliana Dantas Ribeiro¹ (elianadtr@hotmail.com), Samara Castro Freire¹ (sosamara505@gmail.com), Gemelle Oliveira Santos¹ (gemelle@ifce.edu.br), Roberto Antônio Cordeiro da Silva² (roberto@det.ufc.br)

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Fortaleza

²Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do fluxo de gases (CH₄ e CO₂) pela camada de cobertura final de uma célula de resíduos sólidos localizada no Aterro Sanitário de Caucaia-Ceará. Foram escolhidos 04 pontos na berma inferior e 04 na berma superior e as estimativas das emissões foram realizadas por meio de ensaios de placas de fluxo estático conectada ao leitor GEM5000, que faz a medição da concentração de oxigênio (%), monóxido de carbono (ppm), dióxido de carbono (%), metano (%), gás sulfídrico (%), além da temperatura (°C), pressão (mb) e do fluxo de gases (m³/h). Na berma inferior, observou-se clara tendência de aumento de fluxo do Ponto 1 para o Ponto 4 para os dois gases, podendo indicar a existência de caminhos preferenciais ou taxas de oxidação maiores no Ponto 1. O fluxo de CH₄ variou entre 9,8 x 10⁻² e 5,3 x 10⁻¹ m³/m².h e o de CO₂ variou entre 6,6 x 10⁻² e 3,9 x 10⁻¹ m³/m².h. A berma superior teve outro comportamento, pois o fluxo de CO₂ (2,0 x 10⁻¹ - 3,3 x 10⁻¹ m³/m².h) foi maior que o de CH₄ (6,6 x 10⁻² e 2,6 x 10⁻¹ m³/m².h). Os perfis de concentração de gases tiveram significativa variabilidade em curtas distâncias do solo de cobertura. Além disso, aparentemente, os resíduos sólidos sob a berma inferior estão na fase de degradação 4 (metanogênica) enquanto os resíduos sob a berma superior estão na fase de degradação 3 (acidogênica).

Palavras-Chave: Aterro Sanitário, Camada de Cobertura, Fluxo de Gases.

FUGITIVE EMISSIONS OF CH₄ AND CO₂ IN COVERAGE LAYERS ON A SANITARY LANDFILL OF CEARÁ STATE

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the gas flow behavior (CH₄ and CO₂) by the final cover layer of a solid waste cell at Caucaia-Ceará Landfill. Four points were chosen on the lower berm and four on the upper one. Emission estimations were made through static flow plate tests connected to the GEM5000 reader, measuring concentrations of oxygen (%), carbon monoxide (ppm), carbon dioxide (%) and methane (%), in addition to temperature (°C), pressure (mb) and gas flow (m³/h). In the lower berm, there was a clear tendency of flow increase from site one to site four, for both gases, indicating the existence of preferential paths or higher oxidation rates in site one. The CH₄ flux ranged from 9.8 x 10⁻² and 5.3 x 10⁻¹ m³/m².h and CO₂ varied from 6.6 x 10⁻² to 3.9 x 10⁻¹ m³/m².h. In the upper berm, there was another pattern, since the CO₂ flux (2.0 x 10⁻¹ - 3.3 x 10⁻¹ m³/m².h) was greater than that of CH₄ (6.6 x 10⁻² and 2.6 x 10⁻¹ m³/m².h). Gas concentration profiles had significant variability in short distances of cover soil. In addition, the solid wastes under the lower berm seem to be in degradation phase 4 (methanogenic) while the wastes under the upper berm seem to be in degradation phase 3 (acidogenic).

Keywords: Landfill, Cover layer, Gas flow.

1. INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários apresentam-se como significativas fontes emissoras de Gases de Efeito Estufa (GEE), especialmente metano e dióxido de carbono (MENDES, 2005). Tais gases escapam para a atmosfera durante o preenchimento do aterro, por processos de percolação nas camadas de cobertura e através do sistema de drenagem passiva (SANTOS, 2012). Estima-se que, entre os anos de 2010 e 2030, aproximadamente 13% das emissões antropogênicas globais de GEE serão provenientes dos aterros sanitários (USEPA, 2014).

No contexto ambiental e técnico dos aterros sanitários, a camada de cobertura final tem como função isolar a massa de resíduos do ambiente externo e controlar o fluxo (percolação, emissão e retenção) de gases (SILVA et al., 2013). Além disso, conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (2000), o sistema de cobertura tem a função de eliminar a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de líquidos percolados, impedir a catação, permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro e eliminar a queima de resíduos.

Jucá et al. (2009) citam 04 tipos principais de camadas de cobertura (convencionais, barreira capilar simples, barreira capilar dupla, evapotranspirativa). No caso brasileiro, a maior parte dos aterros sanitários utiliza o sistema convencional já que há possibilidade de extração do material de cobertura na própria área do aterro ou nas proximidades, além do baixo custo desse tipo de material quando comparado, por exemplo, as geomembranas.

Alguns autores (MACIEL et al., 2009; OLIVEIRA, 2011) apontam que a percolação de gases em aterros sanitários poderá ocorrer em diferentes direções, sentidos e intensidades, variando conforme a existência (ou não) de caminhos preferenciais, além das características da camada de cobertura (compactação, fissuras), da composição e pressão do biogás imediatamente abaixo da camada.

As emissões de gases por processos de percolação nas camadas de cobertura parecem representar um problema comum à maior parte dos países, conforme as pesquisas de Huber-Humer e Lechner (1999) na Áustria; Park e Shin (2001) na Coreia do Sul; Laurila et al. (2006) na Finlândia; Milke, Holman e Khire (2006) na Nova Zelândia; Stern et al. (2007) nos Estados Unidos; Scheutz et al. (2008) na França; Johnsson (2010) na Suécia; Capaccioni et al. (2011) na Itália.

No Brasil, estudos sobre essas emissões (MACIEL, 2003; GUEDES, 2007; FERNANDES, 2009; BERTO NETO, 2009, SANTOS, 2012, DE OLIVEIRA, 2013) apontam para fluxos que variam em função de diversos fatores: tipo de área de disposição, características físicas dos solos aplicados nas camadas, forma de compactação dos resíduos, idade dos resíduos, estação do ano, horário de medição, altura das camadas de resíduos, questões de pressão e temperatura interna-externa do aterro etc.

No Estado do Ceará existem 06 aterros sanitários (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS, 2016), sendo que o maior deles fica na Região Metropolitana de Fortaleza: o aterro sanitário de Caucaia, com 123 hectares. O equipamento, que atualmente tem um projeto de aproveitamento do gás metano (aproximadamente 6.000 m³/hora), não possui um sistema de diagnóstico e monitoramento das emissões (perdas) de gases pela cobertura, o que motivou a realização dessa pesquisa.

A quantificação das emissões fugitivas (ou perdas) de gases pela cobertura dos aterros sanitários é um importante parâmetro a ser monitorado quando se pretende implantar (ou aprimorar) sistemas de aproveitamento energético, servindo ainda para avaliar a eficiência da camada e do

sistema de drenagem (MOREIRA, 2018), além de permitir o controle ambiental desses empreendimentos (MACIEL et al., 2009).

2. OBJETIVO

Avaliar o comportamento do fluxo de gases (CH_4 e CO_2) pela camada de cobertura de um aterro sanitário do Estado do Ceará.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido no Aterro Sanitário de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza. A Figura 1 mostra o local onde os ensaios foram realizados no contexto da área do Aterro.

Figura 1. Limites do Aterro Sanitário de Caucaia (em amarelo) e localização da área pesquisada (em azul)



A área pesquisada tinha 929m^2 e 125m de perímetro. Foi composta por duas bermas e um talude. Seus limites são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Coordenadas geográficas dos limites da área pesquisada

Pontos	Latitude (S)	Longitude (O)
A	3°47.632'	38°40.308'
B	3°47.625'	38°40.298'
C	3°47.615'	38°40.321'
D	3°47.608'	38°40.310'

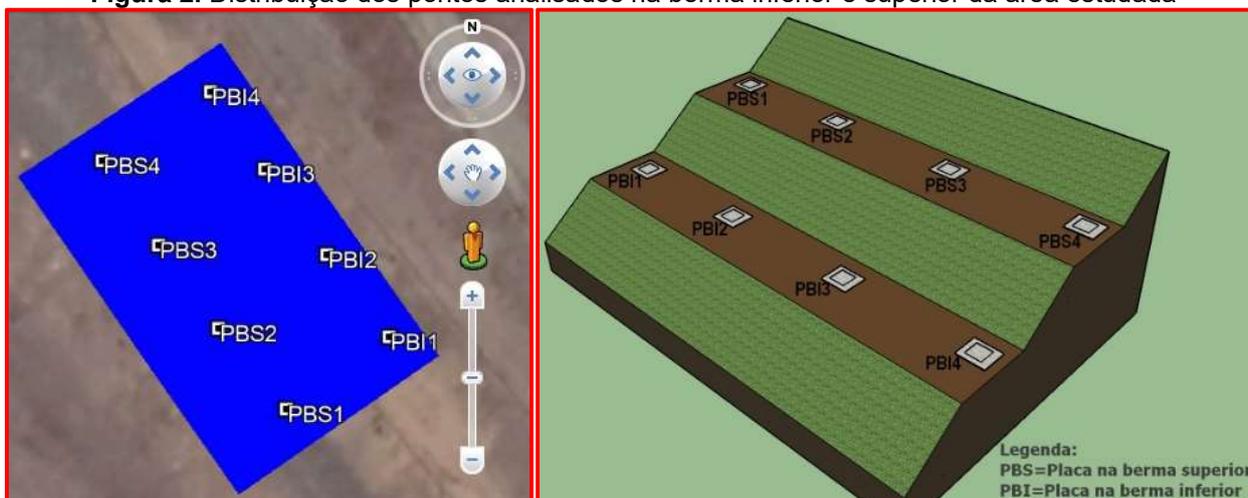
Foram escolhidos 08 pontos da camada de cobertura para medição dos fluxos de gases, sendo 04 na berma inferior e 04 na berma superior. A distância entre tais pontos variou entre $9,37$ e $13,17\text{m}$. A localização exata dos pontos é mostrada na Tabela 2. A distribuição aproximada dos pontos é mostrada na Figura 2

Tabela 2. Coordenadas geográficas dos pontos monitorados nas bermas

Berma	Pontos	Latitude (S)	Longitude (O)
Inferior	PBI 1	3°47.624'	38°40.300'
	PBI 2	3°47.619'	38°40.304'
	PBI 3	3°47.615'	38°40.307'
	PBI 4	3°47.611'	38°40.310'
Superior	PBS 1	3°47.628'	38°40.306'
	PBS 2	3°47.623'	38°40.310'
	PBS 3	3°47.619'	38°40.313'
	PBS 4	3°47.614'	38°40.316'

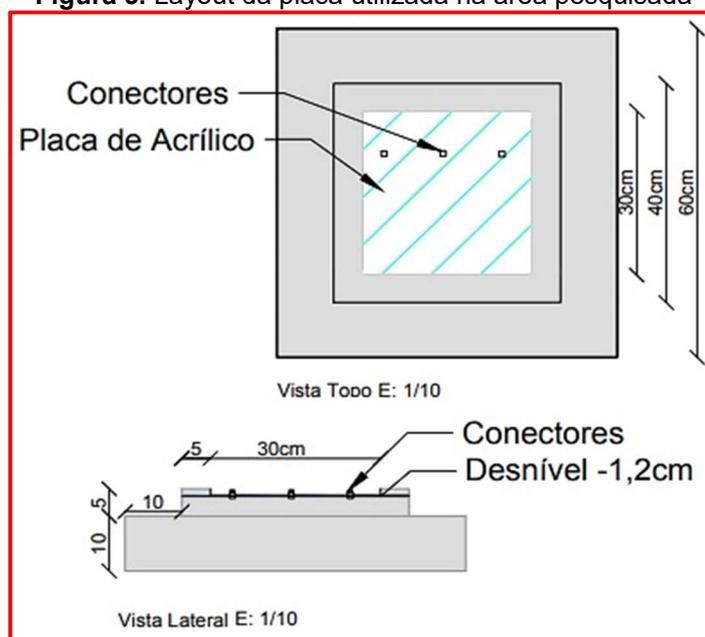
PBI = Ponto na Berma Inferior, PBS = Ponto na Berma Superior

Figura 2. Distribuição dos pontos analisados na berma inferior e superior da área estudada



As estimativas das emissões de gases pela camada de cobertura foram realizadas por meio de ensaios com placa de fluxo estático. Foi confeccionada 01 placa em resina acrílica (da marca Corian® Dupont™) em forma de degrau (esse material é resistente, impermeável e sem emendas). Na parte superior da placa foi fixada uma peça quadrada de acrílico transparente (de 8 mm) com 3 conectores (do tipo engate rápido) nas exatas especificações do leitor de gás GEM5000 (Figura 3).

Figura 3. Layout da placa utilizada na área pesquisada



A placa confeccionada seguiu uma adaptação do modelo proposto por Santos (2012), tendo volume de 0,007 m³ e área útil de 0,16 m². Para fixação da placa na camada de cobertura realizou-se a marcação do seu perímetro no solo, escavação manual pelas laterais externas da placa, colocação da placa sobre a área escavada e reposição do solo manualmente. Após esse procedimento, a placa foi conectada (Figura 4) ao GEM5000, que permitia a leitura da concentração de oxigênio (%), monóxido de carbono (ppm), dióxido de carbono (%), metano (%) e gás sulfídrico (%). Além disso, permitia a leitura da temperatura (°C), pressão (mb) e do fluxo de gases (m³/h). Os resultados das leituras foram anotados em um diário de campo e depois trabalhados no programa Excel (Windows 10). O GEM5000 foi programado para analisar a

concentração dos gases durante 120 segundos (01 ciclo) e entre as leituras realizou-se uma “purga” de 15 segundos no equipamento (leitura ao ar livre para limpeza). O trabalho de campo durou 09 campanhas entre 18/12/2018 e 25/01/2019, sempre no turno da manhã.

Figura 4. Vista da placa instalada sobre a camada de cobertura e conectada ao GEM5000



O fluxo do gás foi calculado por meio de uma expressão conhecida na literatura referente a estudos sobre a emissão em camadas de cobertura (PARK e SHIN, 2001; HEDGE; CHAN; YANG, 2003; ABICHOU et al., 2006; STERN et al., 2007; SCHEUTZ et al., 2008; XU; TOWNSEND; REINHART, 2010; CAPACCIONI et al., 2011; SANTOS, 2012):

$$J = \frac{V_p \cdot \rho_{\text{gás}} \cdot \Delta C}{A \cdot \Delta t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, J = fluxo do gás expresso em Kg/m².s; V_p = volume útil da placa de fluxo (0,007 m³); A = área de solo coberta pela placa (0,16 m²); ρ_{gás} = densidade do gás a determinada temperatura (Kg/m³); ΔC/Δt = variação da concentração do gás (%) com o tempo (s). A densidade dos gases CH₄ e CO₂ foi corrigida em função das leituras de temperatura interna da placa através das seguintes expressões:

$$\rho_{\text{CH}_4}(t) = \frac{\rho_{\text{CH}_4}(0^\circ\text{C}) \cdot 273}{(273 + t)}$$

$$\rho_{\text{CH}_4}(t) = \frac{\rho_{\text{CH}_4}(t) \cdot \text{PM}_{\text{CO}_2}}{\text{PM}_{\text{CH}_4}}$$

Onde, ρ_{CH₄}(t) = densidade do metano em função da temperatura (t) em °C; ρ_{CH₄}(0°C) = 0,716 kg/m³; ρ_{CO₂}(t) = densidade do dióxido de carbono em função da temperatura (t) em °C; PM_{CH₄} = peso molecular do metano (16), PM_{CO₂} = peso molecular do dióxido de carbono (44).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações de CH₄ que percolam pelo solo da camada da berma inferior variaram entre 0,1 e 4,2% e as de CO₂ entre 0,7 e 2,9%, conforme Tabela 3. Esses dados mostram que os perfis de concentração tiveram significativa variabilidade em curtas distâncias do solo de cobertura; conclusão semelhante à realizada por Schroth et al. (2012) e Röwer et al. (2011).

Para os dois gases analisados, as maiores concentrações foram observadas nos pontos do solo mais próximos ao “centro” da berma inferior (PBI2 e PBI3), podendo ter relação com o volume de gás (pressão) armazenado sob esses locais e/ou com algumas características do solo (granulometria, permeabilidade, compactação) que sabidamente influenciam nas fugas (ou retenções). Conforme Vigneault, Lefebvre e Nastev (2004), as propriedades físicas do solo (densidade, porosidade, saturação, permeabilidade) influenciam em grande parte nas taxas de migração de gás.

Tabela 3. Concentração de CH₄ e CO₂ nos pontos da berma inferior e superior

Local	CH ₄ (%)		CO ₂ (%)	
	1ª Leitura	2ª Leitura	1ª Leitura	2ª Leitura
PBI1	0,1	0,3	0,7	0,8
PBI2	3,6	4,2	2,5	2,9
PBI3	1,9	2,6	1,6	2,1
PBI4	0,2	1,0	1,1	1,7
PBS1	0,1	0,2	0,8	1,1
PBS2	0,1	0,3	0,7	1,1
PBS3	0,2	0,4	0,6	0,9
PBS4	0,1	0,5	0,8	1,3

PBI = Ponto na Berma Inferior, PBS = Ponto na Berma Superior

Na berma superior, as concentrações de CH₄ variaram entre 0,1 e 0,5% e as de CO₂ entre 0,6 e 1,3%, mostrando menor dispersão entre os dados (menor desvio padrão) quando comparada com os resultados da berma inferior (onde foi observado maior desvio padrão). Os resultados da granulometria (Tabela 4) dos solos dessa berma (obtidos em uma pesquisa paralela realizada pela equipe) mostraram maior presença de argila (30%), areia fina (29%) e menor presença de pedregulho (2%) em comparação com o solo da berma inferior, o que ajuda a entender a menor saída de gases. Para Röwer et al. (2011) as propriedades do solo determinam os padrões de fluxo de gás. Conforme Moreira (2018) a predominância de materiais finos no solo preenche os vazios decorrentes das partículas maiores, principalmente quando o solo é bem compactado, contribuindo para a formação de uma barreira mais eficiente à passagem de gases pela camada.

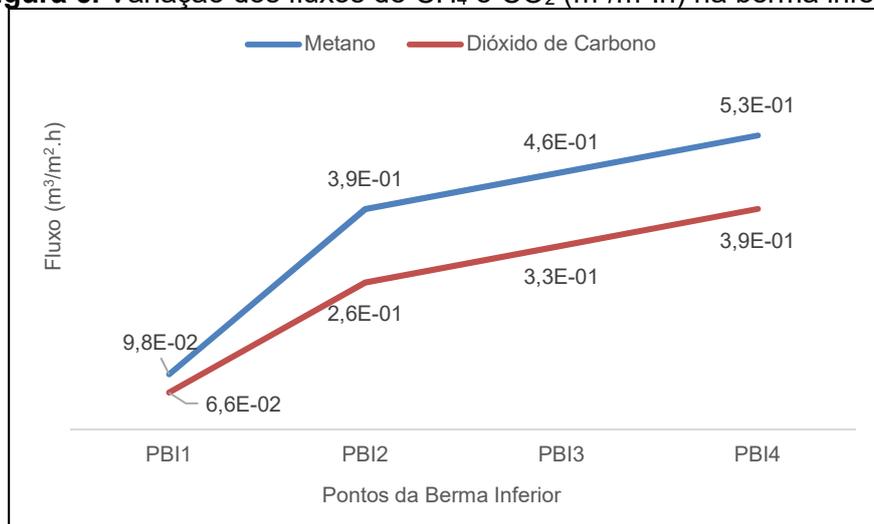
Tabela 4. Composição granulométrica dos solos das bermas estudadas

Componente	Tamanho (mm)	RESULTADOS (%)	
		Berma Inferior	Berma Superior
Pedregulho	> 4,8	16	2
Areia grossa	2,00 - 4,8	5	7
Areia média	0,42 - 2,00	13	13
Areia fina	0,074 - 0,42	41	29
Silte	0,005 - 0,074	19	19
Argila	< 0,005	6	30

Com relação aos fluxos, que dependem da variação da concentração dos gases conforme a Equação 1, observou-se clara tendência de aumento do Ponto 1 para o Ponto 4 para os dois gases na berma inferior (Figura 5), podendo indicar a existência de caminhos preferenciais ou taxas de oxidação maiores no PBI 1. Na hipótese de Chanton et al. (2011), que estudaram dois aterros sanitários do sudeste dos Estados Unidos, locais com baixa emissão de CH₄ devem ter altas taxas de oxidação desse gás, mas a porcentagem de oxidação não é constante; varia em função do tipo de cobertura, condições climáticas e carga de CH₄ logo abaixo da camada de cobertura. Depende também da temperatura do solo (HÉROUX; GUY; MILLETTE, 2010).

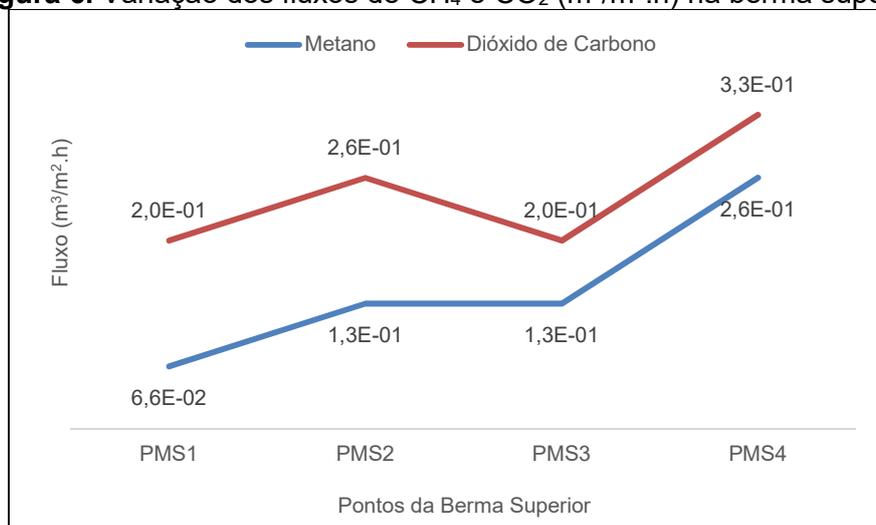
Como se observa, o fluxo de CH₄ variou entre $9,8 \times 10^{-2}$ e $5,3 \times 10^{-1}$ m³/m².h e o de CO₂ variou entre $6,6 \times 10^{-2}$ e $3,9 \times 10^{-1}$ m³/m².h na berma inferior. Esses dados também indicam que os resíduos sólidos sob a berma inferior, provavelmente, estão na fase de degradação 4 (metanogênica). Nessa fase, predominam microrganismos estritamente anaeróbios que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH₄ e CO₂. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida.

Figura 5. Variação dos fluxos de CH₄ e CO₂ (m³/m².h) na berma inferior



A berma superior teve outro comportamento, pois o fluxo de CO₂ ($2,0 \times 10^{-1}$ - $3,3 \times 10^{-1}$ m³/m².h) foi maior que o de CH₄ ($6,6 \times 10^{-2}$ e $2,6 \times 10^{-1}$ m³/m².h), Figura 6. Esses dados indicam que os resíduos ali depositados, provavelmente, estão na fase de degradação 3 (acidogênica). Nessa fase, há conversão microbiológica dos compostos da etapa anterior em compostos com baixa massa molecular, como o ácido acético. O dióxido de carbono é o principal gás gerado e também serão produzidas quantidades menores de hidrogênio. Outro argumento sobre a fase acidogênica é que os resíduos dessa berma estão mais próximos da superfície (topo do aterro sanitário) e sob maior influência do ambiente externo (ventos, temperatura, pressão, grande quantidade de oxigênio), pois foram recém aterrados.

Figura 6. Variação dos fluxos de CH₄ e CO₂ (m³/m².h) na berma superior



Conforme Vigneault, Lefebvre e Nastev (2004) os fluxos de gases pela cobertura de um aterro sanitário também mantem relação com a densidade de cada gás: o metano é mais leve que o ar, com uma densidade de $0,7 \text{ kg/m}^3$ a 10°C enquanto o dióxido de carbono é um gás mais denso ($1,9 \text{ kg/m}^3$) e bastante solúvel em água. A densidade de CH_4 é afetada pelo calor e por efeitos espectroscópicos devido a mudanças de temperatura, pressão e vapor de água (Xu et al. 2014).

Cabe ainda destacar que o movimento de gases em meios porosos ocorre por dois mecanismos de transporte principais: fluxo advectivo e fluxo difusivo. No fluxo difusivo, o gás se move em resposta a um gradiente de concentração. No fluxo advectivo, o gás se move em resposta a um gradiente na pressão total. No contexto dos aterros, a principal força motriz da migração de gás, especialmente por meio de sistemas de cobertura, é o fluxo advectivo (BOUAZZA; KAVAZANJIAN, 2001). Ainda segundo os autores, a elevação do lixiviado ou lençol freático e gradientes de temperatura também podem dar origem a diferenças de pressão e levar à migração de gás.

Os resultados obtidos nessa pesquisa indicam que as perdas de gases pela cobertura no aterro sanitário estão aumentando ao longo do tempo, pois Santos (2012) mediu fluxos menores de CH_4 (média de $1,4 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$) e de CO_2 (média de $2,6 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$). Isso indica a defasagem da camada de cobertura ao longo do tempo; mesma conclusão feita por De Oliveira (2013), que estudou as emissões de biogás em uma célula experimental (controlada) no antigo aterro sanitário da Muribeca-PE.

5. CONCLUSÃO

A heterogeneidade do aterro pode contribuir para o entendimento dos fluxos de gases, uma vez que cada ponto apresentou uma emissão particular para os dois gases estudados; corroborando com o entendimento de que o fluxo varia de aterro para aterro, e dentro do mesmo aterro sanitário.

De certo modo, os fluxos mantiveram relação com a granulometria do solo (menor fluxo em solos mais finos), mas o completo entendimento dessa relação só é possível com a determinação de outras variáveis que não foram objeto dessa pesquisa.

A qualidade dos gases emitidos pela cobertura do aterro indica, indiretamente, a fase de degradação dos resíduos aterrados, mais deve-se considerar também a influência de outros processos (oxidação, por exemplo) que ocorrem no interior da camada de cobertura nesse tipo de interpretação.

Esses resultados preliminares devem contribuir para a implantação de um programa de diagnóstico, monitoramento e mitigação dessas emissões, permitindo aprimorar o atual sistema de aproveitamento energético de metano existente no Aterro de Caucaia.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as empresas GNR Fortaleza e Marquise pelo financiamento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABICHOU et al. Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. **Waste Management**, v.26, n.11, p.1305-1312, jan., 2006.

BERTO NETO, J. **Medidas da emissão de gases em oito aterros de resíduos sólidos urbanos do estado de São Paulo - Brasil**. 2009. 588p. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Paulo, 2009.

BOUAZZA, A.; KAVAZANJIAN, E. Construction on former landfills. In: 2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics, **Proceedings...**Newcastle, p.467-482, 2001.

CAPACCIONI et al. Effects of a temporary HDPE cover on landfill gas emissions: multiyear evaluation with the static chamber approach at an Italian landfill. **Waste Management**, v.31, n.5, p.956-965, mai., 2011.

CHANTON et al. Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils. **Waste Management**, v.31, n.5, p.914-925, may., 2011.

DE OLIVEIRA, L. R. G. **Estudo das emissões de biogás em camada de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 106p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. 2009. 116p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GUEDES, V. P. **Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 117p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HEDGE, U.; CHAN, T.; YANG, S. Methane and carbon dioxide emissions from Shan-Chuku landfill site in northern Taiwan. **Chemosphere**, v.52, n.8, p.1275-1285, sep., 2003.

HÉROUX, M.; GUY, C.; MILLETTE, D. A Statistical Model for Landfill Surface Emissions. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v.60, n.2, p.219-228, 2010.

HUBER-HUMER, M.; LECHNER, P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. **Waste Management**, v.17, n.6, p.443-452, dec., 1999.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT, 2ª ed., 2000.

JOHANSSON, E. **Correlation between methane concentration and emission from old landfills in Sweden**. 2010. 71p. Thesis (Master Environmental Engineering). Sweden: Lund University, 2010.

JUCÁ et al. Tratamentos não convencionais: estudos iniciais em barreiras, banhados e camadas de cobertura superficial. In: Gomes, L. P. (Coord.) **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2009.

LAURILA et al. Methane emissions from three different kinds of landfills measured by the micrometeorological eddy-covariance method. In: Intercontinental Landfill Research Symposium, 4., **Abstract...** Sweden, 2006.

MACIEL et al. **Recuperação de Biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - Projeto Piloto da Muribeca**. In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 5., **Anais...** ANEEL, Belém, 2009.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. 173p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá.** 2005. 179p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

MILKE, M. W.; HOLMAM, L.; KHIRE, M. Use of gas flux measurements to infer well capture effectiveness. In: In: Intercontinental Landfill Research Symposium, 4., **Abstract...** Sweden, 2006.

MOREIRA, F. G. dos S. **Emissões fugitivas de biogás em célula de aterro sanitário.** 2018. 90p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

OLIVEIRA, C. A. A. **Análises de gases na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC).** 2011. 97p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

PARK, J. W.; SHIN, H. C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. **Atmospheric Environment**, v.35, p.3445-3451, 2001.

RÖWER et al. Spatial variability of soil gas concentration and methane oxidation capacity in landfill covers. **Waste Management**, v.31, n.5, p.926-934, may., 2011.

SANTOS, G. O. **Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera.** 2012. 313p. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SCHEUTZ et al. Atmospheric emissions and attenuation of non-methane organic compounds in cover soils at a French landfill. **Waste Management**, v.28, n.11, p.1892-1908, nov., 2008.

SCHROTH et al. Above - and below - ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. **Waste Management**, v.32, n.5, p.879-889, may., 2012.

SILVA et al. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n.2, p.95-104, abr/jun, 2013.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA, Brasília, 2016.

STERN et al. Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. **Waste Management**, v.27, n.9, p.1248-1258, sep., 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases : 2010-2030. **National Service Center for Environmental Publications (NSCEP).** Washington, DC, USA, 2014.

VIGNEAULT, H.; LEFEBVRE, R.; NASTEV, M. Numerical Simulation of the Radius of Influence for Landfill Gas Wells. **Vadose Zone Journal**, v.3, p.909-916, 2004.

XU et al. Impact of Changes in Barometric Pressure on Landfill Methane Emission. **Global Biogeochemical Cycles**, v.28, n.7, p.679-695, 2014.

XU, Q.; TOWNSEND, T.; REINHART, D. Attenuation of hydrogen sulfide at construction and demolition debris landfills using alternative cover materials. **Waste Management**, v.30, n.4, p.660-666, apr., 2010.