

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

BIOFILTRAÇÃO DE METANO EM BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CAMPO

BIOFILTRATION OF METHANE IN LANDFILL BIOGAS: A FIELD STUDY

* Waldir Nagel Schirmer¹
Eri vélton César Stroparo¹
Douglas Luiz Mazur¹
Matheus Vitor Diniz Gueri²
José Fernando Thomé Jucá³
Kelly Geronazzo Martins¹

Recibido el 30 de septiembre de 2021. Aceptado el 9 de marzo de 2022

Abstract

The release of landfill biogas (LFG) into the atmosphere as fugitive emissions (through the cover layer) is quite representative. Given the high potential of biogas in the greenhouse effect (GHG), the study of different technologies for its use in energy production has been increasingly studied. In addition to the biogas recovery to the energy purposes, use of biosystems (biocovers, biofilters, etc.) in cover layers aimed at optimizing the biotic consumption of methane, the main component of biogas in terms of global warming potential (GWP), has also been widely evaluated as a system complementary in GHG mitigation. Thus, the present study evaluated the performance, in terms of methane oxidation efficiency, of a biofilter filled with conventional landfill soil enriched with scum from a domestic wastewater treatment plant. This "improved" biofilter, with high organic matter content ($\approx 4.5\%$) in the upper portion of the bed, was compared to a "control" biofilter, containing only conventional landfill soil and therefore with low organic matter content. ($\approx 0.5\%$). Both biofilters were fed with a loading rate of $\approx 44 \text{ g}_{\text{CH}_4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ over nine monitoring campaigns. Parameters as methane concentration in raw biogas (LFG), moisture and temperature of biofilter beds were also related to the methane oxidation efficiencies. The average efficiency of methane oxidation in the improved biofilter was 95.2%, compared to the control biofilter (84.7% efficiency), confirming the effectiveness of WWTP scum as a cover layer soil amendment in GHG mitigation.

Keywords: atmospheric pollution, biotreatment, greenhouse gases, methane, solid wastes valorization.

¹ Department of Environmental Engineering, Midwestern State University (UNICENTRO), Irati, Paraná State, Brazil.

² Latin American Institute of Infrastructure and Territory, Federal University of Latin American Integration (UNILA), Foz do Iguaçu, Paraná State, Brazil.

³ Department of Civil Engineering, Federal University of Pernambuco (UFPE), Recife (Pernambuco State), Brazil.

* Corresponding author. Department of Environmental Engineering, Midwestern State University (UNICENTRO), Maria Roza de Almeida Street, Irati, Paraná State, Brazil, 84505-677. Email: wanasch@hotmail.com

Resumo

O lançamento do biogás gerado para atmosfera em aterros sanitários na forma de emissões fugitivas (pela camada de cobertura) é bastante representativo. Dado o elevado potencial do biogás como gás de efeito estufa (GEE), o estudo de diferentes tecnologias de seu aproveitamento para a produção de energia tem sido cada vez mais estudado. Além do aproveitamento do biogás, o emprego de biosistemas (biorrecobrimientos, biofiltros, etc.) em camadas de cobertura visando à otimização do consumo biótico de metano, principal componente do biogás em termos de potencial de aquecimento global, também tem sido amplamente avaliado como sistema complementar na mitigação de GEE. Desta forma, o presente estudo avaliou o desempenho, em termos de eficiência de oxidação de metano, de um biofiltro preenchido com solo convencional do aterro enriquecido com espuma de estação de tratamento de efluentes domésticos. Este biofiltro “melhorado”, com elevado teor de matéria orgânica ($\approx 4.5\%$) na porção superior do leito, foi comparado a um biofiltro “controle”, contendo apenas solo convencional do aterro e, portanto, com baixo teor de matéria orgânica ($\approx 0.5\%$). Ambos os biofiltros foram alimentados com carga de $\approx 44 \text{ g}_{\text{CH}_4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ao longo de nove campanhas de monitoramento. Parâmetros como concentração de metano no biogás bruto, umidade e temperatura dos leitos biofiltrantes também foram relacionados às eficiências de oxidação de metano. A eficiência média de oxidação de metano no biofiltro melhorado foi de 95.2%, comparativamente ao biofiltro controle (84.7% de eficiência), ratificando a eficácia de espuma de ETE como agregado do solo de camada de cobertura na mitigação de GEE.

Palavras-chave: biotratamento, gases de efeito estufa; metano, poluição atmosférica, valorização de resíduos sólidos.

Introdução

Aterros sanitários são, reconhecidamente, uma das principais fontes antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera. Nestas plantas, sistemas de coleta de biogás para aproveitamento energético constituem-se uma importante estratégia de controle de emissões de GEE (Duan *et al.*, 2022; Franqueto *et al.*, 2019; Kaza *et al.*, 2018; Sadasivam e Reddy, 2014). Entretanto, mesmo em aterros de grande porte que possuem algum sistema de extração e aproveitamento energético, boa parte do biogás gerado nas células do aterro escapa pela camada de cobertura na forma de emissões fugitivas. Além disso, independentemente da eficiência do sistema de extração de biogás (nos aterros que o dispõem), as emissões residuais de gases pela camada de cobertura podem persistir por várias décadas, mesmo após o encerramento do aterro, exigindo a implementação de sistemas complementares de controle (Cabral *et al.*, 2010; Kjeld, 2013; Sadasivam e Reddy, 2014). Emissões de natureza fugitiva são ainda mais preocupantes em aterros antigos (com operação já finalizada) ou mesmo de pequeno porte, onde o aproveitamento energético do biogás não é economicamente viável (Cabral *et al.*, 2010; Huber-Humer *et al.*, 2008; Huber-Humer *et al.*, 2009).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) define, como um de seus princípios e objetivos, o aproveitamento energético do resíduo doméstico como “destinação final ambientalmente adequada”. Entretanto, o que se observa tanto no cenário brasileiro como em

grande parte dos países em desenvolvimento é a quase predominância do uso de drenos verticais como único sistema de drenagem do biogás formado nas células do aterro. Nessas unidades, não há qualquer sistema de aproveitamento do biogás (apenas combustão do biogás, na forma de sistemas de “flaring”), o que potencializa ainda mais as emissões de GEE. Nesses sistemas de queima do biogás, além da conversão do metano em dióxido de carbono, vários outros poluentes secundários podem ser gerados concomitantemente, como monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, material particulado e até dioxinas (Nikiema e Heitz, 2009; Olaguer, 2021; USEPA, 2011), atestando essa tecnologia como menos ambientalmente correta.

A aplicação de biosistemas em aterros sanitários visa à otimização do consumo biótico de metano, através do melhoramento das condições de oxidação passiva desse composto no solo de cobertura original. O processo de biotratamento consiste na transferência do contaminante da fase gasosa para uma fase líquida (biofilme, aderido à superfície de um meio sólido poroso) onde microrganismos predominantemente aeróbios estão presentes. O resultado é a biodegradação de compostos orgânicos (como o metano) em dióxido de carbono e água (Deviny *et al.*, 1999; USEPA, 2011).

A capacidade de oxidação de metano pela população metanotrófica presente na camada de cobertura do aterro tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos (Brandt *et al.*, 2016; Cabral *et al.*, 2010; Franqueto *et al.*, 2019; Kjeld, 2013; Lee *et al.*, 2018; Mei *et al.*, 2015; Ndanga *et al.*, 2015; etc.). Nesse contexto, vários parâmetros do processo de bio-oxidação devem ser observados de modo a otimizar a atividade metanotrófica, como temperatura, umidade do meio, etc. Independentemente do biosistema avaliado (biojanela, biorrecobrimento, biofiltro), os teores de matéria orgânica e nutrientes do sistema biótico também têm mostrado elevada relação com a eficiência de oxidação de metano presente no biogás (Abushammala *et al.*, 2014; Huber-Humer *et al.*, 2008). Fatores como aumento da porosidade do substrato (meio filtrante), retenção da umidade do meio e suprimento de macro e micronutrientes para a manutenção da biomassa metanotrófica estão diretamente relacionados ao teor de matéria orgânica do biosistema (Huber-Humer *et al.*, 2008; Humer e Lechner, 1999; Kettunen *et al.*, 2006).

Costa *et al.* (2018) avaliaram a eficiência de oxidação de metano em colunas de laboratório (biofiltros de PVC) sob duas condições: uma coluna com 60 cm de camada de solo convencional (matéria orgânica ≈ 4.3 g/Kg) e outra com 30 cm desse mesmo solo mais 30 cm de uma mistura de solo + composto na proporção 1:1 (matéria orgânica ≈ 53.1 g/Kg). Os autores concluíram que a eficiência de oxidação do metano na coluna com o composto foi superior, em função do maior teor de matéria orgânica do meio. Rose *et al.* (2012) avaliaram, em colunas de laboratório (tubos de PVC), a capacidade de oxidação de metano em solo de aterro enriquecido com composto em diferentes proporções. Os autores também observaram uma relação direta entre o teor de matéria orgânica no leito filtrante e a remoção de metano presente no biogás.

Em relação aos demais parâmetros, a literatura diverge bastante em relação àqueles que mais influenciam na eficiência de oxidação do metano. A própria faixa de valores desses parâmetros pode variar bastante no que se refere ao ambiente mais favorável à atividade metanotrófica, a depender das condições do processo e características do meio onde ocorre a bio-oxidação. No que se refere à umidade do meio filtrante, por exemplo, os trabalhos trazem diferentes faixas ótimas para a oxidação de metano, com valores que podem variar desde 11-32% (Abushammala *et al.*, 2014) até 66% (Shangari e Agamuthu, 2012).

Comparativamente a estudos de laboratório, como a grande maioria dos trabalhos reportados na literatura, em que o processo de biotratamento ocorre sob condições controladas (umidificação uniforme do leito, fluxo constante de alimentação do biogás, temperatura do leito e ambiente constantes, etc.), os biosistemas de campo apresentam, como diferenciais, um melhor diagnóstico do desempenho da população metanotrófica no que se refere às reais condições de trabalho (La *et al.*, 2018). Van Tienen *et al.* (2021) avaliaram o desempenho de dois biofiltros instalados diretamente sobre a célula do aterro sanitário municipal de Guarapuava (PR). Uma das colunas (usada como controle) foi preenchida com 60 cm do solo original do aterro (com baixo teor de matéria orgânica, $\approx 0.8\%$) enquanto que a coluna avaliada foi preenchida com 45 cm do solo original do aterro mais 15 cm de uma mistura solo convencional e composto (perfazendo um total de $\approx 6.0\%$ de matéria orgânica na porção superior da coluna). Como resultado, os autores observaram uma eficiência de até $\approx 95\%$ na oxidação de metano no biofiltro enriquecido e de $\approx 71\%$ de oxidação no biofiltro controle, confirmando a eficiência de substratos enriquecidos (de elevado teor de matéria orgânica) como agregado do solo na otimização da oxidação de gases de efeito estufa (Van Tienen *et al.*, 2021).

A grande maioria dos estudos empregando biosistemas na oxidação de metano é avaliada em países de clima temperado (América do Norte e Europa) e, portanto, sob condições climáticas completamente diferentes daquelas observadas em países de clima tropical, como o Brasil. Além dos fatores climáticos, cabe salientar também que a performance de sistemas bióticos como aquele aqui proposto depende ainda de fatores operacionais, incluindo características dos resíduos, parâmetros internos e externos à célula do aterro, etc., muitas vezes específicos do local de estudo.

A espuma é considerada um resíduo sólido e é comumente destinada a aterros sanitários (mas apenas para descarte). Por possuir um elevado teor de matéria orgânica, apresenta um grande potencial como complemento do solo na oxidação de metano emitido a partir da camada de cobertura na forma de emissões fugitivas. Neste cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar o uso de espuma de estação de tratamento de efluentes doméstico como agregado do solo de aterro sanitário na oxidação passiva de metano emitido pela camada de cobertura na forma de emissões fugitivas.

Metodología

Local de estudo e aparato experimental

O experimento foi instalado sobre uma célula com tempo de cobertura final de quatro anos, no aterro sanitário municipal de Guarapuava (PR). O aparato experimental consistiu de duas colunas (biofiltros) de aço inoxidável com 1 m de altura e 60 cm de diâmetro; a lateral de ambos foi isolada termicamente com uma camada de 20 cm de solo, de modo que apenas a parte superior dos biofiltros permanecesse aberta e, portanto, sujeitas às condições ambientais. Sob os leitos filtrantes (ambos de 60 cm de altura) foi colocada uma camada de 3 cm de brita #2, de modo a melhorar a distribuição do biogás pela coluna (camada de distribuição de biogás – CDB). As duas colunas eram passivamente alimentadas com biogás proveniente de um dos drenos da célula a uma carga de $\cong 44 \text{ g}_{\text{CH}_4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Esse valor de carga era periodicamente verificado (com medidor de fluxo) e foi adotado em função dos seguintes critérios: a) valores médios de carga aplicados à camada de cobertura em aterros norte-americanos e canadenses ($\cong 28 \text{ g}_{\text{CH}_4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, de acordo com Capanema e Cabral, 2012); b) o aterro sob estudo não conta com um sistema de extração (por bombeamento) e aproveitamento de biogás, apenas o sistema de “flares” convencionais nos drenos verticais, o que tende aumentar a carga de biogás aplicada sob a camada de cobertura da célula escolhida. A Figura 1 apresenta os detalhes do experimento.

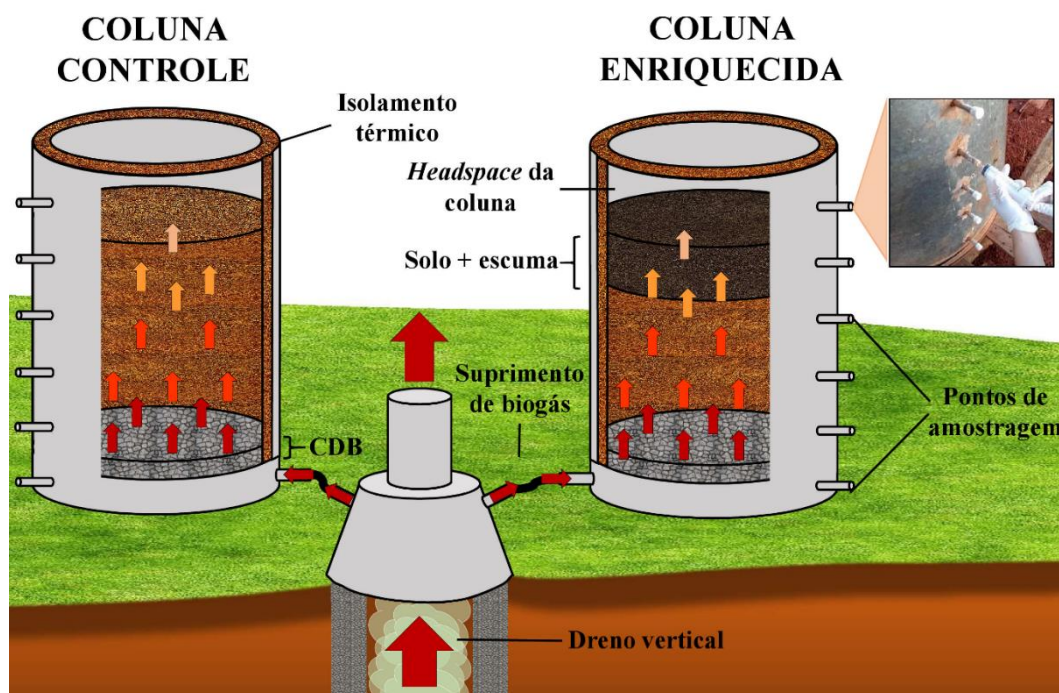


Figura 1. Aparato experimental (biofiltros) usado no biotratamento de metano. *Fonte: Os autores.*

Os dois leitos biofiltrantes, aqui denominados controle e melhorado, tinham a seguinte composição:

- *Controle*: 60 cm de solo convencional do aterro (com baixo teor de matéria orgânica, $\approx 0.5\%$);
- *Melhorado*: 45 cm de solo convencional do aterro mais uma camada superior (15 cm) de uma mistura de solo do aterro e espuma seca de estação de tratamento de efluentes domésticos (teor final de matéria orgânica da porção enriquecida $\approx 4.5\%$). Esse leito foi usado para avaliar o desempenho do substrato enriquecido (espuma) como agregado ao solo do aterro na oxidação do metano, comparativamente ao solo convencional do aterro. Originalmente, a espuma utilizada apresentava um teor de matéria orgânica de 35%.

Monitoramento dos biofiltros

Os dois biofiltros foram monitorados de 08 de março a 25 de agosto de 2018 (num total de 9 campanhas), de modo a relacionar o desempenho de ambos com as estações do ano (e, portanto, temperaturas ambiente e dos meios filtrantes). Vale ressaltar que os biofiltros já estavam em operação desde 2017, operando nas mesmas condições de carga. Desse modo, a população metanotrófica já estava aclimatada às condições do processo antes mesmo do início do período de monitoramento do presente estudo. Os biofiltros eram mantidos em local coberto (cobertura de lona plástica feita sobre a célula) e eram periodicamente umedecidos (em média duas vezes por mês), de modo a manter as condições de umidade mínimas para a atividade metanotrófica. Embora fosse sempre o mesmo para as duas colunas, o volume de água adicionado entre as campanhas variou em função das condições climáticas (períodos mais secos exigiam adição de mais água) e desempenho das colunas na oxidação do metano.

O teor de matéria orgânica dos dois leitos foi caracterizado de acordo com Cantarella *et al.* (2001). Além da matéria orgânica, outros parâmetros avaliados: carbono total (Walkley e Black, 1934) e nitrogênio total (Cantarella e Trivelin, 2001), determinados no início e ao final do experimento. As amostras de substrato para essas análises foram retiradas da porção superior dos leitos.

Sensores de umidade (*Decagon* ECH2O CE-5) foram instalados a 10 cm abaixo da superfície dos leitos; termômetros de mercúrio a 10 e 40 cm abaixo da superfície. Umidade e temperaturas das colunas eram verificadas no início de cada campanha. Temperaturas médias ambientes dos dias das campanhas foram obtidas junto ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR, 2020).

As amostras de gás eram coletadas a partir dos pontos superior (gás tratado, no “headspace” do leito) e inferior (biogás bruto) das colunas (Figura 1). Desse modo, foi possível avaliar a performance das colunas melhorada e controle no que se refere à eficiência global de oxidação de metano (Equação 1) (Fedrizzi *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2011):

$$Ef_{ox} = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100(\%)$$

Equação (1)onde: C_{in} : concentração de metano na entrada do biofiltro (biogás bruto), % C_{out} : concentração de metano na saída do biofiltro (gás tratado), %

Para a avaliação do perfil vertical de oxidação de metano ao longo dos leitos filtrantes, as amostras foram retiradas de seis pontos de amostragem: superior (“headspace”), inferior (biogás bruto) e mais quatro pontos centrais, em contato direto com os leitos (Figura 1). Neste caso, foram determinadas as concentrações de metano e oxigênio do ponto amostrado.

As amostras do “headspace” só eram coletadas 30 minutos após a cobertura total da parte superior das colunas (até que se atingisse o estado estacionário do gás no meio). As amostras eram coletadas com uma seringa de 60 mL e imediatamente injetadas num analisador de biogás da marca *Columbus Instruments*, com sensor de infravermelho para detecção de metano (0 a 100%_{vol}) e precisão de ±2% para metano e dióxido de carbono.

Análise estatística

Para testar se as temperaturas dos leitos filtrantes e do ar, umidade do solo, concentração de metano no biogás bruto, carga e o enriquecimento do substrato da coluna (razão C/N) influenciaram significativamente a eficiência de oxidação de metano, os dados foram avaliados por meio de uma análise de componentes principais (ACP), em que os autovalores maiores que 1 foram considerados significativos, conforme critério de Kaiser (Johnson e Wichern, 1988). Para confirmar os resultados observados na ACP, as eficiências de oxidação entre as duas colunas (controle e melhorada) foram contrastadas pelo teste t-Student. Também foram calculadas análises de correlação de Pearson. O nível de significância para todas as análises foi de 5%. A premissa de Gaussianidade foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilks e o de homogeneidade de variâncias pelo teste de Fligner-Killeen. O resultado é expresso pelo valor “p” (um valor <0.05 indica que há diferença estatística). As análises foram feitas com o software RStudio, versão 4.0.2 (RStudio, 2020).

Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta as eficiências globais de oxidação de metano nas colunas enriquecida com a espuma (melhorada - M) e controle (C), bem como os teores de umidade dos leitos biofiltrantes e a concentração de metano no biogás bruto.

A concentração de metano no biogás, ao longo das 9 campanhas, variou de 39.6 a 43.4%. Entretanto, vê-se, pela Figura 2, que essa flutuação nas concentrações de metano não interferiu nas eficiências de oxidação deste composto, independentemente da coluna avaliada ($r=0.15$ e

$p=0.70$; para coluna controle e $r=0.37$ e $p=0.36$ para melhorada). A aplicação de um baixo valor de carga ao sistema contribuiu para a obtenção de elevadas taxas de oxidação de metano. De fato, a eficiência do processo em muitos estudos reportados na literatura tem sido associada à aplicação de baixas cargas de metano (Capanema e Cabral, 2012).

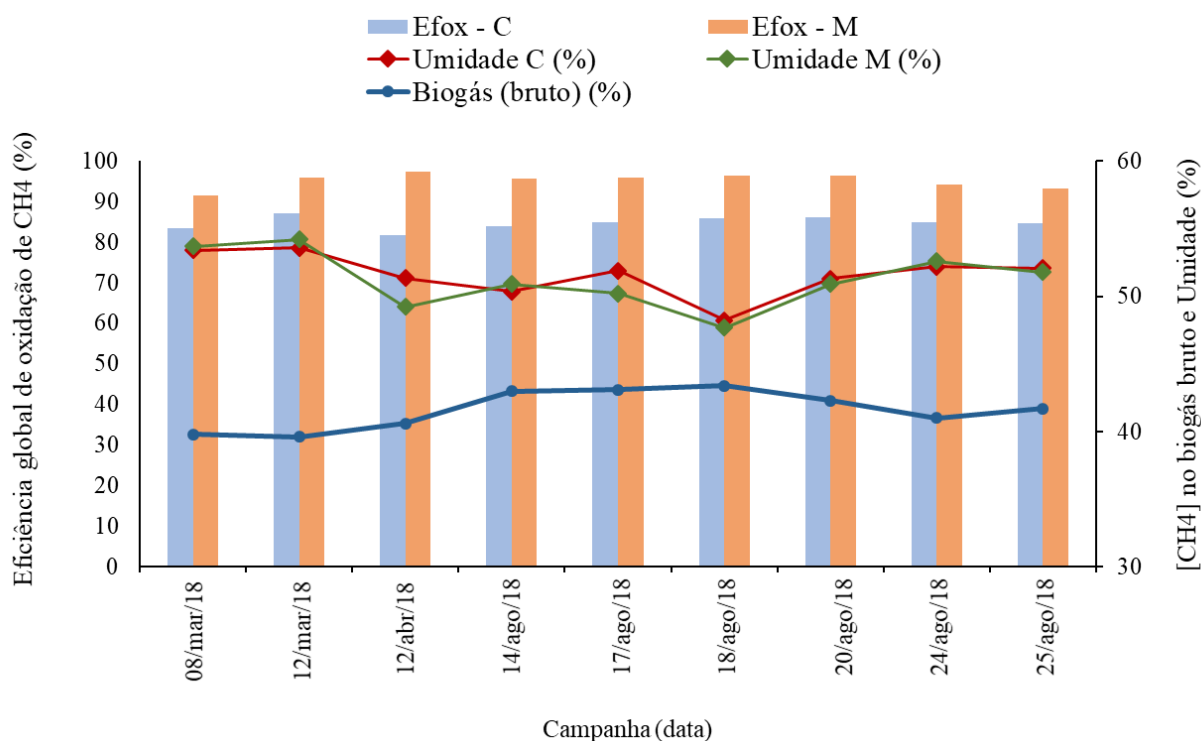


Figura 2. Eficiências de oxidação de CH₄, umidade dos leitos C e M e teor de CH₄ no biogás bruto. *Fonte: Os autores.*

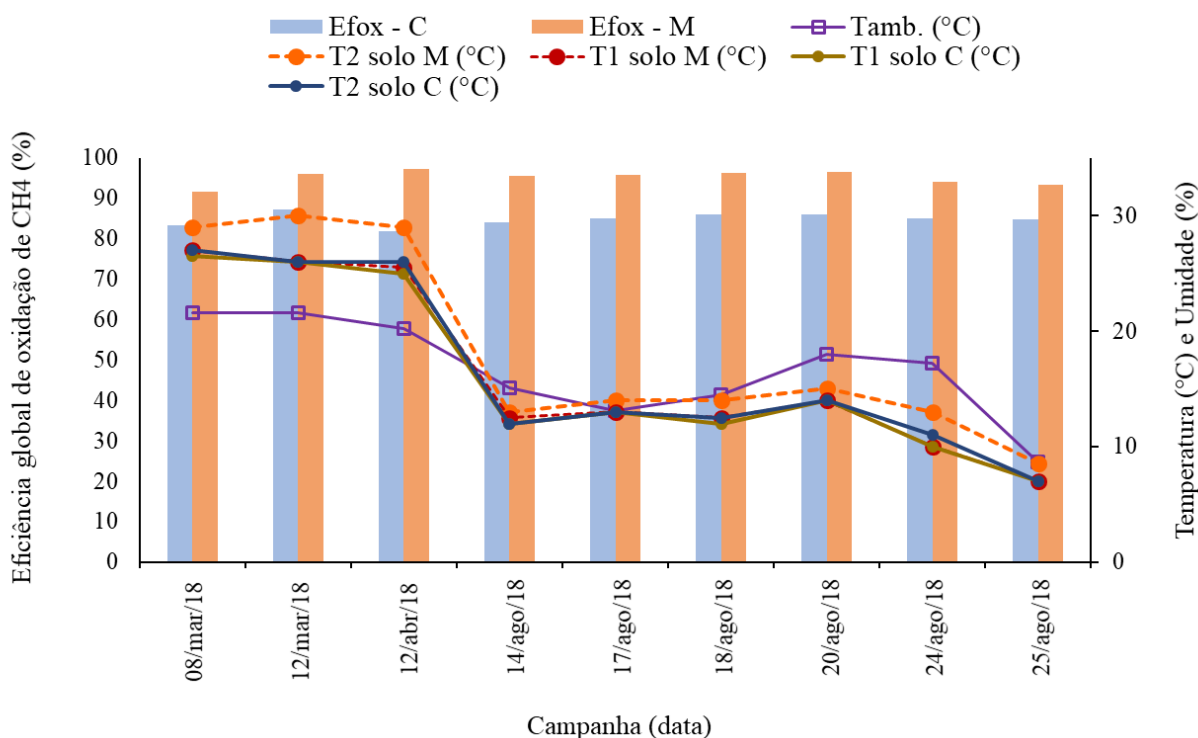
Muitos trabalhos sobre biofiltração de metano reportam a relação entre a carga de biogás aplicada ao biosistema com a eficiência de oxidação de metano (Brandt *et al.*, 2016; Ferdowsi *et al.*, 2016; Nikiema e Heitz, 2009). A maior parte desses estudos aponta uma considerável redução na eficiência de remoção de metano com o aumento da carga e/ou concentração de metano. Cargas elevadas de biogás aplicadas ao biofiltro estão associadas a altas velocidades superficiais de biogás pelo leito filtrante. Essa rápida passagem de biogás pelo leito implica diretamente em um menor tempo de residência dos componentes do biogás (como o metano) no meio e, portanto, menor transferência desses componentes da fase gasosa ao biofilme, meio onde estão imobilizados os microrganismos responsáveis pela degradação do metano (Devinny *et al.*, 1999; Brandt *et al.*, 2016; La *et al.*, 2018). A estes fatores soma-se ainda a baixa solubilidade do metano

em meio aquoso o que, por si só, exige um tempo de residência adequado (suficientemente elevado) do biogás no leito biofiltrante (Albanna e Fernandes, 2009; Gebert *et al.*, 2003). Park *et al.* (2009), por exemplo, investigaram a eficiência de remoção do CH₄ ao variar parâmetros como fluxo de biogás ($\cong 31$ a $557 \text{ g}_{\text{CH}_4} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$) e a concentração de metano na entrada da coluna em um biofiltro em escala de laboratório operando com solo de aterro como leito filtrante. Os autores observaram que a eficiência de remoção de CH₄ foi de até 100% para cargas inferiores a $278.5 \text{ g}_{\text{CH}_4} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$. Portanto, no que se refere à manutenção da eficiência de oxidação de metano, o valor reduzido de carga utilizado no presente estudo (os $44 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ equivalem a $3.1 \text{ g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ nas condições trabalhadas) se sobrepôs às pequenas variações observadas nas concentrações de metano ao longo das campanhas.

Por ser um experimento de campo, ambos os leitos estavam constantemente sujeitos a grandes variações nos principais parâmetros do processo, como temperatura e umidade. Mesmo tentando manter um nível de umidade constante entre as campanhas, o fato de não estarem sob condições controladas de umidificação (como ocorre em colunas de laboratório) fez com que os teores de umidade dos leitos oscilassem entre ≈ 48 e 54% em ambas as colunas. Ainda assim, os teores de umidade apresentaram valores mínimos suficientes para manter as eficiências de oxidação de metano superiores a 82% na coluna controle e 92% na melhorada. Como já comentado anteriormente, os valores ótimos de umidade podem variar muito, de acordo com as propriedades do meio onde ocorre o biotratamento. Vê-se ainda, pela Figura 2, que não houve uma relação direta entre os teores de umidade do meio e a eficiência de oxidação de metano, independentemente do biofiltro avaliado ($r=0.02$ e $p=0.96$ para a controle e $r=0.20$ e $p=0.60$ para a melhorada).

A Figura 3 apresenta as eficiências globais de oxidação de metano nas colunas enriquecida com a espuma (M) e controle (C), e sua relação com as temperaturas ambiente e dos leitos filtrantes. Durante o período de monitoramento, a temperatura média diária mínima registrada em Guarapuava foi de 6.9°C (em 10-agosto-2018); já a média diária máxima foi de 23.8°C (em 24-março-2018) (IDR, 2020). Essa oscilação nas temperaturas ambientes influenciou fortemente as temperaturas dos leitos filtrantes ($r=0.87$ e $p<0.01$ para ambas as colunas com T1 e $r=0.86$ e $p<0.01$ para as duas colunas com T2). Entretanto, assim como ocorreu com a umidade, essa grande variação de temperatura também não perturbou as eficiências de oxidação de metano ($r=0.24$; $p=0.54$ para controle com T1; $r=0.25$; $p=0.50$ para melhorada com T1 e $r=-0.25$; $p<0.49$ para controle com T2 e $r=-0.26$ e $p=0.49$ para melhorada com T2). Muitos trabalhos têm reportado uma forte dependência da eficiência de oxidação de metano com a temperatura do meio (Capanema e Cabral, 2012; Fedrizzi *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2018; Scheutz *et al.*, 2009). A população metanotrófica, de características mesofílicas, preferem ambientes com temperaturas na faixa de 20 a 37°C (Humer e Lechner, 1999), 25 a 35°C (Park *et al.*, 2009; Scheutz *et al.*, 2009) ou $\sim 30^\circ\text{C}$ (Spokas e Bogner, 2011). Em geral, um aumento na temperatura do meio implica

diretamente no aumento na eficiência de oxidação de metano; da mesma forma, a redução da temperatura do sistema pode reduzir consideravelmente a atividade metanotrófica. Esse comportamento, entretanto, não pode ser encarado como padrão, uma vez que características (físico-químicas) importantes do meio e do processo, como teor de matéria orgânica e nutrientes do material usado como suporte (leito) e a própria vazão de metano pelo biossistema, podem se sobrepor a outros parâmetros atrelados ao ambiente no que se refere à oxidação de metano (Van Tienen *et al.*, 2021).



T1 e T2: Temperaturas a 40 e 10 cm da superfície dos leitos, respectivamente.

Figura 3. Eficiências de oxidação de CH₄, temperaturas ambiente e dos leitos C e M. *Fonte: Os autores*

Trabalhos anteriores (dados ainda não publicados) utilizando as mesmas colunas, os mesmos leitos, com biogás proveniente do mesmo dreno, e sob condições operacionais bastante similares àquelas aqui apresentadas demonstraram a mesma independência da oxidação do metano em relação às temperaturas. Gebert *et al.* (2003) explicam que, de fato, a população metanotrófica presente no biossistema pode se adaptar a variações de temperatura podendo, inclusive, alterar a faixa ótima (de temperatura) de operação das metanotróficas de acordo com as novas características do meio, garantindo a eficiência de oxidação do metano. Aqui, vê-se que a faixa

de temperatura de operação dos biofiltros foi bastante ampla (de ≈ 10 a 30°C) entre as diferentes estações do ano; ainda assim, não foi observada uma relação direta entre as temperaturas (ambiente e substratos) e as eficiências de oxidação de metano ($r=-0.10$; $p=0.81$ para controle; $r=0.07$; $p=0.86$ para melhorada), independentemente do biofiltro avaliado.

A Tabela 1 apresenta as relações C/N de ambos os leitos. Substratos com elevados níveis de matéria orgânica constituem-se uma importante fonte de carbono e nutrientes para o crescimento e metabolismo das metanotróficas (Albanna e Fernandes, 2009; Humer e Lechner, 1999; Nikiema e Heitz, 2009) e estão diretamente relacionados a elevadas taxas de oxidação de metano (Abushammala *et al.*, 2014; Czepiel *et al.*, 1995; Huber-Humer *et al.*, 2008). No que se refere à relação C/N, a literatura tem reportado que razões C/N menores estão associados a maiores eficiências de oxidação de metano (La *et al.*, 2018; Sadasivam, e Reddy, 2014). A Tabela 1 mostra que, além do maior teor de carbono associado ao acréscimo da espuma (inicialmente com 35% de matéria orgânica), as razões C/N do biofiltro enriquecido apontam, ainda, uma maior disponibilidade de macronutrientes (N) no meio, do início ao fim do período de monitoramento. Vê-se, ainda, que a redução de N no biofiltro controle foi bem superior àquela observada no melhorado, evidenciando uma maior demanda de nutrientes por parte da população metanotrófica acrescida na porção enriquecida deste biofiltro (M). Essa maior atividade microbiológica corroborou, de fato, para a maior eficiência de oxidação do metano no biofiltro melhorado ($t=-12.90$; $p<0.01$), o que pode ser observado claramente nas Figuras 2, 3 e 4. Esta última apresenta os perfis verticais de oxidação de metano nas duas colunas avaliadas, bem como as concentrações de metano e oxigênio disponível no meio ao longo dos leitos biofiltrantes.

Tabela 1. Caracterização dos leitos no início e ao final do período de monitoramento.

Parâmetro	Biofiltro			
	Controle		Melhorado ⁽¹⁾	
	Inicial	Final	Inicial	Final
C/N	14.4	19.7	9.4	10.6

(1) Essa composição refere-se apenas aos 15 cm superiores do leito melhorado (camada enriquecida do biofiltro)

A Figura 4 revela que a zona de oxidação do metano foi mais intensa no biofiltro melhorado já a partir do primeiro ponto de amostragem em contato com o leito (de baixo pra cima). Embora apenas a porção superior do biofiltro melhorado tenha recebido a espuma, a umidificação do leito (sempre a partir da sua superfície) durante o período de monitoramento também agiu como agente carreador, tanto das metanotróficas quanto da matéria orgânica e nutrientes, ao longo do

leito. Este fato, no caso do leito enriquecido, contribuiu para uma eficiência de oxidação de metano maior ao longo do leito, e não apenas nos primeiros 15 cm (inicialmente com maior teor de matéria orgânica).

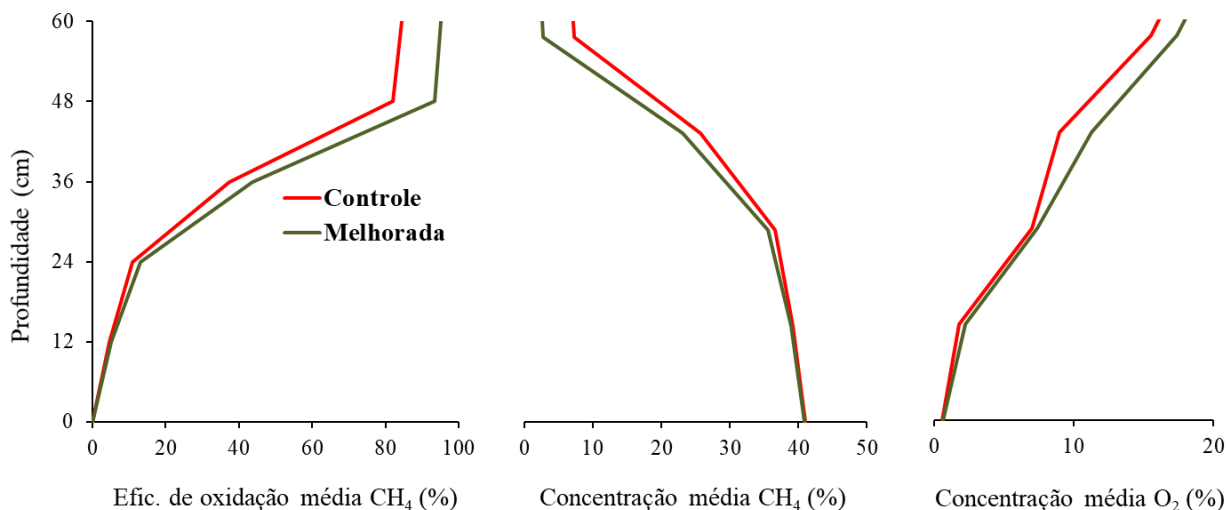


Figura 4. Perfis verticais de oxidação de CH₄ e concentração de CH₄ e O₂ nos biofiltros. *Fonte: Os autores.*

No que se refere à porosidade dos meios biofiltrantes, a literatura reporta que a presença de materiais mais grosseiros no leito (como a espuma – Figura 5) está relacionada à maior porosidade do meio e, portanto, maior capacidade de oxidação do metano (Abushammala *et al.*, 2014; Huber-Humer *et al.*, 2008). A maior porosidade do substrato favorece a distribuição e a troca gasosa (de O₂ e CH₄) em profundidades maiores do leito (Huber-Humer *et al.*, 2008; Kjeld, 2013; La *et al.*, 2018). Assim, mesmo não tendo sido avaliada no contexto deste trabalho, é muito provável que a maior porosidade (pelo menos da porção superior do leito enriquecido) também favoreceu uma maior oxidação do biofiltro melhorado. De fato, o perfil de concentração de O₂ ao longo do leito (Figura 4) acompanhou o perfil de eficiência de oxidação de metano, ratificando a importância da textura do substrato como coadjuvante do processo de oxidação.

Por meio da análise de componentes principais (Figura 6), foi possível observar a ausência de correlações significativas entre as colunas controle e melhorada com qualquer variável amostrada (concentração de metano no biogás bruto, umidades dos solos e temperaturas dos solos e ambiente). Também é possível observar que as temperaturas de ambas as colunas, assim como as umidades, apresentaram correlações entre si, uma vez que tais vetores estão muito próximos no gráfico de ordenação.

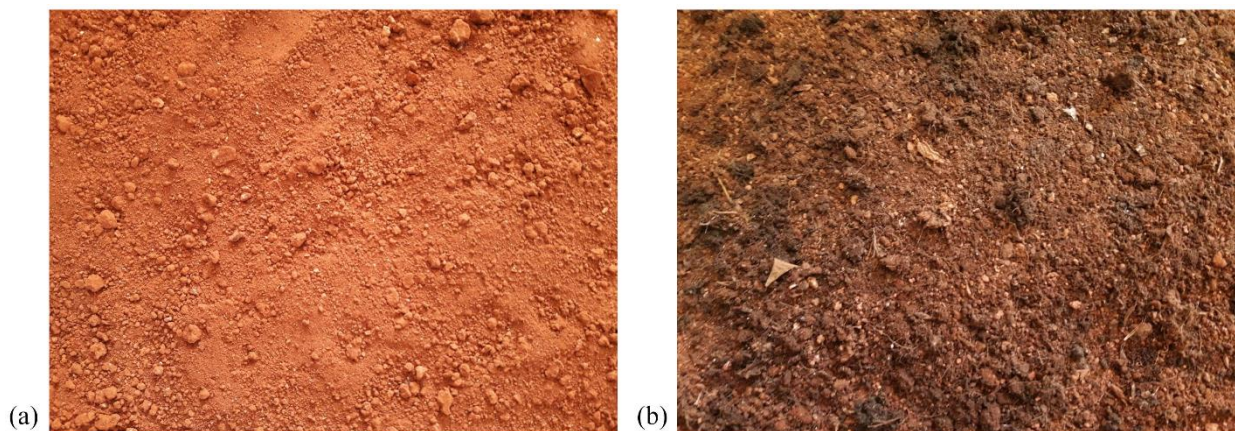


Figura 5. Aspecto dos substratos (superfície dos leitos): a) biofiltro controle; b) biofiltro melhorado. Fonte: Os autores

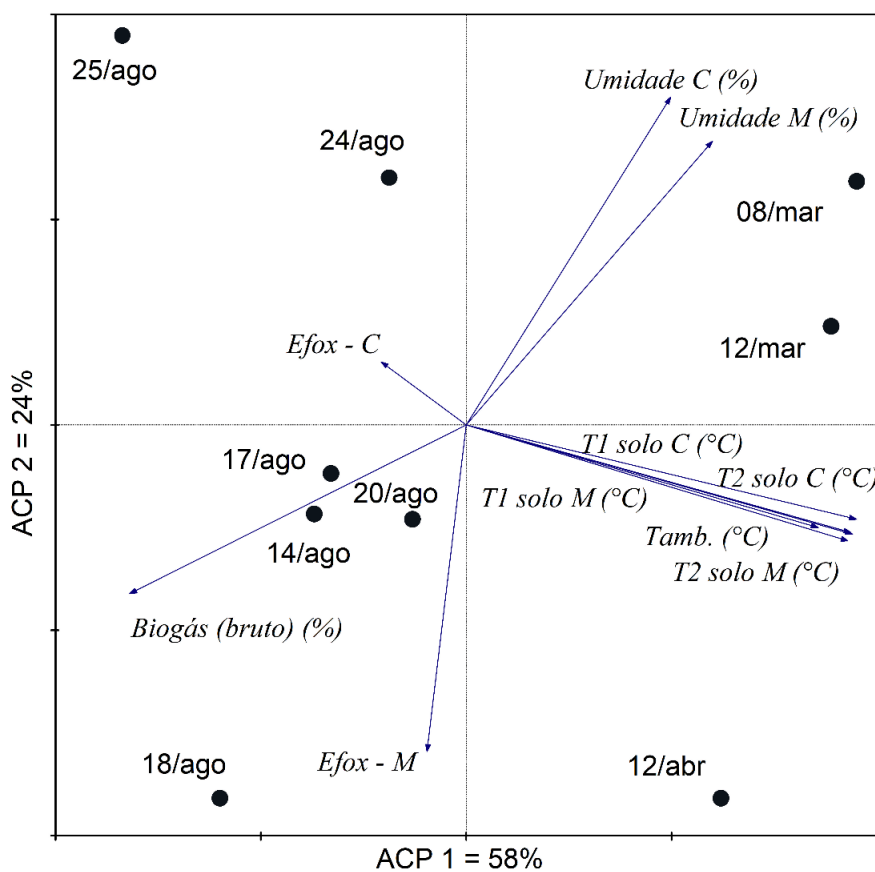


Figura 6. Análise de componentes principais do biogás nos dois biofiltros (controle e melhorado).

O vetor que representa a eficiência de oxidação de metano na coluna melhorada (Efox-M) ocupou o quadrante inferior do gráfico de ordenação, enquanto o vetor que representa a eficiência de oxidação de metano na coluna controle (Efox-C), ocupou o quadrante superior, o que demonstra eficiências de oxidação distintas entre as colunas. Assim, os resultados da ACP corroboram a hipótese de que as eficiências de oxidação são distintas devido aos nutrientes e à microbiota das colunas estudadas.

Conclusão

Este estudo avaliou o desempenho de um biofiltro com solo convencional de camada de cobertura de aterro sanitário enriquecido com espuma de estação de tratamento de efluentes domésticos (com elevado teor de matéria orgânica). Todo o experimento foi realizado no próprio aterro e, portanto, sujeito a variações nos principais parâmetros do processo, como temperatura, umidade e concentração de metano no biogás. A eficiência média de oxidação de metano verificada no biofiltro melhorado (com espuma) ao longo das nove campanhas de monitoramento foi de 95.2%, comparativamente ao biofiltro controle (84.7%, contendo apenas o solo original do aterro), confirmando a biofiltração como um biossistema eficaz na mitigação de gases de efeito estufa emitidos a partir da camada de cobertura de aterros sanitários.

No que se refere aos parâmetros monitorados do processo, o maior teor de matéria orgânica (e nutrientes) presentes na porção superior do biofiltro melhorado demonstrou estreita relação com o desempenho desse biossistema, ratificando a influência da matéria orgânica e razão C/N na eficiência de oxidação do metano. Por outro lado, pelo menos para as condições avaliadas do experimento, não se observou relação entre o desempenho dos biofiltros com a concentração do metano no biogás, bem como a umidade e temperaturas dos leitos filtrantes.

Mesmo sendo uma ferramenta viável e de baixo custo na gestão de gases de efeito estufa em aterros sanitários (uma vez que pode se valer do uso dos mais variados substratos orgânicos como agregado do solo), a aplicação de sistemas bióticos em aterros brasileiros voltados à mitigação de GEE ainda é bastante incipiente. No contexto da nova Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que pressupõe a total substituição de vazadouros a céu aberto por aterros sanitários, a expectativa é de que a demanda por pesquisas e projetos que contemplem a implementação de biossistemas *in loco* voltados especificamente ao controle de GEE seja cada vez mais frequente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior” (CAPES, no âmbito do Programa Ciência Sem Fronteiras – CsF, Processo #88881.030497/2013-01) e à Fundação Araucária do Paraná (no âmbito da Chamada Pública 09/2016) pelo suporte financeiro concedido ao projeto.

Referências

- Abushammala, M.F.M., Basri, N.E.A., Irwan, D., Younes, M.K. (2014) Methane oxidation in landfill cover soils: a review. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **08**(01), 1-14. <https://doi.org/10.5572/ajae.2014.8.1.001>
- Albanna, M., Fernandes, L. (2009) 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*, **13**(03), 187-195. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2009\)13:3\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2009)13:3(187))
- Brandt, E.M.F., Duarte, F.V., Vieira, J.P.R., Melo, V.M., Souza, C.L., Araújo, J.C., Chernicharo, C.A.L. (2016) The use of novel packing material for improving methane oxidation in biofilters. *Journal of Environmental Management*, **182**(01), 412-420. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.075>
- Brasil. Presidência da República – Casa Civil (2010) *Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências*. Brasília, DF. Acesso em 06 de fevereiro 2021, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- Cabral, A.R, Moreira, J.F.V., Jugnia, L.-B. (2010) Biocover performance of landfill methane oxidation: experimental results. *Journal of Environmental Engineering*, **136**(08), 785-793. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000182](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000182)
- Cantarella, H., Quaggio, J.A., Raji, B.V. (2001) Determinação de matéria orgânica. In Raji B.V., Andrade, J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A. (Eds.) *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*, Instituto Agrônomo, Campinas (SP, Brasil), 173-180.
- Cantarella, H., Trivelin, P.C.O. (2001) Determinação de nitrogênio total em solo. In Raji B.V., Andrade J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A. (Eds.) *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*, Instituto Agrônomo, Campinas (SP, Brasil), 262-269.
- Capanema, M.A., Cabral, A.R. (2012) Evaluating methane oxidation efficiencies in experimental landfill biocovers by mass balance and carbon stable isotopes. *Water, Air, & Soil Pollution*, **223**(09), 5623-5635. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1302-6>
- Costa, M.D., Mariano, M.O.H., Araújo, L.B., Jucá, J.F.T. (2018) Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **23**(01), 77-90. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018160393>
- Czepiel, P.M., Crill, P.M., Harriss, R.C. (1995) Environmental factors influencing the variability of methane oxidation in temperate zone soils. *Journal of Geophysical Research*, **100**(D5), 9359-9364. <https://doi.org/10.1029/95JD00542>
- Devinsky, J.S., Deshusses, M.A., Webster, T.S. (1999) *Biofiltration for Air Pollution Control*. CRC Lewis Publishers, Boca Raton (USA), 299pp.
- Duan, Z., Kjeldsen, P., Scheutz, C. (2022) Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations. *Waste Management*, **139**(15), 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.023>
- Fedrizzi, F., Cabana, H., Ndanga, É.M., Cabral, A.R. (2018) Biofiltration of methane from cow barns: Effects of climatic conditions and packing bed media acclimatization. *Waste Management*, **78**(08), 669-676. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.038>
- Ferdowsi, M., Veillette, M., Ramirez, A.A., Jones, J.P., Heitz, M. (2016) Performance evaluation of a methane biofilter under steady state, transient state and starvation conditions. *Water, Air & Soil Pollution*, **227**(168), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2838-7>
- Franqueto, R., Cabral, A.R., Capanema, M.A., Schirmer, W.N. (2019) Fugitive methane emissions from two experimental biocovers constructed with tropical residual soils: field study using a large flux chamber. *Detritus*, **07**, 119-127. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13844>
- Gebert, J., Groengroeft, A., Miehlisch, G. (2003) Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters. *Waste Management*, **23**(07), 609-619. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00105-3](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00105-3)

- Huang, Q., Zhang, Q., Cicek, N., Mann, D. (2011) Biofilter: A promising tool for mitigating methane emission from manure storage. *Journal of Arid Land*, **03**(01), 61-70. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1227.2011.00061>
- Huber-Humer, M., Gebert, J., Hilger, H. (2008) Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. *Waste Management & Research*, **26**(01), 33-46. <https://doi.org/10.1177/0734242X07087977>
- Huber-Humer, M., Röder, S., Lechner, P. (2009) Approaches to assess biocover performance on landfills. *Waste Management*, **29**(07), 2092-2104. 10.1016/j.wasman.2009.02.001
- Humer, M., Lechner, P. (1999) Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. *Waste Management & Research*, **17**(06), 443-452. <https://doi.org/10.1177/0734242X9901700607>
- Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR) (2020) *Solicitação de dados meteorológicos* – UNICENTRO [mensagem pessoal]. Recebido por <sam@idr.pr.gov.br> em 10 de junho 2020.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W. (1988) *Applied multivariate analysis*. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 607 pp.
- Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018) *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. Urban Development; Washington, DC: World Bank. 272p. Acesso em 17 de fevereiro 2022, disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Kettunen, R.H., Einola, J.-K.M., Rintala, J.A. (2006) Landfill methane oxidation in engineered soil columns at low temperature. *Water, Air, and Soil Pollution*, **177**(01), 313-334. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9176-0>
- Kjeld, A. (2013) *Microbial methane oxidation at the Fífholt landfill in Iceland*. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental), Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Iceland, Reykjavik, Iceland, 87pp.
- La, H., Hettiaratchi, J.P.A., Achari, G., Dunfield, P.F. (2018) Biofiltration of methane. *Bioresource Technology*, **268**(11), 759-772. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.043>
- Lee, Y.-Y., Jung, H., Ryu, H.-W., Oh, K.-C., Jeon, J.-M., Cho, K.-S. (2018) Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill. *Waste Management*, **71**(01), 277-286. 10.1016/j.wasman.2017.10.037
- Mei, C., Yazdani, R., Han, B., Mostafid, M.E., Chanton, J., VanderGheynst, J., Imhoff, P. (2015) Performance of green waste biocovers for enhancing methane oxidation. *Waste Management*, **39**(05), 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.042>
- Ndanga, E.M., Bradley, R.L., Cabral, A.R. (2015) Does vegetation affect the methane oxidation efficiency of passive biosystems? *Waste Management*, **38**(04), 240-249. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.031>
- Nikiema, J., Heitz, M. (2009) The influence of the gas flow rate during methane biofiltration on an inorganic packing material. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **87**(01), 136-142. <https://doi.org/10.1002/cjce.20131>
- Olague, E.P. (2021) The potential ozone impacts of landfills. *Atmosphere*, **12**, 877. [10.3390/atmos12070877](https://doi.org/10.3390/atmos12070877)
- Park, S., Lee, C.-H., Ryu, C.-R., Sung, K. (2009) Biofiltration for reducing methane emissions from modern sanitary landfills at the low methane generation stage. *Water, Air & Soil Pollution*, **196**, 19-27. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9754-4>
- Rose, J.L., Mahler, C.F., Izzo, R.L.S. (2012) Comparison of the methane oxidation rate in four media. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, **36**(03), 803-812. 10.15 <https://doi.org/90/S0100-06832012000300011>
- RStudio Team (2020). RStudio. Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>
- Sadasivam, B.Y., Reddy, K.R. (2014) Landfill methane oxidation in soil and bio-based cover systems: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **13**(01), 79-107. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9325-z>
- Scheutz, C., Kjeldsen, P., Bogner, J.E., De Visscher, A., Gebert, J., Hilger, H.A., Huber-Humer, M., Spokas, K. (2009) microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Management & Research*, **27**(05), 409-455. <https://doi.org/10.1177/0734242X09339325>
- Shangari, G.S., Agamuthu, P. (2012) Enhancing methane oxidation in landfill cover using brewery spent grain as Biocover. *Malaysian Journal of Science*, **31**(02), 91-97. <https://doi.org/10.22452/mjs.vol31no2.8>
- Spokas, K.A., Bogner, J.E. (2011) Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils. *Waste Management*, **31**(05), 823-832. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.12.018>



- United States Environmental Protection Agency – USEPA (2011) *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills*. 28 p. Acceso em 14 de fevereiro 2021, disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/landfills.pdf>
- Van Tienen, Y.M.S., de Lima, G.M., Mazur, D.L., Martins, K.G., Stroparo, E.C., Schirmer, W.N. (2021) Methane oxidation biosystem in landfill fugitive emissions using conventional cover soil and compost as alternative substrate - a field study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **23**, 2627-2637 <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02179-9>
- Walkley A., Black, I.A. (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, **37**(01), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>