

Camada de cobertura oxidativa para redução da emissão do gás metano em áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos

Rafaella de Moura Medeiros

Mestra em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, Brasil, rafaella.moura@ufpe.br

Adjane Damasceno de Oliveira

Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, Brasil, adjanedeoliveira@gmail.com

Antônio Italcly de Oliveira Júnior

Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, Brasil, antonio.italcly@ufpe.br

Maria Odete Holanda Mariano

Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, Brasil, odete.mariano@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá

Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, Brasil, jucah@ufpe.br

RESUMO: As camadas de cobertura oxidativa nos locais de disposição final desempenham um papel crucial na mitigação dos gases de efeito estufa (GEE) e nas mudanças climáticas. Essas camadas promovem a oxidação do metano (CH_4), principal GEE emitido em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, convertendo-o em dióxido de carbono (CO_2), que possui menor potencial de aquecimento global. Reduzir as emissões de CH_4 é essencial, visto que é aproximadamente 28 vezes mais poluente que o CO_2 em um período de 100 anos. Além disso, as camadas de cobertura oxidativa contribuem para a minimização das emissões fugitivas de CH_4 , controlando o fluxo de biogás e promovendo condições favoráveis para o crescimento de bactérias metanotróficas, responsáveis pela oxidação do CH_4 . Essa estratégia é fundamental para atender aos compromissos de redução de emissões estabelecidos nos acordos internacionais, como o Acordo de Paris, e para enfrentar os desafios das mudanças climáticas globais. Investir na implementação e aprimoramento das camadas de cobertura oxidativa contribui para mitigar os impactos das emissões de GEE nos locais de disposição final, cooperando para um futuro mais sustentável e resiliente.

PALAVRAS-CHAVE: oxidação de gases, biocobertura, bactérias metanotróficas, geotecnia ambiental.

ABSTRACT: Oxidative cover layers at final disposal sites play a crucial role in mitigating greenhouse gases (GHG) and climate change. These layers promote the oxidation of methane (CH_4), the main GHG emitted in landfills, controlled landfills and dumpsites, converting it into carbon dioxide (CO_2), which has a lower global warming potential. Reducing CH_4 emissions is essential, as it is approximately 28 times more polluting than CO_2 over a 100-year period. Furthermore, the oxidative cover layers contribute to minimizing fugitive CH_4 emissions, controlling the flow of biogas and promoting favorable conditions for the growth of methanotrophic bacteria, responsible for the oxidation of CH_4 . This strategy is essential to meet the emissions reduction commitments established in international agreements, such as the Paris Agreement, and to face the challenges of global climate change. Investing in the implementation and improvement of oxidative coverage layers is essential to mitigate the impacts of GHG emissions at final disposal sites and contribute to a more sustainable and resilient future.

KEYWORDS: gas oxidation, biocover, methanotrophic bacteria, environmental geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório do Banco Mundial, a população terrestre gerou cerca de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no ano de 2016, e cerca de 33% desse montante não recebeu o gerenciamento de maneira correta. Estima-se que, para o ano de 2050, haja um incremento nessa na geração e que os valores globais devam atingir o patamar de 3,40 bilhões de toneladas anuais (Kaza et al., 2018).

E, conforme apresentado no Diagnóstico Temático do Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), do ano de 2023 com referência ao ano de 2022, no Brasil foram geradas 63,8 milhões de toneladas de RSU, das quais 62,5 foram dispostas em aterros sanitários (73,7%), aterros controlados (11,9%) e lixões (14,3%) (SNIS, 2024). O Brasil, assim como muitos países em desenvolvimento, caminha, a passos lentos, para o encerramento dos lixões e dos aterros controlados. De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) e com o Programa Nacional Lixão Zero, ao final do ano de 2018, existiam mais de 3.000 locais que não atendiam ao preconizado na legislação (MMA, 2022).

O setor de resíduos sólidos emitiu 2,14 milhões de toneladas de metano (MtCH_4), cerca de 59,86 milhões de toneladas de gás carbônico equivalente (MtCO_2e), no mundo, no ano de 2022; ressalta-se que tal conversão utilizou o poder poluidor do metano (CH_4) (SEEG, 2024). Constatou-se, por meio do histórico de dados do SEEG, que houve um crescimento contínuo ao longo dos anos, da ordem de 426% entre os anos de 1990 e 2022. Nesse contexto, Nisbet et al. (2020) ressaltam a necessidade de ações urgentes para que as emissões de CH_4 estejam alinhadas com o proposto no Acordo de Paris e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por exemplo.

O processo de disposição final dos resíduos sólidos em aterros sanitários, com o decorrer do tempo, em ambiente anaeróbio, gera lixiviado e gases, sendo esse último comumente conhecido como biogás (Scheutz et al., 2009; Scheutz et al., 2011). O biogás é composto, principalmente, pelos gases CH_4 e CO_2 , na proporção de 50-60% e de 40-50%, respectivamente (Scheutz et al., 2009; Zhang et al., 2013; Duan; Scheutz; Kjeldsen, 2022). Destaca-se que a geração de tais gases também é reportada em locais de disposição final inadequados, como os aterros controlados e os lixões.

Ambos os gases são considerados gases de efeito estufa (GEE); e, a estimativa é que o CH_4 seja 28 vezes mais poluente que o CO_2 para um período de 100 anos (IPCC, 2021; USEPA, 2021). Nesse contexto, Duan, Scheutz e Kjeldsen (2022) ressaltam que apesar dos diversos esforços para que haja a captura e utilização do CH_4 nos aterros sanitários, a emissão por parte destes nunca é completamente evitada, devendo haver o estabelecimento de outras medidas de mitigação, como as camadas de cobertura oxidativa.

A camada de cobertura oxidativa, um dos tipos de camada de cobertura final alternativa em áreas de disposição de RSU, consiste em uma mistura entre o solo e o composto orgânico estabilizado que, por meio das bactérias metanotróficas, possui a capacidade de oxidar o CH_4 em CO_2 , resultando na mitigação da emissão incontrolada do metano. Tais camadas possuem, também, uma capacidade maior de retenção de água, resultando na minimização do surgimento de fissuras. Assim, a camada de cobertura oxidativa tem se apresentado como uma alternativa frente à necessidade de materiais adequados para o recobrimento das massas de resíduos sólidos, além de contribuir para redução de emissão de gases relacionados às mudanças climáticas (Thomassen; Scheutz; Kjeldsen, 2019; Ahmadi et al., 2020).

2 OBJETIVO

O estudo desenvolvido por meio deste trabalho teve por objetivo evidenciar a aplicabilidade da camada de cobertura oxidativa em locais de disposição final de RSU com vista à redução da emissão do CH_4 e, consequentemente, atendimento aos acordos para a atenuação do aquecimento global e das mudanças climáticas.

3 METODOLOGIA

O trabalho foi estruturado por meio de realização do estado da arte em 03 (três) temáticas distintas, mas que se correlacionam em prol do objetivo elucidado no item acima, a saber: 1. questões climáticas; 2. emissões fugitivas provenientes de locais de disposição final, e 3. camada de cobertura oxidativa.

Para tanto, realizou-se a consulta a trabalhos publicados em âmbito nacional e internacional, além do acesso aos acordos, leis e documentos relacionados ao assunto, consulta a relatórios e documentos dos principais órgãos nacionais e internacionais envolvidos com as temáticas informadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os levantamentos realizados tem-se a apresentação dos itens a seguir elencados, em que se faz o destaque para o quão crucial é a redução da emissão dos GEE em prol da mitigação dos impactos negativos e proteção de um futuro sustentável para as gerações futuras.

4.1 Efeito estufa e aquecimento global

O CH₄ é o segundo gás de efeito estufa, de origem antropogênica mais abundante na atmosfera, antecedido somente pelo CO₂ e os aterros sanitários são uma das principais fontes antropogênicas de emissão de GEE. Deste modo, as emissões do biogás para a atmosfera nestas estruturas possuem uma parcela de contribuição para o aquecimento global (Wickramarachchi et al., 2011).

Assim, as mudanças no sistema climático tendem a se tornarem maiores e mais intensas devido ao aumento do aquecimento global; dentre essas: aumento na frequência e intensidade de extremos quentes, ondas de calor marinhas, precipitação intensa, secas agrícolas e ecológicas (em algumas regiões), aumento na ocorrência de ciclones tropicais intensos e reduções no gelo marinho do Ártico (IPCC, 2022).

No sentido de entender as ações tomadas acerca do tema, verificou-se que, no âmbito do cenário mundial, desde 1992, com a assinatura da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, tem se preocupado com a pauta dos impactos ocasionados pelos GEE; onde destaca-se ainda a realização das Conferências das Partes (COP), em especial, a COP-3, a COP-13, a COP-21, a COP-26 e a COP-27. Na agenda nacional, faz-se o destaque, de forma breve, para a Lei Federal nº 12.114 (2009), que versa sobre a criação do Fundo Nacional sobre Mudança de Clima (FNMC); Lei Federal nº 12.187 (2009), estabelecendo a Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC); Decreto Federal nº 11.075 (2022), que estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas e institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Sinare). Em adição, ressalta-se que o Brasil elaborou o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA), em 2016.

No escopo da Agenda 2030, assinada na COP-21, que trata dos ODS, destaca-se que, além do ODS13 – Ação contra a mudança global do clima, para o setor de resíduos sólidos podem ser incorporados o ODS11 – Cidades e comunidades sustentáveis, o ODS12 – Consumo e produção responsáveis e o ODS17 – Parcerias e meios de implementação. Em adição, o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, ressalta que manter o aumento da temperatura global em 1,5°C ainda é possível, mas apenas se houver ações de caráter imediato e efetivo. O mundo, em pior caso, deverá ter o pico das emissões de GEE até 2025 (sendo este o ano limite para eventuais aumentos nas emissões), reduzir essas emissões quase pela metade até 2030, atingir o zero líquido até meados do século e, ao mesmo tempo, assegurar uma transição justa e equitativa (IPCC, 2022).

Para minimizar essas emissões, ações devem ser tomadas em todas as áreas, como a redução de emissões gasosas em aterros sanitários, não apenas em operação, mas também nos encerrados, o que demonstra que o uso de camadas de coberturas eficientes pode colaborar para mudança positiva do cenário.

4.2 Emissões fugitivas

Mesmo que haja um sistema de coleta/extração do biogás nos aterros, uma parcela ainda continua sendo emitida pela camada de cobertura, e, por vezes, com valores significantes (Spokas et al., 2006; Börjesson; Samuelsson; Chanton, 2007).

De acordo com a United States Environmental Protection Agency (USEPA), Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, mesmo que haja sistemas de captura e queima do CH₄ nos aterros sanitários, cerca de 25% do CH₄ produzido é emitido na atmosfera através da camada de cobertura (USEPA, 2010).

Estas emissões variam com o tempo e o espaço e são influenciadas por fatores externos e internos, como precipitação pluviométrica, pressão atmosférica, umidade do solo e presença de fissuras (caminhos preferenciais de fluxo) na camada de cobertura, bem como as técnicas operacionais usadas no aterro sanitário

(Bian; Xin; Chai, 2018; Damasceno; Carvalho; Machado, 2019; Huang et al., 2022). Além da emissão dos gases por meio das fissuras, têm-se como pontos vulneráveis, em termos de emissões, o sistema de coleta de lixiviado e os vazamentos nas tubulações do sistema de coleta dos gases (Huang et al., 2022).

Neste sentido, Kim (2016) destaca a importância de se realizar o monitoramento dessas emissões, uma vez que são necessárias para a determinação dos impactos ambientais e os riscos à saúde humana. Maciel (2009) adiciona ainda que por meio desse monitoramento é possível quantificar as emissões fugitivas de CH₄ e, deste modo, determinar a eficiência das camadas de cobertura e do sistema de coleta de gases.

As emissões fugitivas nos aterros sanitários variam na faixa de 0 – 5400 (g.m⁻².dia⁻¹), como reportado por diversos autores em seus estudos, a citar Di Bella, Di Trapani e Viviani (2011), Maciel e Jucá (2011), Scheutz et al. (2014), Damasceno, Carvalho e Machado (2019) e Li et al. (2020).

Ao se analisar as emissões provenientes de uma camada de cobertura convencional (apenas solo) e de uma camada de cobertura oxidativa, a investigação de Lopes (2011) apresentou que a faixa de variação de emissão de CH₄ na camada de cobertura convencional foi de 0,0 a 984,70 g.m⁻².dia⁻¹, e nas camadas oxidativas foi de 0,0 a 151,90 g.m⁻².dia⁻¹. Do mesmo modo, de acordo com os estudos realizados por Oliveira (2013), a camada convencional apresentou fluxos de CH₄ nos valores de 1,72 a 122,97 g.m⁻².dia⁻¹ e na camada oxidativa de 0 a 6,75 g.m⁻².dia⁻¹.

4.3 Camada de cobertura

As camadas de cobertura final dos locais de disposição final de RSU devem ser projetadas e instaladas de modo a garantir uma manutenção adequada e resistência aos processos de erosão, recalques dos resíduos e fenômenos de subsidência.

A camada de cobertura final possui diversas finalidades: minimização da geração de lixiviado na massa interna de resíduos por meio do controle de infiltração de águas de chuva; controle do fluxo do biogás produzido por processos de digestão anaeróbia no interior da massa de resíduos; isolamento da massa de resíduos do ambiente externo; evita a dispersão de materiais de baixo peso ocasionada pela ação do vento; impede a presença de vetores que transmitem doenças, tais como, insetos, pássaros e ratos; e permite o crescimento de vegetação após sua instalação (Cossu; Muntoni; Cappai, 2000; Marinho; Teixeira, 2013).

Dentre os tipos de camada de cobertura tem-se a convencional e as alternativas. Esta primeira consiste em sistemas formados por solos argilosos ou solos argilosos com geossintéticos. Já as camadas alternativas utilizam materiais e sistemas de funcionamento/operação que variam a depender, principalmente, das condições climáticas do local e da oferta dos materiais.

4.3.1 Camada de cobertura oxidativa

Huber-Humer, Gebert e Hilger (2008) e Ahmadi et al. (2020) definem que a camada oxidativa ou biocobertura é a camada que possibilita condições ambientais para o crescimento das bactérias metanotróficas, para fins de realização da oxidação do CH₄, sendo um meio poroso e biologicamente ativo. Duan, Scheutz e Kjeldsen (2022) ressaltam ainda que esse meio deve ser rico em material orgânico, como o composto orgânico.

Thomasen, Scheutz e Kjeldsen (2019) e Ahmadi et al. (2020) destacam que as camadas de cobertura oxidativa têm se mostrado como uma estratégia eficiente para a mitigação de GEE pelos aterros sanitários. Feng et al. (2017) enfatizam a importância do uso da camada oxidativa, especialmente para aterros sanitários de pequeno porte e/ou antigos, onde a instalação de um sistema de coleta de gás pode não ser financeiramente viável devido à baixa quantidade de gases gerados.

Scheutz et al. (2009), Feng et al. (2017) e Garbo e Cossu (2017) também reforçam, que o sistema de cobertura oxidativa é uma das tecnologias mais econômicas disponíveis para mitigar as emissões fugitivas de CH₄ nos aterros sanitários.

Durante o processo de transição do gás para a atmosfera, o mesmo necessita atravessar a camada de cobertura, deste modo, as bactérias metanotróficas, na presença de O₂, realizam a oxidação do CH₄, apresentando como produtos o CO₂ e a água (H₂O) (Abichou et al. 2009).

As bactérias metanotróficas são um grupo de bactérias obrigatoriamente aeróbias que realizam a oxidação do CH₄ produzindo CO₂ e H₂O, como é apresentado na equação 1 (Reddy et al., 2014). Alguns autores, como Salim (2011) e Majdinasab e Yuan (2017), ainda adicionam os subprodutos como a biomassa

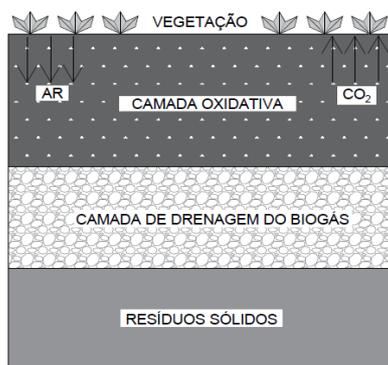
celular (consequência do desenvolvimento das bactérias) e energia (na forma de calor, por ser uma reação exotérmica) a Equação 1.



Chavan e Kumar (2018) ressaltam que o fator de maior importância para a eficiência da oxidação do CH_4 é a disponibilidade de O_2 , e destacam também a ligação que existe entre essa oferta de O_2 e a permeabilidade ao gás da camada.

Uma configuração de layout da camada de cobertura oxidativa é apresentada na Figura 1, que consiste em uma camada de distribuição altamente porosa acima da massa de resíduos sólidos, podendo ser cascalho ou brita, seguida de uma camada que possua a mistura do solo com o composto orgânico, sendo nessa camada realizada a oxidação do CH_4 (Abushammala et al., 2014).

Figura 1 – Exemplo de sistema de camada de cobertura oxidativa



Fonte: Adaptado de Abushammala et al. (2014).

Garbo e Cossu (2017) também apontam que tal tipo de camada exige baixos custos de manutenção e mão de obra, sendo assim, adequada para países desenvolvidos, em desenvolvimento ou subdesenvolvidos. Porém, é necessário que estas sejam projetadas e modificadas para cada local onde estão inseridos os depósitos de resíduos, o que acarretaria demandar esforços significativos de pesquisa e desenvolvimento.

Um destaque pode ser dado aos países que se encontram em desenvolvimento e que tentam encerrar os lixões e os aterros controlados. A camada de cobertura oxidativa apresenta-se como uma alternativa atrativa para reduzir as emissões de GEE, uma vez que permite usufruir dos créditos de carbono e reduz os riscos para a comunidade. Além disso, se comparada com outros métodos de recobrimento, os geossintéticos, por exemplo, apresenta a vantagem de possuir materiais disponíveis na própria região e não demanda mão de obra técnica especializada (Abichou, 2020).

Ao se trazer este dado para a realidade brasileira é possível destacar a significativa quantidade de lixões que precisam ser remediados, pois estes também se caracterizam como responsáveis pela emissão de CH_4 .

Cabe ainda elencar que para o devido funcionamento e eficiência da camada de cobertura é necessário que alguns fatores sejam levados em consideração. De acordo com Gebert, Groengroeft e Pfeiffer (2011) estes fatores são regulados pela combinação das propriedades físicas e químicas dos materiais de cobertura, fluxo dos gases e condições climáticas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No cenário mundial, em que a necessidade da redução da emissão dos GEE encontra-se cada vez mais evidente, o uso das camadas de cobertura oxidativa em locais de disposição final de RSU pode significar um ganho para o meio ambiente e sociedade. A implementação de camadas de cobertura oxidativa emerge como uma estratégia eficaz de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Essas camadas, compostas por uma mistura de solo e composto orgânico, promovem a oxidação do CH_4 em CO_2 , reduzindo assim as emissões

fugitivas de GEE. Além disso, contribuem para a retenção de água e minimizam a formação de fissuras, melhorando a eficiência do recobrimento dos resíduos sólidos.

A camada de cobertura oxidativa é apontada como uma alternativa viável para países em desenvolvimento, como o Brasil, que enfrentam desafios na gestão adequada de resíduos sólidos e na redução das emissões de GEE. Portanto, mostra-se importante investir nessa tecnologia como forma de colaborar para o alcance de metas de sustentabilidade e das políticas e acordos sobre mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa que permitiu o desenvolvimento e financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abichou, T.; Mahieu, K.; Yuan, L.; Chanton, J.; Hater, G. Effects of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in a landfill cover. *Waste Management*, v. 29, n. 5, p. 1595-1601, 2009.

Abichou, T. Using methane biological oxidation to partially finance sustainable waste management systems and closure of dumpsites in the Southern Mediterranean region. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, v. 5, n. 1, p. 1-5, 2020.

Abushammala, M. F.; 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.

Ahmadi, N.; Mosthaf, K.; Scheutz, C.; Kjeldsen, P.; Rolle, M. Model-based interpretation of methane oxidation and respiration processes in landfill biocovers: 3-D simulation of laboratory and pilot experiments. *Waste Management*, v. 108, p. 160-171, 2020.

Bian, R.; Xin, D.; Chai, X. A Simulation model for estimating methane oxidation and emission from landfill cover soils. *Waste Management*, v. 77, pp. 426-434, 2018.

Börjesson, G.; Samuelsson, J.; Chanton, J. Methane oxidation in Swedish landfills quantified with the stable carbon isotope technique in combination with an optical method for emitted methane. *Environmental science & technology*, v. 41, n. 19, p. 6684-6690, 2007.

Cossu, R.; Muntoni, A.; Cappai, G. *Tecniche di copertura finale delle discariche e confronto tra alternative*. In: Seminario Internazionale "La progettazione delle nuove discariche e la bonifica di quelle vecchie", Padova, 2000.

Chavan, D.; Kumar, S. 2018. Reduction of methane emission from landfill using biocover as a biomitigation system: A review. *Indian Journal of Experimental Biology*, 56, 451 -459.

Damasceno, L. A. G.; Carvalho, M. F.; Machado, S. L. Fugitive methane emissions through the cover system of a Brazilian landfill cell. *Journal of Environmental Engineering and Science*, v. 14, n. 3, p. 168-178, 2019.

Di Bella, G.; Di Trapani, D.; Viviani G. Evaluation of methane emissions from Palermo municipal landfill: comparison between field measurements and models. *Waste management*, v. 31, n. 8, p. 1820-1826, 2011.

Duan, Z.; Scheutz, C.; Kjeldsen, P. Mitigation of methane emissions from three Danish landfills using different biocover systems. *Waste Management*, v. 149, p. 156-167, 2022.

Feng, S.; Ng, C. W. W.; Leung, A. K.; Liu, H. W. Numerical modelling of methane oxidation efficiency and coupled water-gas-heat reactive transfer in a sloping landfill cover. *Waste Management*, v. 68, p. 355-368, 2017.

Garbo, F.; Cossu, R. *Landfill cover systems - an overview*. In: Proceedings Sardinia 2017/Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium. Santa Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2017.

Gebert, J.; Groengroeft, A.; Pfeiffer, E. M. Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 43, n. 9, p. 1759-1767, 2011.

Huang, D.; Du, Y.; Xu, Q.; Ko, J. H. Quantification and control of gaseous emissions from solid waste landfill surfaces. *Journal of Environmental Management*. v. 302 (A), p. 114001, 2022.

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.

IPCC. *Climate Change 2022. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 11 abril 2024.

Kaza, S.; Yao, L.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington: World Bank Publications. 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acesso em: 03 Julho 2022.

Kim, K-H. The need for practical input data for modeling odor nuisance effects due to a municipal solid waste landfill in the surrounding environment. *Environment International*, n. 87, p. 116-117, 2016.

Li, S.; Meng, B.; Yue, B.; Gao, Q.; Ma, Z.; Zhang, W.; Li, T.; Yu, L. Seasonal CH₄ and CO₂ effluxes in a final covered landfill site in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, v. 725, p. 138355, 2020.

Lopes, R. L. *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

Maciel, F. J. *Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

Maciel, F. J.; Jucá, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, v. 31, n. 5, p. 966-977, 2011.

Majdinasab, A.; Yuan, Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review. *Ecological Engineering*, v. 104, p. 116-130, 2017.

Marinho, F. A. M.; Teixeira, P. F. Air permeability of cover soil from Bandeirantes landfill in Sao-Paolo, Brazil. In: Caicedo et al. (eds) *Advances in unsaturated Soils*, London: Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62095-6, 2013.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares)*. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf. Acesso em: 01 Julho 2022.

Nisbet, E. G.; Fisher, R. E.; Lowry, D.; France, J. L.; Allen, G.; Bakkaloglu, S.; Broderick, T. J.; Cain, M.; Coleman, M.; Fernandez, J.; Forster, G.; Griffiths, P. T.; Iverach, C. P.; Kelly, B. F. J.; Manning, M. R.; Nisbet-

Jones, P. B. R.; Pyle, J. A.; Townsend-Small, A.; Al-Shalaan, A.; Warwick, N.; Zazzeri, G. Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the Paris agreement. *Reviews of Geophysics*, v. 58, n. 1, p. e2019RG000675, 2020.

Oliveira, L. R. G. *Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

Reddy, K. R.; Yargicoglu, E. N.; Yue, D.; Yaghoubi, P. Enhanced microbial methane oxidation in landfill cover soil amended with biochar. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 140, n. 9, p. 04014047, 2014.

Salim, K. G. *Oxidação passiva do metano em ensaios de coluna simulando camadas de cobertura de aterros sanitários*. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

Sistema de Estimativa de Emissões de Gases (SEEG). *Série Histórica*. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em 11 Abril 2024.

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, 2009a.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). *Diagnóstico Temático – Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, Visão Geral, ano de referência: 2022*. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Snis/RESIDUOS_SOLIDOS/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2023_ATUALIZADO.pdf. Acesso em: 01 Abril 2024.

Ucendo, I. M. B.; Mønster, J. G.; Samuelsson, J.; Kjeldsen, P. Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. *Waste Management*, v. 34, n. 7, p. 1179-1190, 2014.

Spokas, K.; Bogner, J.; Chanton, J. P.; Morcet, M.; Aran, C.; Graff, C.; 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.

Thomasen, T. B.; Scheutz, C.; Kjeldsen, P. Treatment of landfill gas with low methane content by biocover systems. *Waste Management*, v. 84, p. 29-37, 2019.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). *Basic Information about Landfill Gas. Landfill Methane Outreach Program (LMOP)*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>. Acesso em: 18 junho 2021.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). *Methane and nitrous oxide emissions from natural sources*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2010.

Wickramarachchi, P.; Kawamoto, K.; Hamamoto, S.; Nagamori, M.; Moldrup, P.; Komatsu, T. Effects of dry bulk density and particle size fraction on gas transport parameters in variably saturated landfill cover soil. *Waste Management*, v. 31, n. 12, p. 2464-2472, 2011.

Zhang, H.; Yan, X.; Cai, Z.; Zhang, Y. Effect of rainfall on the diurnal variations of CH₄, CO₂, and N₂O fluxes from a municipal solid waste landfill. *Science of the Total Environment*, v. 442, p. 73–76, 2013.