**OXIDAÇÃO PASSIVA DE METANO EM CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS
SANITÁRIOS: UMA REVISÃO**

Erivelton César Stroparo (*), Yankha Myllena da Silva Van Tienen, Matheus Victor Diniz Gueri, Waldir Nagel Schirmer

* Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). E-mail: stroparo.erivelton@gmail.com

RESUMO

O aterro sanitário é uma importante fonte antropogênica de metano devido aos sistemas inadequados de coleta de biogás e emissões fugitivas pela camada de cobertura. Para mitigar as emissões de biogás, pode-se adotar camadas alternativas que favoreçam a oxidação passiva de metano. Nesse sentido, o presente trabalho consistiu em realizar uma breve revisão bibliográfica reportando as melhores condições físico-químicas da camada de cobertura para otimizar a atividade das bactérias metanotróficas e, conseqüentemente, aumentar as eficiências de oxidação de metano. Na literatura é reportado que os microrganismos necessitam de: um período de adaptação (aclimação); concentração de metano como fonte de carbono; concentração suficiente de oxigênio; teor de umidade equilibrado; porosidade do solo ideal para promover a permeabilidade do oxigênio atmosférico e biogás; temperaturas mesófilas para auxiliar no crescimento dos microrganismos, disponibilidade de oxigênio, difusão dos gases e umidade; pH próximo à neutralidade; e nutrientes para a biomassa metanotrófica. Além disso, a vegetação auxilia na oxidação biológica, pois a rizosfera favorece o desenvolvimento das bactérias metanotróficas, formação de macroporos que auxiliam na difusão dos gases e aumento da evapotranspiração. Pode-se concluir que a oxidação biológica é uma alternativa viável para redução das emissões fugitivas de metano em camadas de cobertura de aterros sanitários, principalmente de pequeno e médio portes e encerrados, onde a recuperação do biogás não é economicamente viável.

PALAVRAS-CHAVE: emissões fugitivas, gases de efeito estufa, poluição atmosférica, resíduo sólido municipal.

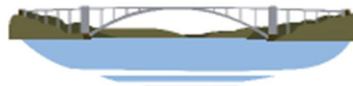
ABSTRACT

The landfill is an important anthropogenic source of methane due to inadequate biogas collection systems and fugitive emissions by the cover layer. To mitigate landfill biogas emissions, we can adopt alternative substrates that favor the passive oxidation of methane. In this sense, the present work provides an overview reporting the best physicochemical conditions of the cover layer to optimize the activity of methanotrophic bacteria and, consequently, increase the methane oxidation efficiencies. Literature reports the microorganisms need: a period of adaptation (acclimatization); methane concentration as a carbon source; sufficient concentration of oxygen; balanced moisture content; soil porosity ideal to promote the permeability of atmospheric oxygen and biogas; mesophilic temperatures to help in the growth of microorganisms, oxygen availability, gas diffusion and moisture; pH close to neutrality; and nutrients for methanotrophic biomass. In addition, the vegetation assists in biological oxidation, because the rhizosphere favors the development of methanotrophic bacteria, macropores formation that assists in the diffusion of gases and increased evapotranspiration. It can be concluded that biological oxidation is a viable alternative to reduce fugitive emissions of methane in layers of landfill cover, mainly small and medium-sized and closed, where the biogas recovery is not economically viable.

KEY WORDS: atmospheric pollution, fugitive emissions, greenhouse gases, municipal solid wastes.

INTRODUÇÃO

O metano é um dos principais gases de efeito estufa (GEE) liberados para a atmosfera a partir de fontes naturais e antropogênicas; dentre as fontes antropogênicas, destacam-se os aterros sanitários, sendo a terceira maior fonte mundial (HUMER e LECHNER, 1999; ROSE, MAHLER E IZZO, 2012). Os resíduos dispostos em aterros sanitários são degradados de forma aeróbia e anaeróbia; como resultado, tem-se a formação do biogás, composto principalmente de metano (50 a 60%), dióxido de carbono (40 a 50%) e concentrações residuais de inúmeros compostos em nível de traço (MARIANO, 2008; SPOKAS *et al.*, 2006). Embora existam tecnologias para minimizar as emissões de biogás e utilizar o metano para abastecer caldeiras industriais ou comerciais, gerar eletricidade no local e/ou produzir gás natural (SPOKAS *et al.*, 2006), sabe-se que tais medidas de controle podem não ser economicamente viáveis em aterros sanitários de pequeno porte e/ou antigos, pois a emissão de biogás é insuficiente para adotar métodos de recuperação energética ou não há um sistema adequado de coleta de gás (CAO e STASZEWSKA, 2013; HUBER-HUMER, RÖDER e LECHNER, 2009).



De modo a evitar ou, pelo menos, minimizar o escape de biogás para a atmosfera, é necessária a utilização de sistemas de recobrimento (diário e final) em aterros sanitários (CAPANEMA e CABRAL, 2012; MARIANO, 2008). Contudo, mesmo com o sistema de cobertura convencional, há sempre certa quantidade de biogás que escapa pela camada de cobertura na forma de emissões fugitivas (AIT-BENICHOU *et al.*, 2009). Tal fato é reportado por Mariano e Jucá (2010) que monitoraram um aterro sanitário brasileiro, obtendo emissões pela camada de cobertura correspondentes a 22% do total das emissões de metano do aterro; os autores ainda justificam que estas emissões fugitivas estão relacionadas a fatores como propriedades da camada de cobertura (característica geotécnicas do solo, espessura, grau de compactação, grau de permeabilidade à água e ao ar, etc.), idade do resíduo e aspectos climáticos. Além disso, também ocorrem emissões fugitivas de biogás pelo próprio sistema de coleta de gás, uma vez que este não é 100% eficiente (HUBER-HUMER, GEBERT e HILGE, 2008).

A oxidação biológica do biogás na camada de cobertura é uma forma de mitigação de emissões dessa natureza, sendo uma alternativa de baixo custo (HUMER e LECHNER, 1999). Para alcançar este objetivo, deve-se utilizar materiais que forneçam condições adequadas para o desenvolvimento das bactérias metanotróficas (AIT-BENICHOU *et al.*, 2009) que são microrganismos aeróbios capazes de oxidar metano em dióxido de carbono, água e biomassa (MAJDINASAB e YUAN, 2017; MARIANO, 2008). As emissões fugitivas podem ser praticamente nulas se a cobertura do aterro for bem projetada, construída e monitorada para a oxidação biológica (CAO e STASZEWSKA, 2013; LOPES *et al.*, 2010). Neste sentido, o desenvolvimento de projetos que contemplem a mitigação das emissões de gases em aterros sanitários é fundamental, não somente para a redução de efeitos relacionados ao meio ambiente (efeito estufa), mas também voltadas à saúde e segurança dos operadores de aterros sanitário (odores e toxicidade).

TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DE METANO EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

As camadas de cobertura de aterros sanitários são formadas de dois tipos: camada convencional, confeccionadas por solos argilosos compactado e geossintéticos, e camada alternativa, formada a partir de solos e outros materiais como composto, lodo, pneus triturados, resíduos de construção civil, resíduos industriais de papel, camadas evapotranspirativas, barreiras capilares e entre outros (MARIANO, 2008; ROSE, MAHLER e IZZO, 2012). As camadas alternativas melhoram o controle das emissões de gases e infiltração de água, além disso, é uma técnica de baixo custo (LOPES *et al.*, 2010).

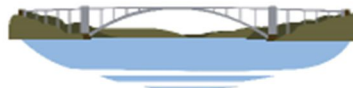
As técnicas disponíveis para a mitigação de biogás na camada de cobertura de aterros sanitários incluem sistemas de biorrecobrimento, biofiltro, biojanelas e biomantas (HUBER-HUMER, GEBERT e HILGE, 2008; MAJDINASAB e YUAN, 2017). Esses sistemas constituem-se técnicas viáveis para aterros sanitários de pequeno porte e/ou com atividades encerradas que possuem baixa produção de biogás (MAJDINASAB e YUAN, 2017; HUBER-HUMER, RÖDER e LECHNER, 2009).

Estes sistemas de bio-engenharia são baseados na atividade das bactérias metanotróficas, por isso, vários fatores bióticos e abióticos podem interferir no crescimento e desenvolvimento destes microrganismos, como umidade (grau de saturação do solo), temperatura, teor de matéria orgânica do solo, nutrientes, pH, textura do solo, oxigênio atmosférico e presença de vegetação na superfície (AIT-BENICHOU *et al.*, 2009; CAPANEMA e CABRAL, 2012; HUMER e LECHNER, 1999; MAJDINASAB e YUAN, 2017). Para obter algumas dessas condições, muitos trabalhos reportados na literatura (AIT-BENICHOU *et al.*, 2009; CAPANEMA e CABRAL, 2012; ROSE, MAHLER e IZZO, 2012) utilizam camadas alternativas com diferentes substratos agregado do solo de aterro para aumentar a oxidação passiva do metano.

FATORES INTERVENIENTES NA OXIDAÇÃO DO METANO EM SISTEMAS DE BIORRECOBRIMENTO

ACLIMATAÇÃO

Estudos demonstram que é necessário um período de adaptação (aclimatação) para os microrganismos. Ait-Benichou *et al.* (2009) realizaram um estudo em um aterro canadense e observaram, a partir da contagem de bactérias metanotróficas, três fases: na primeira (adaptação), os números variaram ao longo do tempo; na segunda (crescimento) o número aumentou significativamente e atingiu o valor máximo; e, na terceira (morte), houve uma redução do número em todas as profundidades analisadas. Outro fator importante na aclimatação dos microrganismos é a utilização de substratos agregados ao solo. Rose, Mahler e Izzo (2012) analisaram a taxa de oxidação de metano acumulada em função do tempo para três condições: solo do aterro, composto de resíduos sólidos urbanos e mistura (solo + composto); o composto atingiu mais rapidamente a fase estacionária, os autores justificaram que este resultado está relacionado ao fato de os microrganismos já estarem aclimatados e ativos em substratos enriquecidos.



CONCENTRAÇÕES DE METANO E OXIGÊNIO

A taxa de oxidação de metano é proporcional às concentrações de metano e oxigênio, uma vez que as bactérias metanotróficas são aeróbias (CAO e STASZEWSKA, 2013). Ait-Benichou *et al.* (2009) observaram uma diminuição no número de bactérias metanotróficas com o aumento da profundidade de amostragem, desta forma, as bactérias se concentraram nas camadas superficiais. Os autores justificam que este resultado está associado à concentração de oxigênio, pois na superfície da camada há o suprimento ideal e, com o aumento da profundidade, o oxigênio encontra dificuldades para se difundir. Majdinasab e Yuan (2017) relatam ainda que vários fatores influenciam a percolação do oxigênio na camada de cobertura do aterro sanitário como espessura da camada, textura do solo, taxa de oxidação metanotrófica e condições meteorológicas.

GRAU DE SATURAÇÃO (UMIDADE) E POROSIDADE DO SOLO

A precipitação, recirculação do chorume, infiltrações superficiais bem como a água resultante da própria decomposição da massa residual são fontes de umidade para o solo em aterros sanitários (MAJDINASAB e YUAN, 2017). O teor de água na cobertura do aterro influencia no desempenho e crescimento das bactérias metanotróficas e difusão dos gases (CAO e STASZEWSKA, 2013). O teor de umidade deve estar equilibrado para favorecer a ação dos microrganismos; teores excessivos podem diminuir a capacidade de oxidação de metano, enquanto que baixos teores provocam estresse hídrico e redução das atividades biológicas (CAO e STASZEWSKA, 2013), pois a água promove o transporte de nutrientes e excretas das células no meio promovendo a manutenção do metabolismo celular (MARIANO, 2008). Albanna e Fernandes (2009) realizaram experimentos em escala laboratorial com dois tipos de solos existentes na camada de cobertura de dois aterros sanitários canadenses e analisaram a variação do teor de umidade para 20, 25 e 30%; a maior atividade de oxidação de metano ocorreu com 20%, as autoras justificaram que teores de umidade mais elevado restringem a difusão dos gases. Ait-Benichou *et al.* (2009) construíram e monitoraram, em um aterro, um 'biocover' com uma mistura de composto e areia na proporção de 5:1, respectivamente; como controle, utilizaram o solo do próprio aterro (classificado como argiloso e siltoso). Durante dois anos de estudo, o grau de saturação de água do 'biocover' variou entre 57,5% e 100%, enquanto para o controle foi entre 44,6% e 83,3%. Diante deste resultado, verifica-se a capacidade de retenção de água do composto.

O controle da porosidade do meio é essencial, já que este parâmetro determina a permeabilidade do biogás, carga de metano e entrada de oxigênio na camada de cobertura (HUBER-HUMER, RÖDER e LECHNER, 2009; MARIANO, 2008). Para obter as condições ideais, recomenda-se a utilização de substratos riscos em matéria orgânica, que contribuirá para elevar a capacidade de retenção de água e a porosidade, tornando o meio adequado para troca de gás, com tempo de retenção do biogás apropriado para o processo de oxidação dos gases (HUBER-HUMER, RÖDER e LECHNER, 2009; HUBER-HUMER, GEBERT e HILGE, 2008). Rose, Mahler e Izzo (2012) e Humer e Lechner (1999) afirmam que o tempo de retenção deve ser suficiente para que o metano (de baixa solubilidade em água) seja convertido para a sua forma dissolvida e, então, torne-se disponível para as bactérias. Desta forma, a porosidade e o teor de umidade afetam a difusão do biogás e oxigênio atmosférico, bem como, restringe a solubilidade do metano em água (ALBANNA e FERNANDES, 2009).

TEMPERATURA e pH

A temperatura afeta o crescimento dos microrganismos, reação, teor de oxigênio, difusão dos gases e umidade (ALBANNA e FERNANDES, 2009; NAGENDRAN *et al.*, 2006). Mariano (2008) afirma que, em geral, a taxa de oxidação de metano aumenta em temperaturas mesófilas (15 a 45°C). Lopes *et al.* (2010) realizaram o estudo com câmara de fluxo em um aterro sanitário brasileiro e observaram as maiores taxas de oxidação de metano ($\cong 100\%$) entre 32 a 34°C. Albanna e Fernandes (2009) analisaram a oxidação de metano variando a temperatura entre 5, 22 e 35°C, como resultado, as maiores taxas de oxidação de metano ocorreram a 35°C, além disso, a oxidação completa ocorreu dentro de 48 - 55 horas para 35°C, enquanto mais de 120 horas foram necessários a 5°C. Ait-Benichou *et al.* (2009) obtiveram uma redução ($\cong 78\%$) na taxa de oxidação de metano quando a temperatura estava inferior a 5°C, os autores justificaram que temperatura baixas influenciam na atividade microbiana.

O pH é outro parâmetro relevante para oxidação do metano. Humer e Lechner (1999) relatam que o pH deve permanecer próximo a neutralidade e com pouca variação de curto prazo para não afetar a atividade biológica. No estudo de Lopes *et al.* (2010), o pH na camada metanotrófica foi $7,44 \pm 0,85$. Huber-Humer, Röder e Lechner (2009) definem que o valor de pH ideal é entre 6,5 - 8,5.



NUTRIENTES

Materiais enriquecidos com matéria orgânica e nutrientes aumentam a atividade microbiana e promovem maior oxidação de metano (MAJDINASAB e YUAN, 2017). Huber-Humer, Röder e Lechner (2009) definem que o valor de amônio (NH_4^+) e nitrito (NO_2^-) deve ser inferior a 400 e 0,1 ppm, respectivamente, pois, estes compostos são inibidores da oxidação de metano; para o nitrato (NO_3^-) não há um valor limite, enquanto para o fósforo total deve ser superior a 0,3%, já que, este é um nutriente essencial para os microrganismos. Albanna e Fernandes (2009) testaram a adição de fertilizante como fonte de nutrientes no solo original de aterros sanitários, como resultado houve um aumento de 44-45% das taxas de oxidação de metano com 30% de teor de umidade, além disso, a oxidação completa passou de 120 horas para 48 horas quando a temperatura estava a 5°C. As autoras relatam que os nutrientes, principalmente o nitrogênio e o fósforo, auxiliam no metabolismo celular e cinética metabólica das bactérias metanotróficas.

VEGETAÇÃO

A oxidação de metano pode ser favorecida com a adição de vegetação na superfície da camada de cobertura, pois a vegetação promove a formação da rizosfera, o que favorece o desenvolvimento das bactérias metanotróficas; além disso, as raízes promovem a formação de macroporos que auxiliam na difusão dos gases, principalmente do oxigênio atmosférico (CAO e STASZEWSKA, 2013). Nagendran *et al.* (2006) citam outras vantagens da utilização da vegetação, como: aumento da evapotranspiração; os nutrientes liberados pela raiz das plantas aumentam a biomassa e a atividade microbiana; e promove a estabilização mais rápida dos resíduos (diminuiu a produção de biogás após 5-20 anos). Além disso, a utilização da camada de vegetação auxilia na proteção do sistema de impermeabilização das células, minimização dos efeitos da ação dos ventos e na estabilização dos taludes (MARIANO, 2008).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mitigação de metano através da sua oxidação em sistemas biológicos é uma técnica promissora e viável para aterros sanitários de pequeno porte e/ou antigos, pois apresenta baixo custo e pode ser facilmente construída e mantida por meio do monitoramento de parâmetros físicos, químicos e dados microbiológicos que fornecerão informações para as melhores condições de oxidação de metano.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, no âmbito do Programa Ciência Sem Fronteiras – CsF) e à Fundação Araucária do Paraná (Programa de Pesquisa Básica e Aplicada) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ait-Benichou, S.; Jugnia, L. B.; Greer, C. W.; Cabral, A. R. Methanotrophs and methanotrophic activity in engineered landfill biocovers. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2509-2517, 2009.
2. Albanna, M.; Fernandes, L. Effects of temperature, moisture content, and fertilizer addition on biological methane oxidation in landfill cover soils. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 13, n. 3, p. 187-195, 2009.
3. Cao, Y.; Staszewska, E. Role of landfill cover in reducing methane emission. **Archives of Environmental Protection**, v. 39, n. 3, p. 115-126, 2013.
4. Capanema, M. A.; Cabral, A. R. Evaluating methane oxidation efficiencies in experimental landfill biocovers by mass balance and carbon stable isotopes. **Water Air Soil Pollut**, v. 223, n. 9, p. 5623-5635, 2012.
5. Huber-Humer, M.; Gebert, J.; Hilger, H. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management and Research**, v. 26, n. 1, p. 33-46, 2008.
6. Huber-Humer, M.; Röder, S.; Lechner, P. Approaches to assess biocover performance on landfills. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2092-2104, 2009.
7. Humer, M.; Lechner, P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. **Waste Management & Research**, v. 17, n. 6, p. 443-452, 1999.
8. Lopes, R. L.; Jucá, J. F. T.; Mariano, M. O. H.; Maciel, F. J. Camadas de cobertura metanotróficas como alternativas para gerenciamento de gases de efeito estufa em aterros sanitários. **Holos**, v. 4, n. 1, p. 3-18, 2010.



9. Majdinasab, A.; Yuan, Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review. **Ecological Engineering**, v. 104, n. 1, p.116-130, 2017.
10. Mariano, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de coberturas de aterros de resíduos sólidos**. 225 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2008.
11. Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. Ensaios de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 223-228, 2010.
12. Nagendran R.; Selvam, A.; Joseph, K.; Chiemchaisri, C. Phytoremediation and rehabilitation of municipal solid waste landfills and dumpsites: A brief review. **Waste Management**, v. 26, n. 12, p. 1357-1369, 2006.
13. Rose, J. L.; Mahler, C. F.; Izzo, R. L. S. Comparison of the methane oxidation rate in four media. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 803-812, 2012.
14. Spokas, K.; Bogner, J.; Chanton, J. P.; Morcet, M.; Aran, C.; Graff, C.; Golvan, M. L.; Hebe, I. Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? **Waste Management**, v. 26, n. 5, p. 516-525, 2006