

Monitoramento das emissões fugitivas de CH₄ e CO₂ em camadas de cobertura de um aterro sanitário do Estado do Ceará, Brasil

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do fluxo volumétrico ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$) de gases (CH₄ e CO₂) pela camada de cobertura final de uma célula de resíduos sólidos do Aterro Sanitário de Caucaia-Ceará. A primeira fase do monitoramento aconteceu no ano de 2012 e a segunda fase no ano de 2019, em 04 pontos da camada de cobertura. Foi utilizado um leitor de gases da marca *LANDTEC GEM5000* conectado em placas de fluxo estático. No ano de 2012, os fluxos volumétricos médios foram de $2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CH₄ e $3,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CO₂. Em 2019, esses fluxos aumentaram para $5,3 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CH₄ e $3,9 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CO₂, indicando redução da qualidade da camada de cobertura ao longo do tempo. Esses resultados indicaram também uma possível mudança na fase de digestão dos resíduos, já que houve uma inversão nos fluxos de CH₄ e CO₂ entre as campanhas do monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário. Camada de Cobertura. Fluxo de Gases.

Gemmelle Oliveira Santos
gemmelle@ifce.edu.br
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Francisco Carlos Henrique Pio de Oliveira
franciscocarlosipo@gmail.com
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Eliana Dantas Ribeiro
elianadr@hotmail.com
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Samara Castro Freire
sosamara505@gmail.com
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Roberto Antônio Cordeiro da Silva
roberto@det.ufc.br
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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, com 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 ainda no ano de 2012 e sua segunda campanha em 2019.

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).

O objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do fluxo volumétrico ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$) de gases (CH_4 e CO_2) pela camada de cobertura final de uma célula de resíduos sólidos do Aterro Sanitário de Caucaia-Ceará.

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 empreendimento.

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



Fonte: autores (2019)

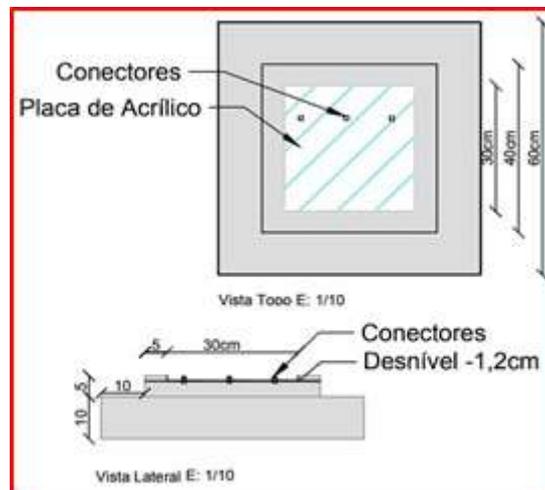
O Aterro Sanitário de Caucaia começou a operar em 1991, recebendo os resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no Município de Caucaia, e a partir de 1998, passou a receber os RSU de Fortaleza. A área total do aterro equivale a 123,20 hectares, sendo 78,47 ha destinados a disposição de resíduos; 32,15 ha de área de preservação ambiental; 7,04 ha de faixa de preservação de contorno; 3,19 ha de sistema viário interno; 2,35 ha de administração, urbanização e estacionamento. Em 2019, o Aterro Sanitário recebia aproximadamente 4.789 toneladas de RSU por dia, em fase final de operação.

A área reservada para a pesquisa tinha 929m^2 e 125m de perímetro. Foram escolhidos 04 pontos da camada de cobertura para medição dos fluxos de gases. A distância entre tais pontos variou aproximadamente 20 metros.

As estimativas das emissões de gases pela camada de cobertura foram realizadas por meio de ensaios com placa de fluxo estático. Foram confeccionadas 04 placas em resina acrílica (da marca Corian® Dupont™) em forma de degrau (esse material é resistente, impermeável e sem emendas).

Na parte superior de cada 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 gases da marca *LANDTEC GEM5000* (Figura 2).

Figura 2: Layout da placa utilizada na área pesquisada



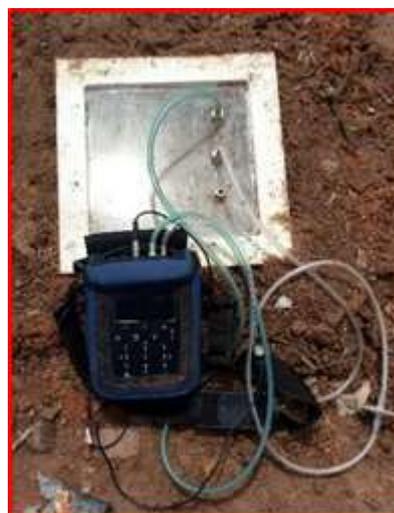
Fonte: autores (2019)

As placas confeccionadas seguiram uma adaptação do modelo proposto por Santos (2012), tendo volume de $0,007 \text{ m}^3$ e área útil de $0,16 \text{ m}^2$.

Para fixação de cada 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 3) ao leitor de gases da marca *LANDTEC GEM5000* (Figura 3), que permitia a leitura da concentração de dióxido de carbono (%), metano (%), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pressão (mb) e do fluxo de gases (m^3/h).

Figura 3: Vista da placa sobre a camada de cobertura e conectada ao *LANDTEC GEM5000*



Fonte: autores (2019)

O princípio de detecção do metano e do gás carbônico pelo equipamento é baseado na capacidade que esses gases têm de absorver radiação eletromagnética na faixa do infravermelho.

O equipamento é capaz de realizar medições de 0 a 100% (% em volume) de CH₄ e CO₂, com precisão típica de ± 0,3% para concentrações até 5%, de ± 1% para concentrações entre 5 e 15% e de ± 3% para concentrações maiores que 15%.

O equipamento da *LANDTEC 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). Tanto na primeira campanha (no ano de 2012) quanto na segunda campanha (em 2019), foram realizadas 09 visitas ao Aterro Sanitário, sempre no turno da manhã.

Os resultados das leituras foram anotados em um diário de campo e depois trabalhados no programa Excel (Windows 10).

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):

$$J = \frac{V_p \cdot \rho_{gás} \cdot \Delta C}{A \Delta t}$$

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:

$$\rho_{CH_4}(t) = \frac{\rho_{CH_4}(0^\circ C) \cdot 273}{(273 + t)}$$

$$\rho_{CH_4}(t) = \frac{\rho_{CH_4}(t) \cdot PM_{CO_2}}{PM_{CH_4}}$$

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).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações de CH₄ que percolaram pelo solo da camada de cobertura no ano de 2012 variaram entre 0,2 e 2,6% e as de CO₂ entre 0,4 e 0,6%. Já em 2019,

essas concentrações variaram entre 0,1 e 4,2% de CH₄ e entre 0,7 e 2,9% de CO₂. 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). Mostram também que os solos empregados nas camadas de cobertura alteram, com o passar do tempo, sua capacidade de controlar o fluxo (percolação, emissão e/ou retenção) de gases.

Para os dois gases analisados (e nas duas campanhas de monitoramento), as maiores concentrações foram observadas nos pontos do solo mais próximos ao “centro” da área pesquisada, podendo ter relação com o volume de gás (pressão) armazenado sob esse local 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.

Os resultados gerais das concentrações de CH₄ e CO₂ obtidos no ano de 2012 mostraram menor dispersão entre os dados (menor desvio padrão) quando comparados com os resultados da campanha de 2019 (maior desvio padrão), evidenciando, possivelmente, alguma influência do intemperismo sobre a composição granulométrica dos solos, grau de compactação ou índice de vazios. Em 2012, havia uma maior presença de argila (30%), areia fina (29%) e menor presença de pedregulho (2%) nas amostras do solo que nas amostras coletadas em 2019, 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.

Com relação aos fluxos, que dependem da variação da concentração dos gases conforme as equações mostradas, observou-se clara tendência de aumento da campanha realizada em 2012 para a de 2019, podendo indicar o surgimento de caminhos preferenciais ou de taxas de oxidação maiores em 2012.

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).

No ano de 2012, os fluxos volumétricos médios foram de $2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CH₄ e $3,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CO₂. Em 2019, esses fluxos aumentaram para $5,3 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CH₄ e $3,9 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de CO₂, indicando, entre tantas possibilidades discutidas na literatura, redução da qualidade da camada de cobertura ao longo do tempo.

Esses resultados indicaram também uma possível mudança na fase de digestão dos resíduos, já que houve uma inversão nos fluxos de CH₄ e CO₂ entre as duas campanhas do monitoramento. Provavelmente, em 2012, os resíduos estavam 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) e passaram para a fase 4 (metanogênica) em 2019 (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).

Conforme Vigneault, Lefebvre e Nastev (2004) os fluxos de gases pela cobertura de um aterro sanitário também mantém relação com a densidade de cada gás: o metano é mais leve que o ar enquanto o dióxido de carbono é um gás mais denso e bastante solúvel em água. A densidade de CH₄ 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.

Ainda sobre o fluxo de gases, cabe destacar:

- (I) As características geotécnicas do solo empregado na cobertura de um aterro permitem a criação de múltiplos cenários de emissão ou retenção, ou seja, se o solo estiver mais compactado numa determinada área em relação à outra, deverá existir um menor índice de vazios com menor fuga dos gases;
- (II) Se os materiais de cobertura forem escolhidos com maior rigor (solos argilosos são melhores que solos arenosos devido à coesão entre as partículas) e a espessura da camada de cobertura atender às recomendações das normas (maior que 60 cm), espera-se que o aterro retenha um volume maior de gases;
- (III) As pressões dos gases no interior do aterro tendem a aumentar com a profundidade da massa de RSU e a tendência natural desses gases é escapar para a atmosfera, seja pela cobertura, seja pelas laterais do aterro. Assim, um mesmo aterro pode apresentar áreas com maior ou menor fluxo;
- (IV) A idade dos resíduos também deve ser considerada em estudos sobre gases: aterros "novos" tendem a emitir um maior volume de gás quando comparados a aterros "velhos", especialmente em função da degradação dos resíduos classificados como facilmente degradáveis, sendo que a recirculação do chorume potencializa a produção de gás nas duas situações;
- (V) As condições climáticas de uma região influem no volume e na qualidade do gás emitido pelo aterro, já que as águas pluviais que caem sobre a área e a porção que infiltra na massa de resíduos distribui umidade, nutrientes e microrganismos, aumentando as reações de

degradação e potencializando a geração de gás. Da mesma forma, baixa umidade implica em um processo de digestão mais lento com menor geração de gás.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que:

- As concentrações (%) do CH₄ e CO₂ na área estudada foram proporcionais às características dos RSU estudados, ao tempo de aterramento, à quantidade de RSU e altura da célula, tanto na primeira quanto na segunda campanha, sendo que a concentração do gás CH₄ teve um crescimento mais regular (menor desvio padrão) que a concentração de CO₂.
- No ensaio de placa, o acúmulo nas concentrações (%) do CH₄ e CO₂ foram maiores no turno da tarde, sugerindo relação com o aumento da temperatura.
- A heterogeneidade do aterro ajuda no 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 “idade” do aterro, 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 Sanitário de Caucaia.

Monitoring of fugitive CH₄ and CO₂ emissions on cover layers of a landfill in the State of Ceará, Brazil

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the behavior of the volumetric flow ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$) of gases (CH₄ and CO₂) through the final cover layer of a solid waste cell of the Caucaia landfill, located in the state of Ceará, Brazil. The first monitoring stage was conducted in 2012 and the second one in 2019, both on 4 points of the cover layer. A LANDTEC GEM5000 gas reader connected to static flow plates was used. In 2012, the average volumetric flows were $2.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ of CH₄ and $3.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ of CO₂. In 2019, these flows increased to $5.3 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ of CH₄ and $3.9 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ of CO₂, pointing to a reduction in the quality of the cover layer over time. These results also indicate a possible change in the waste digestion phase, as there was an inversion in the CH₄ and CO₂ flows between the two monitoring campaigns.

KEYWORDS: Landfill. Cover Layer. Gas flow.

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.

Recebido: 03/03/2020

Aprovado: 09/04/2020

DOI: 10.3895/rts.v16n41.11720

Como citar: SANTOS, G.O.; *et al.* Monitoramento das emissões fugitivas de CH₄ e CO₂ em camadas de cobertura de um aterro sanitário do Estado do Ceará, Brasil. **R. Technol. Soc.**, Curitiba, v.16, n.41, p. 190-201, Ed. Especial. 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/11720>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

