

SUBMETIDO 03/11/2021

APROVADO 04/02/2022

PUBLICADO ON-LINE 19/02/2022

PUBLICADO 10/07/2023

EDITORA ASSOCIADA
Gardênia Marinho Cordeiro

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6451>


ARTIGO ORIGINAL

Biossistemas aplicados à mitigação de metano em emissões fugitivas de aterros sanitários: uma breve revisão

 Waldir Nagel Schirmer ^{[1]*}

 Matheus Vitor Diniz Gueri ^[2]

 Liliana Andréa dos Santos ^[3]

 Guilherme José
Correia Gomes ^[4]

 José Fernando Thomé Jucá ^[5]

[1] wanasch@hotmail.com

Departamento de Engenharia Ambiental,
Universidade Estadual do Centro-Oeste
(UNICENTRO), Brasil

[2] mdg.sustentabilidade@gmail.com

Instituto Latino-Americano de Tecnologia,
Infraestrutura e Território (ILATIT),
Universidade Federal da Integração
Latino-Americana (UNILA), Brasil

[3] liliana.andrea.santos@gmail.com

[4] guilhermejcgomes@hotmail.com

[5] jucah@ufpe.br

Departamento de Engenharia
Civil, Universidade Federal de
Pernambuco (UFPE), Brasil

RESUMO: Os biossistemas têm sido uma importante ferramenta na mitigação de gases de efeito estufa emitidos a partir da camada de cobertura de aterros sanitários. Independentemente da sua configuração, essa tecnologia baseia-se, fundamentalmente, no princípio da oxidação biológica de gases de natureza orgânica, inorgânica, odorantes, entre outros, formados na massa residual durante as diferentes fases de decomposição dos resíduos sólidos urbanos. O presente estudo traz uma síntese dos biossistemas mais comumente reportados na literatura aplicados à oxidação passiva de metano em camadas de cobertura de aterros sanitários. Além disso, discute os principais parâmetros relacionados à eficiência desse bioprocessamento, como temperatura, pH, umidade do meio, carga de metano aplicada no biossistema, teor de matéria orgânica e nutrientes presentes no leito biofiltrante, bem como a porosidade do meio. De um modo geral, o uso de substratos de elevado teor de matéria e baixo custo, como rejeitos de processos industriais e estações de tratamento de efluentes domésticos, turfa, composto, entre outros, tem se mostrado uma excelente alternativa como agregado do solo, contribuindo para a redução de gases de efeito estufa no setor de gestão de resíduos sólidos.

Palavras-chave: biorrecobrimento; gases de efeito estufa; poluição atmosférica; resíduos sólidos municipais.

Biosystems applied to methane mitigation in landfill fugitive emissions: a brief review

ABSTRACT: Biosystems have been an important tool for mitigating greenhouse gases emitted from landfill cover layers. Regardless of its configuration, this technology is fundamentally based on the principle of biological oxidation of organic, inorganic and odorant gases, among other gases formed in the waste mass during the different phases of municipal solid waste decomposition. This

*Autor para correspondência.

study presents a literature synthesis of the most commonly reported biosystems applied to passive oxidation of methane in landfill cover layers. Furthermore, it discusses the main parameters related to the efficiency of this bioprocess, such as temperature, pH, moisture in the medium, methane loading rate applied to the biosystem, organic matter and nutrient content present in the biofilter bed, and the porosity of the medium. In general, the use of substrates with high organic matter content and low cost, such as wastes from industrial processes and domestic effluent treatment plants, peat, and compost, has proven to be an excellent alternative as soil amendment, contributing to the reduction of greenhouse gases in the solid waste management sector.

Keywords: *atmospheric pollution; biocover; greenhouse gases; municipal solid wastes.*

1 Introdução

A disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) (em aterros, processos de compostagem, biodigestão, entre outros) figura entre as principais fontes antrópicas de metano (CH₄) para a atmosfera. O teor de metano presente no biogás de aterros sanitários pode variar bastante de acordo com a composição e quantidade do resíduo aterrado, fatores climáticos da região do aterro, além de fatores inerentes às etapas de biodigestão da massa residual, como pH, teor de umidade, teores de carbono e nutrientes, e temperatura do meio; em média, a composição do biogás varia de 50% a 70% no caso do CH₄ e de 30% a 45% no caso do CO₂ (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Em função do maior potencial de aquecimento global do metano em relação ao dióxido de carbono (21 vezes superior), grande parte das atenções voltadas à mitigação de gases de efeito estufa (GEE) em aterros sanitários concentra-se na redução das emissões de metano. Além dos sistemas de “flaring” (combustão do biogás nos drenos verticais), a coleta para aproveitamento do biogás e a otimização do sistema de oxidação de metano na camada de cobertura são exemplos de alternativas que podem ser utilizadas na mitigação de GEE emitidos a partir de aterros sanitários (KJELD, 2013; USEPA, 2011; USEPA, 2013).

No que se refere às alternativas para mitigação de metano emitido a partir da superfície da camada de cobertura (na forma de emissões fugitivas), a adoção de biosistemas baseados na atividade microbiológica de oxidação de metano tem se mostrado viável, altamente eficaz e de baixo custo operacional (ABUSHAMMALA *et al.*, 2014; CHIEMCHAI SRI *et al.*, 2012; DUAN *et al.*, 2021; HAN *et al.*, 2016; HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; KORMI *et al.*, 2018; SADASIVAM; REDDY, 2014). Nesse contexto, diferentes biosistemas e parâmetros do processo têm sido avaliados, de modo a identificar as melhores condições de oxidação do metano, em escala real ou piloto, sob condições de campo e de laboratório. Independentemente da sua configuração (biofiltro, biorrecobrimento, biojanela), esses sistemas utilizam-se das propriedades de bactérias metanotróficas para a conversão de metano em dióxido de carbono, água e biomassa. Trata-se de um processo tipicamente exotérmico, com a liberação de 211 kcal por mol de metano oxidado. O metano consumido é usado como fonte de carbono e energia para o crescimento e manutenção dos microrganismos do meio. Como qualquer processo de biotratamento, essa atividade biológica depende de fatores como a existência de uma população metanotrófica (bactérias oxidantes de metano), fornecimento de oxigênio, nutrientes e umidade necessários a esses microrganismos, pH e temperatura de operação adequados etc. (DEVINNY; DESHUSSES;

WEBSTER, 1999; HUMER; LECHNER, 1999; NIEMCZYK *et al.*, 2021; SADASIVAM; REDDY, 2014; USEPA, 2011).

Várias alternativas de mitigação de GEE em aterros têm sido avaliadas, particularmente aquelas baseadas na atividade de microrganismos metanotróficos. A partir daí, a identificação das melhores condições de trabalho e parâmetros do processo biológico de tratamento de GEE é um elemento crucial na otimização do desempenho desses sistemas (LA *et al.*, 2018). Nesse cenário, o presente trabalho traz uma síntese dos principais bio sistemas reportados na literatura técnica aplicados à mitigação de metano em camadas de cobertura bem como os principais parâmetros relacionados ao processo de bio-oxidação desse importante GEE.

2 Material e métodos

A presente revisão foi elaborada a partir de artigos completos de periódicos indexados nas bases de dados ScienceDirect (Elsevier), Scopus, PubMed e SciELO. Além de manuscritos, a busca também considerou relatórios de agências ambientais internacionais, livros (da área de biotratamento de gases) e teses de doutorado.

Para a seleção dos trabalhos, foram utilizados os seguintes descritores (em inglês, combinados dois a dois de modo a refinar a busca): aterro sanitário; biorrecobrimento; biofiltro; biogás; bio sistema; sistema biótico; biojanela; camada de cobertura; gases de efeito estufa; metano; resíduos sólidos urbanos; metanotróficas; oxidação passiva de metano. Como critério de seleção dos trabalhos, foram considerados apenas aqueles diretamente relacionados ao tema da pesquisa: emissões fugitivas de metano em aterros sanitários; biotratamento de gases de efeito estufa em camada de cobertura de aterros sanitários; parâmetros físicos e químicos associados ao tratamento biológico de gases de efeito estufa em camadas de cobertura.

De um total de mais de 180 trabalhos verificados, 52 artigos foram efetivamente utilizados no presente estudo, o que corresponde a mais de 90% do total dos trabalhos reportados na seção “Referências”.

3 Resultados e discussões

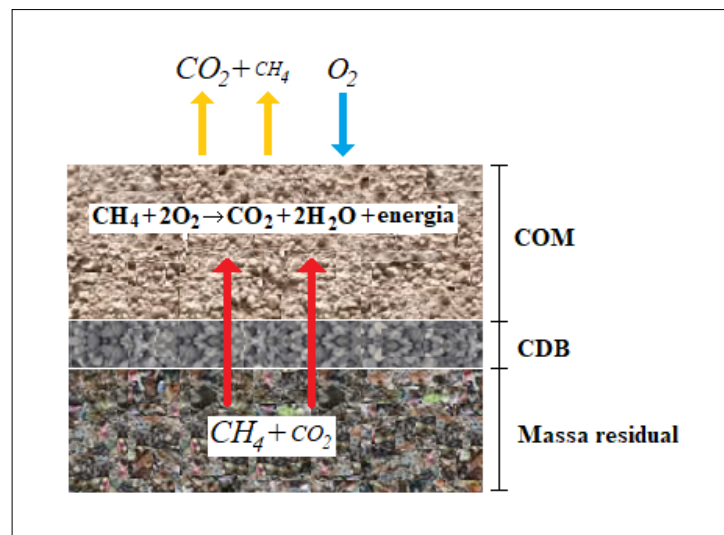
Esta seção aborda os principais aspectos teóricos relacionados à degradação de metano na camada de cobertura melhorada (enriquecida com matéria orgânica) comparativamente àquela com baixo teor de matéria orgânica. Traz ainda um apanhado geral dos principais bio sistemas comumente reportados na literatura técnica: biorrecobrimento, biofiltro e biojanela.

3.1 Bio sistemas aplicados à mitigação de metano em aterros sanitários

A biologia de microrganismos metanotróficos que fazem uso de metano como fonte de carbono e energia é bem reportada na literatura (DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; HANSON; HANSON, 1996; MEYER-DOMBARD; BOGNER; MALAS, 2020). Presentes nos mais variados tipos de substrato (turfa, composto etc.), a capacidade e eficiência desses microrganismos na oxidação do metano depende de vários

parâmetros (detalhados a seguir) e características do meio, quase sempre associadas a substratos porosos, com elevado teor de matéria orgânica. Independentemente da configuração da tecnologia utilizada, os bio sistemas consistem em uma camada de distribuição do biogás (CDB – composta por brita, cascalho etc.) de modo a otimizar a distribuição do gás pela base da camada de cobertura e, acima da CDB, a camada de oxidação do metano (COM) propriamente dita (Figura 1) (AHOUGHALANDARI; CABRAL; LEROUEIL, 2018; HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; NDANGA; BRADLEY; CABRAL, 2015).

Figura 1 ▶
Esquema básico de um bio sistema.
Fonte: elaborada pelos autores



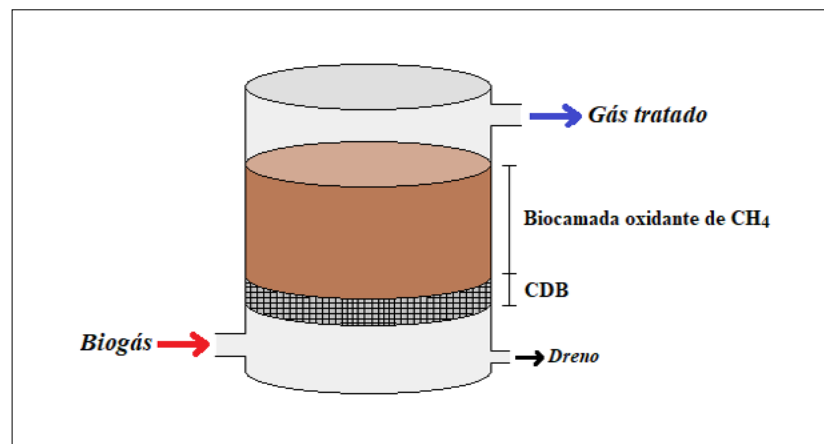
A escolha do material biofiltrante (meio onde os microrganismos metanotróficos estão imobilizados) é um dos principais parâmetros relacionados à eficiência do processo de biodegradação do metano. Propriedades como elevado teor de matéria orgânica, porosidade, suprimento de nutrientes e estabilidade biológica estão entre os principais requisitos necessários ao bom desempenho do biofiltro (ABUSHAMMALA *et al.*, 2014; LA *et al.*, 2018). Entre as opções de substrato mais comumente utilizadas em bio sistemas de mitigação de metano está o composto, um material que eleva a porosidade do meio (mesmo quando usado apenas como agregado do solo), apresenta ótima capacidade de absorção e retenção de água e constitui-se uma fonte de matéria orgânica e de nutrientes necessários à atividade microbiológica (COSTA *et al.*, 2018; HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; PECORINI; IANNELLI, 2020). Cabe ressaltar, entretanto, que o uso de composto como agregado do solo de camada de cobertura em aterros sanitários apresenta como desvantagem a sua baixa disponibilidade, o que requer, muitas vezes, a busca por substratos alternativos (de natureza orgânica ou inorgânica) que consigam manter as propriedades supracitadas. Além do composto, cavaco de madeira, lodo de estação de tratamento de efluentes, turfa, entre outros são alguns dos substratos também comumente avaliados como leito biofiltrante (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; SADASIVAM; REDDY, 2014).

A literatura tem reportado os mais variados bio sistemas, aplicados tanto em escala de campo quanto de laboratório, destinados principalmente à mitigação de metano (embora a oxidação de outros gases, muitos deles em nível de traço, como sulfurados e compostos orgânicos voláteis – COV –, também tenha sido avaliada) (LAKHOUIT *et al.*, 2014; LEE; MOON; CHO, 2017; LEE *et al.*, 2018; MENARD *et al.*, 2012). Entre as tecnologias de biotratamento mais estudadas, biofiltros e biorrecobrimentos foram apontados como “tecnologias-chave” no setor de gestão de resíduos sólidos para a otimização da

oxidação de GEE. Esses dois biosistemas são os mais eficientes e mais comumente citados na literatura técnica no que se refere à mitigação de metano em aterros sanitários (IPCC, 2007; USEPA, 2011).

Uma vez que a produção de biogás na célula do aterro tende a decrescer com o passar do tempo, o funcionamento dos sistemas de *flares* (combustão direta de biogás nos drenos do aterro) passa a ter dificuldades para funcionar, seja pela baixa vazão de biogás ou, ainda, pelo baixo teor de metano presente nesse biogás (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; STREESE; STEGMANN, 2003). Nesse caso, os biofiltros (Figura 2) podem ser uma alternativa interessante de mitigação de GEE. Nesse biosistema, o biogás atravessa uma coluna contendo o leito filtrante (biorreator de leito fixo), onde estão impregnados os microrganismos responsáveis pela degradação do metano. Os biofiltros podem operar em modo passivo ou ativo (se ocorrer bombeamento do biogás para o interior do filtro) e, ainda, em fluxo descendente ou ascendente (conforme o sentido da passagem do biogás pelo interior do biofiltro). Podem ainda operar com a coluna aberta ou fechada.

Figura 2 ▶
Esquema simplificado da configuração mais comum de um biofiltro.
Fonte: elaborada pelos autores



Os biofiltros com o leito aberto têm custo operacional menor, uma vez que não requerem sistema de irrigação periódica do leito. Entretanto, esses biofiltros estão sujeitos à sazonalidade de efeitos meteorológicos, o que pode fazer com que o leito opere em condições fora das faixas ideais de umidade e temperatura. No caso dos biofiltros de leito fechado, embora haja a possibilidade de um maior controle dos parâmetros do processo (temperatura e umidade do leito), estes apresentam custo operacional superior ao daqueles de leito aberto, justamente em função da necessidade de controle da interferência das condições ambientes. Ao contrário dos sistemas de *flares*, cuja queima do biogás pode gerar poluentes secundários, os biofiltros têm como vantagem a geração apenas de vapor d'água e CO₂ (ABUSHAMMALA *et al.*, 2014; DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; LA *et al.*, 2018; SADASIVAM; REDDY, 2014; USEPA, 2011).

Como um típico sistema de biotratamento, alguns requisitos são necessários ao material filtrante do biofiltro (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; HUBER-HUMER; RÖDER; LECHNER, 2009):

- porosidade: com elevada área superficial;
- homogeneidade: de modo a evitar caminhos preferenciais à passagem do biogás pelo leito filtrante;

- boa permeabilidade: de modo a reduzir perdas de carga durante a passagem do biogás pelo leito e, ao mesmo tempo, garantir um tempo de residência adequado à degradação do metano;
- boas condições de manutenção da população metanotrófica: pH adequado, capacidade de retenção de água, disponibilidade de nutrientes etc.

O controle eficiente desses e de outros parâmetros inerentes à operação do biofiltro pode ser a garantia de elevada eficiência de oxidação do metano tratado via biofiltração (ABUSHAMMALA *et al.*, 2014). O uso do biofiltro também tem sido avaliado na mitigação de biogás emitido a partir de fontes pontuais (caso dos drenos verticais) de aterros com operação já finalizada, em que pequenas quantidades de biogás ainda são emitidas mesmo depois de vários anos após o encerramento do aterro (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008). Van Tienen *et al.* (2021) avaliaram a eficiência de oxidação do metano em dois biofiltros instalados no aterro sanitário de Guarapuava (Brasil) utilizando biogás captado a partir do dreno vertical de uma célula de quatro anos. O desempenho do biofiltro enriquecido com composto (mistura do solo original do aterro com composto na camada superior do leito filtrante, com teor final de matéria orgânica de aproximadamente 6%) foi comparado ao desempenho de um biofiltro controle, contendo apenas o solo original do aterro, com teor final de matéria orgânica de aproximadamente 0,8%. Como resultado dos sete meses de monitoramento, os autores observaram uma eficiência global de oxidação de metano de aproximadamente 95% para o biofiltro enriquecido e de aproximadamente 71% para o biofiltro controle, atribuindo essa diferença às melhores condições de oxidação do metano na coluna melhorada (elevado teor de matéria orgânica, suprimento de nutrientes ao meio e elevada capacidade de retenção de água por parte do leito enriquecido).

Comparativamente aos biofiltros, os biorrecobrimentos têm uma aplicação mais abrangente. Os biorrecobrimentos são camadas complementares às camadas de cobertura convencionais do aterro, com maior capacidade de oxidação do metano (USEPA, 2011). Geralmente, solos de aterro usados na camada de cobertura apresentam baixos teores de matéria orgânica e, portanto, têm baixa concentração de nutrientes disponíveis para as bactérias oxidantes de metano. Uma camada de substrato enriquecida (biocamada) é então sobreposta à camada de cobertura convencional de modo a otimizar a oxidação de metano e outros poluentes (em nível de traço) presentes no biogás. Assim como no biofiltro, uma elevada capacidade de oxidação de metano no biorrecobrimento está associada à presença de um substrato com elevada granulometria agregado ao solo, porosidade e alta concentração de matéria orgânica e nutrientes (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008). Franqueto *et al.* (2019) avaliaram, no aterro sanitário municipal de Guarapuava-PR, um biorrecobrimento experimental (com elevado teor de matéria orgânica) comparativamente ao solo original do aterro (com baixo teor de matéria orgânica – aproximadamente 0,4%). A camada enriquecida com matéria orgânica consistia em uma mistura de composto acrescido de solo original do aterro com um teor final de matéria orgânica de aproximadamente 4,5% (Figura 3). Ao longo das 16 campanhas de monitoramento (entre novembro de 2015 e abril de 2016), os autores observaram uma oxidação de metano média de 42% na área controle (com baixo teor de matéria orgânica) e de até 80% na área melhorada, atribuindo a elevada eficiência da camada melhorada às propriedades do composto (como uma maior capacidade de retenção de água) e aos maiores teores de matéria orgânica e nutrientes disponíveis para a atividade metanotrófica.

Figura 3 ▶

Biorrecobrimento experimental (18 m²) do aterro sanitário municipal de Guarapuava-PR.
Crédito: Rafaela Franqueto

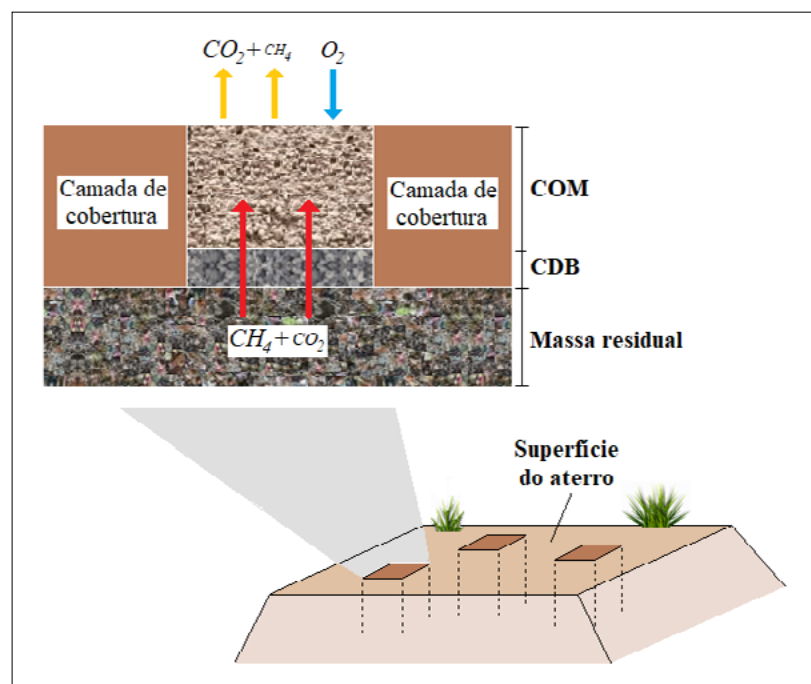


A biojanela é um biossistema instalado diretamente sobre a massa residual. Em função disso, esse biossistema requer uma elevada capacidade de oxidação do metano presente no biogás bruto. Apresenta, como vantagens, facilidade e rapidez de instalação, facilidade de operação e monitoramento (devido às suas pequenas dimensões) e menor custo operacional (se comparado aos biorrecobrimentos). Assim como os dois biossistemas já apresentados, as biojanelas também apresentam duas camadas: CDB, de modo a favorecer a distribuição do biogás pela base do biossistema, e uma camada superior biologicamente ativa (COM), como indicado na Figura 4 (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; JUNG *et al.*, 2019; KJELD, 2013; SCHEUTZ *et al.*, 2011).

Jung *et al.* (2019) avaliaram a remoção simultânea de metano e compostos tipicamente odorantes via biojanela, construída no aterro sanitário de Gwangyang (Coréia do Sul), usando uma mistura orgânica (6,6% de matéria orgânica) de perlita, composto, solo e minhocas, numa proporção de 7:3:4:1, respectivamente, no material do leito. Durante os 224 dias de monitoramento, os autores observaram eficiências de remoção de metano variando entre 59% e 100% e eficiências de remoção superiores a 90% em se tratando de gás sulfídrico (o principal composto associado a odores em aterros).

Figura 4 ▶

Esquema simplificado de uma biojanela.
Fonte: elaborada pelos autores



3.2 Parâmetros físicos e químicos associados ao desempenho de biossistemas

Nesta seção são abordados alguns dos principais parâmetros necessários à boa performance do biossistema, independentemente da configuração adotada (biojanela, biorrecobrimento ou biofiltro).

3.2.1 Temperatura

A temperatura é um dos principais parâmetros associados ao desempenho da atividade microbológica, apresentando um papel relevante na eficiência de oxidação do metano (DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; FEDRIZZI *et al.*, 2018; GEBERT; GROENGROEFT; MIEHLICH, 2003). Microrganismos metanotróficos são sensíveis a variações de temperatura, o que pode afetar o desempenho do biossistema (LA *et al.*, 2018; MEYER-DOMBARD; BOGNER; MALAS, 2020). A elevação da temperatura do meio implica em um aumento na cinética de degradação do contaminante. Por outro lado, se a temperatura do meio cai, o metabolismo celular também desacelera, reduzindo a cinética de degradação do poluente (DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; LEE *et al.*, 2018).

Durante o biotratamento, observa-se ainda um aumento na temperatura do meio em função do calor gerado pela exotermicidade do processo (HUETE *et al.*, 2018). Embora a literatura aponte uma faixa bastante ampla de temperatura adequada à atividade metanotrófica (HUANG *et al.*, 2011; MENARD *et al.*, 2012), os valores ótimos de temperatura para a oxidação de metano podem variar bastante de acordo com as condições do estudo e/ou processo: 15 °C a 30 °C (MOR *et al.*, 2006), 25 °C a 30 °C (BOECKX; VAN CLEEMPUT, 1996), 25 °C a 35 °C (PARK *et al.*, 2009) e 38 °C (GEBERT; GROENGROEFT; MIEHLICH, 2003). Mesmo preferindo condições mesofílicas, as bactérias metanotróficas podem se adaptar a temperaturas mais baixas (observadas nos meses de inverno, por exemplo), mantendo o desempenho do biossistema (GEBERT; GROENGROEFT; MIEHLICH, 2003). O calor liberado durante a reação (um processo tipicamente exotérmico) pode deixar o sistema mais “independente” de variações externas de temperatura (HUMER; LECHNER, 1999).

3.2.2 pH e umidade

Embora as metanotróficas apresentem tolerância a variações de pH, elas apresentam melhor desempenho para a oxidação do metano em sistemas com pH próximo à neutralidade (DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; HUBER-HUMER; RÖDER; LECHNER, 2009; SAARI; RINNAN; MARTIKAINEN, 2004; SCHEUTZ; KJELDSSEN, 2004).

Assim como a temperatura, a umidade é um dos principais parâmetros no processo de oxidação de metano em biossistemas, pois influencia diretamente a atividade microbológica (PARK *et al.*, 2009; ZEISS, 2006). Um substrato com alto teor de umidade dificulta a difusão de gases (O₂ e CH₄) no solo, restringindo o acesso desses gases à população metanotrófica. Por outro lado, um substrato com teor de umidade muito baixo inibe a atividade metanotrófica, dificultando, por exemplo, o fornecimento

de nutrientes a esses microrganismos (BENDER; CONRAD, 1995; KJELD, 2013; PARIATAMBY *et al.*, 2015; SCHEUTZ *et al.*, 2009).

A oxidação de metano pode ocorrer em uma ampla faixa de umidade e os valores ótimos desse parâmetro para a oxidação do metano podem depender do tipo de substrato utilizado no meio filtrante (BENDER; CONRAD, 1995; CHIEMCHAISRI *et al.*, 2012). Scheutz e Kjeldsen (2004) avaliaram a capacidade de oxidação de metano em amostras do solo do aterro Skellingsted Landfill (Dinamarca). Nesse estudo, os valores ótimos de umidade na oxidação de metano variaram de 18% a 24% w/w (faixa investigada entre 6% e 50% w/w), enquanto os valores ótimos de pH variaram de 6,5 a 7,5 (faixa investigada entre 2,6 e 9,9). Shangari e Agamuthu (2012), avaliando a oxidação de metano em um biorrecobrimento constituído de uma mistura de grãos de cevada e composto na proporção de 7:3 (cevada:composto), verificaram valores ótimos de umidade de 66% e pH 6,0 (faixas investigadas: umidade variou de 50% a 80% e o pH de 4 a 8). Frasi *et al.* (2020) avaliaram a eficiência de oxidação de metano em biofiltros (colunas em escala de laboratório) preenchidos com uma mistura de composto e areia sob diferentes condições de umidade (20%, 30% e 40%, em massa úmida) e carga de metano, obtendo eficiências de oxidação superiores a 80% nas condições de 30% de umidade e cargas inferiores a 200 g_{CH₄}.m⁻².d⁻¹. No estudo de Van Tienen *et al.* (2021), anteriormente mencionado, os autores verificaram os valores de 95% de oxidação de metano no biofiltro enriquecido numa faixa de umidade que variou entre 41% e 59% durante os sete meses de monitoramento.

3.2.3 Carga de metano

A carga de metano aplicada na entrada do sistema é inversamente proporcional ao tempo de residência desse composto no biossistema. Dessa forma, o aumento desse parâmetro desfavorece a eficiência de remoção de metano no meio. Uma vez que a carga sobre o sistema aumenta, a velocidade superficial do gás (razão entre a vazão volumétrica e a área da seção transversal da coluna) no meio também aumenta, havendo uma redução no gradiente de concentração da fase gasosa no leito e, assim, afetando a transferência de metano da fase gasosa para o biofilme (meio onde os microrganismos se desenvolvem) (BRANDT *et al.*, 2016; DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; LA *et al.*, 2018; NIKIEMA; HEITZ, 2009).

De fato, a literatura técnica tem mostrado que altas eficiências de remoção de metano podem estar condicionadas à aplicação de baixas cargas (CAPANEMA; CABRAL, 2012). Brandt *et al.* (2016) avaliaram a eficiência de remoção de metano em baixas concentrações (0,17% v/v a 3,63% v/v) em biofiltros com 3 diferentes meios filtrantes, variando parâmetros como cargas e tempos de residência (*Empty Bed Residence Times* – EBRT). Independentemente do meio avaliado, o aumento da carga de metano levou a uma redução na conversão de metano. Da mesma forma, observou-se uma tendência de redução na conversão de metano com a redução nos tempos de residência do gás ao longo das três colunas avaliadas.

3.2.4 Teor de matéria orgânica e nutrientes

Os materiais com elevados teores de matéria orgânica e nutrientes têm se mostrado ótimos substratos para biossistemas em termos de eficiência de oxidação de metano (ABUSHAMMALA *et al.*, 2014; HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008).

De fato, os substratos com elevado teor de matéria orgânica constituem-se uma importante fonte de carbono e nutrientes para a atividade metanotrófica (ALBANNA; FERNANDES, 2009). Composto, lodo (de estação de tratamento de efluentes), resíduos de jardinagem, entre outros resíduos com elevado teor de matéria orgânica têm sido comumente usados como substrato de metanotróficas em biosistemas. O trabalho de Franqueto *et al.* (2019) é exemplo da aplicação de composto visando à otimização na mitigação de metano em biorrecobrimento.

No caso de biofiltros à base de composto, uma queda de desempenho na operação desse biosistema pode ocorrer a longo prazo, ocasionada pela deterioração da sua estrutura ou, ainda, pelo decaimento na concentração de nutrientes do meio. Nesses casos, recomenda-se a troca do leito filtrante ou mesmo a reposição de nutrientes do meio (DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; HWANG *et al.*, 2007). Além de ser fonte de nutrientes e de carbono, a adição de matéria orgânica também favorece a manutenção da umidade do meio por mais tempo (capacidade de retenção da água) (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; HUMER; LECHNER, 1999).

3.2.5 Porosidade

A porosidade do meio também é outro importante fator na eficiência de oxidação do metano e pode ser obtida, nesse caso, pela razão entre o volume de vazios e o volume total do leito filtrante. Na maioria dos casos, uma porosidade entre 40% e 80% garante um fluxo gasoso adequado no meio filtrante (DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999). Isso porque substratos porosos facilitam a troca gasosa entre o oxigênio do ar atmosférico e o metano (do biogás) no material filtrante (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; KJELD, 2013; LA *et al.*, 2018). A maior porosidade está, inclusive, relacionada a um maior tempo de retenção do metano no meio e a uma maior área superficial específica do leito filtrante, corroborando sua maior eficiência de oxidação no biosistema (DEVINNY; DESHUSSES; WEBSTER, 1999; HUMER; LECHNER, 1999). A literatura tem mostrado que materiais “volumosos” (de granulometria mais grosseira) como madeira picada, resíduos de jardinagem, composto etc. são bastante adequados como agregados do solo em processos que visam à maior oxidação do metano (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008; VAN TIENEN *et al.*, 2021).

4 Considerações finais

No Brasil, a substituição gradual de vazadouros a céu aberto por aterros sanitários, preconizada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tem sido um passo muito importante na gestão de RSU e, conseqüentemente, na minimização de gases de efeito estufa. Mesmo sendo uma importante ferramenta na gestão de GEE, estudos de aplicação de biosistemas em aterros sanitários brasileiros visando à otimização das propriedades da camada de cobertura na oxidação de GEE ainda são bastante incipientes no país.

A substituição dos chamados “lixões” por aterros controlados e sanitários também demanda a implementação de sistemas de controle eficientes de emissão de GEE, emitidos na forma de emissões tanto pontuais (pelos drenos) quanto fugitivas (pela camada de cobertura). O controle de emissões gasosas pela camada de cobertura requer atenção especial, dada a heterogeneidade da camada em termos de permeabilidade desses gases através dessa cobertura final.

Parâmetros geotécnicos (grau de compactação, granulometria do solo usado na camada, fissuras etc.) são mais comumente reportados na literatura técnica e são alguns dos fatores que podem influenciar um maior ou menor particionamento de gases da massa residual para a atmosfera. Entretanto, além desses parâmetros, a aplicação de biosistemas como agregado do solo na oxidação de GEE certamente pode ser um coadjuvante importante no controle de gases dessa natureza. Assim, a escolha do melhor (mais eficaz) biosistema a ser aplicado deve considerar as especificidades da planta (unidade de disposição dos RSU) e do local a ser implementado. Condições climáticas, disponibilidade de resíduos usados como agregado do solo, custo logístico de transporte do resíduo até o aterro, entre outros, são fatores que também devem ser avaliados pelos gestores no estudo de viabilidade do projeto.

Financiamento

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Araucária do Paraná (Chamada nº 09/2016), pelo apoio financeiro à pesquisa.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABUSHAMMALA, M. F. M.; BASRI, N. E. A.; IRWAN, D.; YOUNES, M. K. Methane oxidation in landfill cover soils: a review. **Asian Journal of Atmospheric Environment**, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2014.8.1.001>.

AHOUGHALANDARI, B.; CABRAL, A. R.; LEROUEIL, S. Elements of design of passive methane oxidation biosystems: fundamental and practical considerations about compaction and hydraulic characteristics on biogas migration. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 36, p. 2593-2609, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10706-018-0485-z>.

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. DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2009\)13:3\(187\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2009)13:3(187)).

BENDER, M.; CONRAD, R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity. **Soil, Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 12, p. 1517-1527, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00104-M](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00104-M).

BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT, O. Methane oxidation in a neutral landfill cover soil: influence of moisture content, temperature, and nitrogen-turnover. **Journal of Environmental Quality**, v. 25, n. 1, p. 178-183, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500010023x>.

BRANDT, E. M. F.; DUARTE, F. V.; VIEIRA, J. P. R.; MELO, V. M.; SOUZA, C. L.; ARAÚJO, J. C.; CHERNICHARO, C. A. L. The use of novel packing material for improving methane oxidation in biofilters. **Journal of Environmental Management**, v. 182, n. 1, p. 412-420, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.075>.

CAPANEMA, M. A.; CABRAL, A. R. Evaluating methane oxidation efficiencies in experimental landfill biocovers by mass balance and carbon stable isotopes. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 223, n. 9, p. 5623-5635, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1302-6>.

CHIEMCHAISRI, C.; CHIEMCHAISRI, W.; KUMAR, S.; WICRAMARACHCHI, P. N. Reduction of methane emission from landfill through microbial activities in cover soil: a brief review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 4, p. 412-434, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/10643389.2010.520233>.

COSTA, M. D.; MARIANO, M. O. H.; ARAÚJO, L. B.; JUCÁ, J. F. T. 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**, v. 23, n. 1, p. 77-90, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018160393>.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. (ed.). **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. Weinheim: Wiley, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527621705>.

DEVINNY, J. S.; DESHUSSES, M. A.; WEBSTER, T. S. **Biofiltration for air pollution control**. Boca Raton: CRC Press, 1999.

DUAN, Z.; HANSEN, P. O. R.; SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. Mitigation of methane and trace gas emissions through a large-scale active biofilter system at Glatved landfill, Denmark. **Waste Management**, v. 126, n. 1, p. 367-376, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.023>.

FEDRIZZI, F.; CABANA, H.; NDANGA, É. M.; CABRAL, A. R. Biofiltration of methane from cow barns: effects of climatic conditions and packing bed media acclimatization. **Waste Management**, v. 78, p. 669-676, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.038>.

FRANQUETO, R.; CABRAL, A. R.; CAPANEMA, M. A.; SCHIRMER, W. N. Fugitive methane emissions from two experimental biocovers constructed with tropical residual soils: field study using a large flux chamber. **Detritus**, v. 7, p. 119-127, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13844>.

FRASI, N.; ROSSI, E.; PECORINI, I.; IANNELLI, R. Methane oxidation efficiency in biofiltration systems with different moisture content treating diluted landfill gas. **Energies**, v. 13, n. 11, p. 1-15, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/en13112872>.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; MIEHLICH, G. Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters. **Waste Management**, v. 23, n. 7, p. 609-619, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00105-3](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00105-3).

HAN, J.-S.; MAHANTY, B.; YOON, S.-U.; KIM, C.-G. Activity of a methanotrophic consortium isolated from landfill cover soil: response to temperature, pH, CO₂, and porous

adsorbent. **Geomicrobiology Journal**, v. 33, n. 10, p. 878-885, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/01490451.2015.1123330>.

HANSON, R. S.; HANSON, T. E. Methanotrophic bacteria. **Microbiological Reviews**, v. 60, n. 2, p. 439-471, 1996. DOI: <https://dx.doi.org/10.1128/mr.60.2.439-471.1996>.

HUANG, Q.; ZHANG, Q.; CICEK, N.; MANN, D. Biofilter: a promising tool for mitigating methane emission from manure storage. **Journal of Arid Land**, v. 3, n. 1, p. 61-70, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1227.2011.00061>.

HUBER-HUMER, M.; GEBERT, J.; HILGER, H. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management & Research**, v. 26, n. 1, p. 33-46, 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.1177/0734242X07087977>.

HUBER-HUMER, M.; RÖDER, S.; LECHNER, P. Approaches to assess biocover performance on landfills. **Waste Management**, v. 29, n. 7, p. 2092-2104, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.001>.

HUETE, A.; COBOS-VASCONCELOS, D.; GÓMEZ-BORRAZ, T.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; NOYOLA, A. Control of dissolved CH₄ in a municipal UASB reactor effluent by means of a desorption – Biofiltration arrangement. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 383-391, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.061>.

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. DOI: <https://dx.doi.org/10.1177/0734242X9901700607>.

HWANG, J. W.; JANG, S. J.; LEE, E. Y.; CHOI, C. Y.; PARK, S. Evaluation of composts as biofilter packing material for treatment of gaseous *p*-xylene. **Biochemical Engineering Journal**, v. 35, n. 2, p. 142-149, 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2007.01.008>.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: mitigation of climate change**. Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MEYER, L. A. (ed.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg3>. Acesso em: 19 fev. 2022.

JUNG, H.; OH, K.-C.; RYU, H.-W.; JEON, J.-M.; CHO, K.-S. Simultaneous mitigation of methane and odors in a biowindow using a pipe network. **Waste Management**, v. 100, p. 45-56, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.004>.

KJELD, A. **Microbial methane oxidation at the Fíflholt landfill in Iceland**. 2013. 87 p. Thesis (Master in Environmental Engineering) – Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Iceland, Reykjavik, 2013.

KORMI, T.; MHADHEBI, S.; BEL HADJ ALI, N.; ABICHOU, T.; GREEN, R. Estimation of fugitive landfill methane emissions using surface emission monitoring and Genetic Algorithms optimization. **Waste Management**, v. 72, p. 313-328, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.024>.

LA, H.; HETTIARATCHI, J. P. A.; ACHARI, G.; DUNFIELD, P. F. Biofiltration of methane. **Bioresource Technology**, v. 268, p. 759-772, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.043>.

LAKHOUIT, A.; SCHIRMER, W. N.; JOHNSON, T. R.; CABANA, H.; CABRAL, A. R. Evaluation of the efficiency of an experimental biocover to reduce BTEX emissions from landfill biogas. **Chemosphere**, v. 97, p. 98-101, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.120>.

LEE, E.-H.; MOON, K.-E.; CHO, K.-S. Long-term performance and bacterial community dynamics in biocovers for mitigating methane and malodorous gases. **Journal of Biotechnology**, v. 242, p. 1-10, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.12.007>.

LEE, Y.-Y.; JUNG, H.; RYU, H.-W.; OH, K.-C.; JEON, J.-M.; CHO, K.-S. Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill. **Waste Management**, v. 71, p. 277-286, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.037>.

MENARD, C.; RAMIREZ, A. A.; NIKIEMA, J.; HEITZ, M. Biofiltration of methane and trace gases from landfills: a review. **Environmental Reviews**, v. 20, n. 1, p. 40-53, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1139/a11-022>.

MEYER-DOMBARD, D'A. R.; BOGNER, J. E.; MALAS, J. A Review of landfill microbiology and ecology: A call for modernization with 'next generation' technology. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, n. 1127, p. 1-22, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2020.01127>.

MOR, S.; DE VISSCHER, A.; RAVINDRA, K.; DAHIYA, R. P.; CHANDRA, A.; VAN CLEEMPUT, O. Induction of enhanced methane oxidation in compost: temperature and moisture response. **Waste Management**, v. 26, n. 4, p. 381-388, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.005>.

NDANGA, É. M.; BRADLEY, R. L.; CABRAL, A. R. Does vegetation affect the methane oxidation efficiency of passive biosystems? **Waste Management**, v. 38, p. 240-249, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.031>.

NIEMCZYK, M.; BERENJKAR, P.; WILKINSON, N.; LOZECZNIK, S.; SPARLING, R.; YUAN, Q. Enhancement of CH₄ oxidation potential in bio-based landfill cover materials. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 146, p. 943-951, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.035>.

NIKIEMA, J.; HEITZ, M. The influence of the gas flow rate during methane biofiltration on an inorganic packing material. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, n. 1, p. 136-142, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/cjce.20131>.

PARIATAMBY, A.; CHEAH, W. Y.; SHRIZAL, R.; THAMLARSON, N.; LIM, B. T.; BARASARATHI, J. Enhancement of landfill methane oxidation using different types of organic wastes. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 5, p. 2489-2496, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3600-3>.

PARK, S.; LEE, C.-H.; RYU, C.-R.; SUNG, K. Biofiltration for reducing methane emissions from modern sanitary landfills at the low methane generation stage. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 196, p. 19-27, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11270-008-9754-4>.

PECORINI, I.; IANNELLI, R. Landfill GHG reduction through different microbial methane oxidation biocovers. **Processes**, v. 8, n. 5, 591, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/pr8050591>.

SAARI, A.; RINNAN, R.; MARTIKAINEN, P. J. Methane oxidation in boreal forest soils: kinetics and sensitivity to pH and ammonium. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 36, n. 7, p. 1037-1046, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.01.018>.

SADASIVAM, B. Y.; REDDY, K. R. Landfill methane oxidation in soil and bio-based cover systems: a review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 13, n. 1, p. 79-107, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11157-013-9325-z>.

SCHEUTZ, C.; FREDENSLUND, A. M.; CHANTON, J.; PEDERSEN, G. B.; KJELDSEN, P. Mitigation of methane emission from Fakse landfill using a biowindow system. **Waste Management**, v. 31, n. 5, p. 1018-1028, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.024>.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. Environmental factors influencing attenuation of methane and hydrochlorofluorocarbons in landfill cover soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 33, n. 1, p. 72-79, 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.2134/jeq2004.7200>.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P.; BOGNER, J. E.; DE VISSCHER, A.; GEBERT, J.; HILGER, H. A.; HUBER-HUMER, M.; SPOKAS, K. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. **Waste Management & Research**, v. 27, n. 5, p. 409-455, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1177/0734242X09339325>.

SHANGARI, G. S.; AGAMUTHU, P. Enhancing methane oxidation in landfill cover using brewery spent grain as biocover. **Malaysian Journal of Science**, v. 31, n. 2, p. 91-97, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.22452/mjs.vol31no2.8>.

STREESE, J.; STEGMANN, R. Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters. **Waste Management**, v. 23, n. 7, p. 573-580, 2003. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00097-7](https://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00097-7).

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills**. Durham, NC, EUA: USEPA, 2011. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/landfills.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2022.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 2010-2030**. EPA-430-R-13-011. Washington, DC: USEPA, 2013. Disponível em: <https://www.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases/global-mitigation-non-co2-ghgs-report-2010-2030>. Acesso em: 18 fev. 2022.

VAN TIENEN, Y. M. S.; LIMA, G. M.; MAZUR, D. L.; MARTINS, K. G.; STROPARO, E. C.; SCHIRMER, W. N. Methane oxidation biosystem in landfill fugitive emissions using conventional cover soil and compost as alternative substrate – a field study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, p. 2627-2637, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10098-021-02179-9>.

ZEISS, C. A. Accelerated methane oxidation cover system to reduce greenhouse gas emissions from MSW landfills in cold, semi-arid regions. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 176, p. 285-306, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11270-006-9169-z>.