

MONITORAMENTO DE EMISSÕES FUGITIVAS A PARTIR DA CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

MONITORING OF FUGITIVE EMISSIONS FROM LANDFILL COVER LAYER

Rafaela **Franqueto**¹, Eduardo Henrique **Martins**², Alexandre Rodrigues **Cabral**³, Waldir Nagel **Schirmer**^{4*}

¹ Doutoranda em Engenharia Ambiental pela FURB - Universidade Regional de Blumenau (Blumenau/SC, Brasil).

² Mestre em Bioenergia pela UNICENTRO - Universidade Estadual do Centro-Oeste (Guarapuava/PR, Brasil).

³ Doutor em Engenharia Civil. Professor Titular do curso de Engenharia Civil na Universidade de Sherbrooke (Sherbrooke/QC, Canadá).

⁴ Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professor Associado do curso de Engenharia Ambiental na UNICENTRO - Universidade Estadual do Centro-Oeste (Irati/PR, Brasil)

* Endereço: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – CEP 84.505-677 – Irati – PR. E-mail: wanasch@hotmail.com

Submetido em: 07/11/2018; Aceito em: 10/07/2020.

RESUMO

O biogás de aterro sanitário é constituído principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) (ambos gases de efeito estufa). Estes gases, quando não são devidamente gerenciados, podem ocasionar diversos problemas relacionados à poluição atmosférica, em níveis local e global. Mesmo quando aproveitado (nos casos de recuperação energética, por exemplo), boa parte do biogás gerado no processo de decomposição dos resíduos em aterro sanitário escapa pela camada de cobertura na forma de emissões fugitivas, o que exige medidas de mensuração e mitigação de emissões dessa natureza. Nesse contexto, o presente trabalho teve, como principal objetivo, apresentar os principais aspectos relacionados às emissões fugitivas pela camada de cobertura em aterros e os problemas relacionados aos odores provenientes dessas unidades, bem como os principais métodos de controle e medição de gases dessa natureza. O trabalho de revisão foi elaborado após seleção de artigos científicos em bases de dados comumente utilizadas nas áreas de Saneamento e Geotecnia Ambiental. Além de artigos, também foram pesquisadas teses e dissertações, relatórios, normas e protocolos nacionais e internacionais, leis e comunicações governamentais, referentes à disposição de resíduos sólidos municipais, acordos para mitigação de gases de efeitos estufa (GEE), etc. Por fim, o trabalho traz ainda uma abordagem da situação brasileira tanto no cenário local com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), quanto no âmbito internacional, com a ratificação de metas de emissão de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil na Conferência das Partes (COP) 21, em Paris.

Palavras-chave: Câmara de fluxo. Emissões Atmosféricas. Gases de Efeito Estufa. Oxidação Biológica de Metano. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).



ABSTRACT

Landfill biogas (LFG) is mainly composed by methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) (both are greenhouse gases). These gases, when not properly managed, may cause several problems related to air pollution at local and global scales. Even when used (in cases of energy recovery, for example), a large amount of the biogas generated in the process of waste decomposition in landfills can escape through the cover layer as fugitive emissions, which requires pathways to measure and mitigate such emissions (essentially greenhouse gases). In such context, the present work focused on showing the main aspects related to the fugitive emissions from the cover layer in landfills and the problems related to the odour produced by these units, as well as the gas control and measurement methods. This review was prepared from scientific articles of databases commonly used in research areas as Sanitation and Environmental Geotechnics. In addition to the articles, theses and dissertations, reports, national and international standards and protocols, governmental laws and communications, regarding to the disposal of municipal solid waste, agreements for mitigating greenhouse gases (GHG), etc., were also searched. At last, the present work also brings an approach to the Brazilian situation, both from the local scenery regarding the Solid Waste National Policy (PNRS, Brazilian abbreviation) and the international environment with the confirmation of the greenhouse emission targets for Brazil in the Conference of Parties (COP-21) in Paris.

Keywords: Atmospheric emissions. Biological Oxidation of Methane. Flux Chamber. Greenhouse Gases. Municipal Solid Waste (MSW).

INTRODUÇÃO

Estima-se que a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), em nível mundial, superou a casa dos 2 bilhões de toneladas por ano (KARAK; BHAGAT; BHATTACHARYYA, 2012). Essa geração é uma característica relacionada à atividade humana que tende a se agravar com o aumento populacional e crescimento urbano, sobretudo com o aumento da aglomeração populacional em áreas relativamente pequenas (AHMED; ALI, 2004). Outros dois importantes fatores que impactam na maior geração de RSU são aumento de renda da população (CAMPOS, 2012) e aspectos culturais (GODECKE; NAIME; FIGUEIREDO, 2012). Neste cenário, a gestão dos RSU representa um grande desafio na criação de políticas públicas que visam uma destinação apropriada ao resíduo gerado.

O aterro sanitário é uma alternativa de tratamento e disposição final dos RSU largamente empregada, sobretudo nos países em desenvolvimento (CROVADOR; SCHIRMER; CABRAL, 2016). Uma vez dispostos nos aterros, os resíduos são degradados por uma diversidade de comunidades bacterianas, controladas por processos físicos, químicos e biológicos (ALCÂNTARA, 2007). Dessa degradação, são gerados efluentes líquidos (lixiviados) e biogás (WANG *et al.*, 2017). O biogás é um dos principais contribuintes das emissões intensificadoras do efeito estufa, já que apresenta em sua composição

elementos como metano e dióxido de carbono, predominantemente. O biogás também é composto por gases traços, como compostos odoríferos, associados a incômodos olfativos às populações circunvizinhas aos aterros (ABICHOU *et al.*, 2006b; GONZALEZ-VALENCIA *et al.*, 2016). Estes subprodutos da degradação dos RSU podem afetar negativamente o meio ambiente, se não forem devidamente gerenciados.

Uma das formas de recuperação do biogás nos aterros dá-se a partir de sistemas de drenos de captação ou poços de bombeamento (para o aproveitamento nas usinas de geração de energia elétrica). Porém, grande parte deste gás (25 a 55%) atravessa o sistema de cobertura (camada de solo) na forma de emissões fugitivas (SPOKAS *et al.*, 2006; MACHADO *et al.*, 2009; MACIEL; JUCÁ, 2011; STAUB *et al.*, 2011; SAURI-RIANCHO *et al.*, 2013). Por isto, são necessárias técnicas de controle e de monitoramento dos gases em aterro (especialmente em se tratando de emissões pela camada de cobertura) de modo a minimizar emissões dessa natureza.

Uma das técnicas mais relevantes no que se refere à mitigação de emissões gasosas é pela oxidação biológica do metano na camada de cobertura do aterro. A oxidação de metano é um processo que ocorre naturalmente no solo, devido à profusão de organismos metanotróficos no meio. Vários são os fatores que interferem nesta oxidação do gás metano, dentre eles, a quantidade de nutrientes, pH, temperatura, teor de umidade do solo e composição do resíduo (MAJDINASAB; YUAN, 2017).

Na literatura, são encontrados vários estudos que abordam o melhoramento da camada de cobertura em aterros sanitários a partir do favorecimento da oxidação biológica pelas bactérias metanotróficas (GEBERT; GROENGROEFT; MIEHLICH, 2003; BÖRJESSON; SUNDH; SVENSSON, 2004; GEBERT; GROENGROEFT, 2006; RONCATO; AIT-BENICHOU *et al.*, 2009; JUGNIA *et al.*, 2009; CABRAL, 2012). Esta técnica tem sido sugerida devido ao seu baixo custo e por não ter a necessidade de manutenção pós-fechamento da célula do aterro sanitário (IPCC, 2007; MARINHO; SOUSA, 2010). Spokas *et al.* (2006) mostraram que mais de 90% das emissões de metano pela camada de cobertura podem ser reduzidas com uma cobertura final adequada, associada a uma eficiente coleta de gases.

O monitoramento dos gases é também um fator primordial no gerenciamento dos aterros sanitários. Vários métodos são aplicados para quantificar as emissões gasosas das camadas de cobertura do aterro para a atmosfera, sobretudo medições com a técnica de câmara de fluxo (TRÉGOURÈS *et al.*, 1999; ABICHOU *et al.*, 2006a; SCHEUTZ *et al.*, 2009; SAURI-RIANCHO *et al.*, 2013; GALLEGRO *et al.*, 2014). Esta técnica é amplamente aplicada pela adaptabilidade e fácil utilização. É possível medir simultaneamente fluxos de metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos ou quaisquer outros gases com propriedade odorante (FRANQUETO, 2016).

Neste contexto, a presente revisão discute os aspectos relacionados às emissões fugitivas pela camada de cobertura nos aterros sanitários e os problemas atrelados aos odores provenientes dessas unidades, bem como os métodos de controle e medição de gases. Além disso, será abordada a situação brasileira tanto no cenário local com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que prevê o fim dos vazadouros a céu aberto até 2021, quanto no

âmbito internacional, com a ratificação de metas de emissão de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil na Conferência das Partes (COP) 21 em Paris.

METODOLOGIA

O presente trabalho apresenta uma revisão de literatura a partir de artigos indexados nas bases de dados SciELO, ScienceDirect (Elsevier), Scopus (Elsevier), Latindex, comumente utilizadas nas áreas de Saneamento e Geotecnia Ambiental. Para a seleção dos artigos e demais produções científicas, foi utilizada uma combinação de pelo menos dois dos seguintes descritores (em português e em inglês): análise de biogás, aterro sanitário, camada de cobertura, câmara de fluxo, gases de efeito estufa, olfatometria, oxidação passiva de metano, política nacional de resíduos sólidos, resíduos sólidos municipais.

Adotou-se, como critério de inclusão e seleção das referências, apenas publicações (em português e em inglês) que abordavam especificamente o tema de interesse: oxidação biológica de metano em camada de cobertura de aterro sanitário; métodos de medição de emissões fugitivas de biogás (e seus componentes) na camada de cobertura; políticas, acordos e ações governamentais voltadas à mitigação de gases de efeito estufa e, ainda; metodologias de análise de biogás *in situ* e em laboratório. Como critério de exclusão, referências em outro idioma (que não o português e inglês) ou, ainda, publicações que, apesar de estarem relacionados aos descritores, não atendiam aos objetivos deste estudo.

No caso de artigos científicos, especificamente, de um total de mais de 200 trabalhos verificados, 67 foram utilizados no presente estudo (o que corresponde a 64% do total das referências efetivamente utilizadas); destes, 88% são artigos internacionais (em inglês) e 12% são artigos de periódicos nacionais (em português). Além dos artigos, também foram utilizadas teses e dissertações, relatórios, normas e protocolos nacionais e internacionais, leis e comunicações governamentais, referentes à disposição de resíduos sólidos municipais, acordos para mitigação de gases de efeitos estufa (GEE), etc. No caso das teses e dissertações, deu-se preferência a trabalhos desenvolvidos em universidades brasileiras de modo a reportar, neste estudo, a problemática referente aos aterros sanitários e emissão de gases de efeito estufa em unidades do Brasil.

DESENVOLVIMENTO

Resíduos sólidos urbanos e aterro sanitário

Segundo a Norma Brasileira NBR 10.004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resíduos sólidos ou semi-sólidos são aqueles de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Os lodos provenientes de estações de tratamento de água, de equipamentos e instalações de controle de poluição também se enquadram neste conceito, assim como os líquidos cujo lançamento na rede pública de esgotos ou corpos hídricos não é recomendável (ABNT, 2004). Já a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil (Lei Federal nº 12.305/2010, regulamentada pelo Decreto Federal nº 7404/2010), em seu Artigo 13, traz uma

definição mais específica dos resíduos dessa natureza: “a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas; b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana” (BRASIL, 2010).

No Brasil, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos, elaborado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a cobertura da coleta de resíduos no país é de 91,2%, deixando 6,9 milhões de toneladas de resíduos sem coleta, com destino impróprio. Dentre os resíduos coletados, 18% são encaminhados aos lixões (vazadouros a céu aberto), 22,9% aos aterros controlados e 59,1% aos aterros sanitários (ABRELPE, 2017). Diante destes percentuais, observa-se que ainda há uma grande dificuldade na efetivação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Isto porque a PNRS prevê, por parte dos municípios brasileiros, a responsabilidade compartilhada entre governo, sociedade civil e empresas na disposição final adequada de resíduos em aterros sanitários, determinando um prazo para o fim dos vazadouros a céu aberto. Inicialmente, o prazo para que isto ocorresse era até 2014 (BRASIL, 2010), mas com o Projeto de Lei do Senado nº 425, este período foi estendido com prazos proporcionais ao porte populacional e estrutural dos municípios. Destes prazos, o último será em 2021 para os municípios com população inferior a 50.000 habitantes, no Censo 2010 (BRASIL, 2014).

O aterro sanitário é a alternativa mais viável na disposição e tratamento dos RSU, de forma ambientalmente segura e por apresentar menor custo, quando comparada às outras formas de tratamento, como a incineração e a compostagem (STAUB *et al.*, 2011; MACHADO *et al.*, 2009). A Norma Brasileira NBR 8419 da ABNT (1992) define aterro sanitário como sendo:

Uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos sem causar danos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, **cobrindo-os com uma camada de terra** na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se for necessário.

Essa forma de disposição final, aliada a técnicas adequadas de gerenciamento dos aterros, incluindo o controle de gases e de lixiviado, evitam possíveis impactos ambientais causados pelos subprodutos da degradação da massa residual.

Composição e emissão de gases em aterros sanitários

O gás metano representa um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o gás carbônico (IPCC, 2007). Diante disso, as fontes de emissões deste gás precisam ser monitoradas e controladas, incluindo os aterros sanitários.

Na literatura, ainda há divergências quanto à posição que os aterros sanitários assumem no *ranking* de emissões de metano. Segundo Hu e Long (2016), eles ocupam o quarto lugar dentre as atividades antropogênicas que

mais emitem metano; já Karthikeyan, Jane e Balasubramanian (2016) afirmam que os aterros ocupam o terceiro lugar, sendo as atividades agrícolas e minas de carvão as duas maiores fontes antropogênicas mundiais. Nesse contexto, os aterros representam cerca de 20% da emissão global anual de metano na atmosfera (USEPA, 2010). No Brasil, os RSU representam cerca de 12% das fontes emissoras de metano (VAN ELK, 2007).

A alta emissão de metano pelos aterros está diretamente relacionada com a geração de biogás a partir do processo de decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos, isto porque o metano (CH₄) é o principal componente do biogás (45 a 60%), juntamente com o dióxido de carbono (CO₂, de 35 a 50% do biogás) (SPOKAS *et al.*, 2006). O biogás também é constituído por compostos de enxofre, fluorados e outros, alguns dos quais odoríferos (SCHEUTZ *et al.*, 2008; DUCOM *et al.*, 2009). Os compostos odoríferos de destaque são: limoneno, cimeno, benzenos alquilados, acetona, etanol, acetato de etila, ácido acético, butanona, metilmercaptana e sulfeto de hidrogênio (DAVOLI *et al.*, 2003; ZOU *et al.*, 2003; ROMAIN; DELVA; NICOLAS, 2008). O sulfeto de hidrogênio, com cheiro característico de “ovo podre”, é o gás mais abundante dentre os compostos de enxofre (~ 80%), além de ser considerado um dos principais compostos odoríferos no biogás de aterro (KIM, 2006; LEE *et al.*, 2006; DUCOM *et al.*, 2009). A geração deste gás ocorre em áreas isoladas no aterro (caráter não-homogêneo), diferentemente do que ocorre com a produção de metano, que é bem distribuída dentre as camadas de resíduos (LEE *et al.*, 2006).

Principais fatores intervenientes na geração e composição do biogás

A idade, quantidade e composição gravimétrica dos resíduos sólidos em aterro influenciam no teor de matéria orgânica, temperatura da massa residual, teor de umidade, disponibilidade de nutrientes, pH, dentre outros (USEPA, 1991; COOPER *et al.*, 1992). Consequentemente, estes fatores influenciam na emissão e composição de biogás em aterro sanitário (RASI; LÄNTELÄ; RINTALA, 2011).

A produção de biogás em aterros é favorável na maior parte do território brasileiro, isto devido às condições de umidade, temperatura e predominância de matéria orgânica na composição de RSU gerado (ARMANDO, 2013).

Camada de cobertura em aterro sanitário

A camada de cobertura é um recurso de Engenharia que possui a função de fechamento e isolamento dos resíduos do ambiente externo (GUEDES, 2007; MACIEL, 2003), trazendo benefícios como: a minimização, na geração de lixiviado (após o fechamento do aterro), no escoamento superficial, na ressuspensão do solo, no espalhamento do resíduo, nos recalques das camadas de resíduos, bem como a contribuição na prevenção contra a proliferação de vetores, permitindo que o local possa ser utilizado com algum benefício social futuramente (PARO; DA COSTA; COELHO, 2008; TEIXEIRA, 2008).

Além disso, a camada de cobertura colabora na minimização da emissão de gases nos aterros sanitários (GUEDES, 2007), com a oxidação do metano (TEIXEIRA, 2008) e redução de odores (UK ENVIRONMENT AGENCY, 2000). A oxidação do metano na camada de cobertura ocorre a partir da ação

bacteriana no solo, onde o metano é aerobicamente oxidado a dióxido de carbono (GEBERT; GROENGROEFT, 2006). Este processo, como todos os outros processos bioquímicos, depende da disponibilidade dos substratos envolvidos, neste caso, o metano e oxigênio (RACHOR *et al.*, 2011). Por isto, a oxidação biológica é considerada uma alternativa importante para a mitigação de emissões fugitivas a partir de aterros sanitários (KJELDTSEN; FISCHER., 1995; STREESE; STEGMANN, 2003; GEBERT; GROENGROEFT, 2006; HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008).

Dentre os diversos sistemas de cobertura em aterros sanitários, os mais relevantes reportados na literatura são: camada homogênea de argila (com graduações distintas) e, mais recentemente, o emprego de materiais alternativos, como solos com maior percentagem orgânica, lodos de estações de tratamento de água e esgoto, cinzas de processo de incineração, entre outros (MACIEL, 2003; LOPES *et al.*, 2010).

No Brasil, segundo Rose (2009) e Mariano (2008), não há uma padronização quanto ao tipo de solo a ser utilizado na camada de cobertura, nem quanto às características geotécnicas e à espessura em aterros sanitários de RSU. O uso de camadas de cobertura a partir de constituintes alternativos (lodo de ETE, compostagem, etc) é proposto com o objetivo de agregar valor a materiais que antes eram considerados rejeitos. Além disso, estes constituintes são utilizados com o objetivo de otimizar a oxidação biológica dos gases, sobretudo no tratamento de emissões fugitivas de metano (TEIXEIRA, 2008; IPCC, 2007).

O melhoramento das camadas de cobertura em aterros brasileiros, juntamente com o controle das emissões fugitivas podem garantir oportunidades de obtenção de incentivos internacionais, a partir do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), inserido no Protocolo de Quioto. O objetivo deste Mecanismo é auxiliar na redução dos gases do efeito estufa (GEE) em nível mundial (BRITTO, 2006; FELIPETTO, 2007; USEPA, 2010) a partir de mecanismos econômicos, nos quais os países beneficiam-se com a obtenção de créditos de carbono e do cumprimento das metas de redução dos GEE (UNFCCC, 1998; FELIPETTO, 2007; UNFCCC, 2008). Contudo, o Brasil não possui metas obrigatórias no Protocolo de Quioto por fazer parte do grupo dos países em desenvolvimento (chamados não-Anexo I), mas precisa auxiliar na redução das emissões desses gases por meio de ações de mitigação dos GEE. As metas de redução de emissões são definidas nas Conferências das Partes (COP) que ocorrem anualmente. Em 2016, aconteceu no Marrocos a 22ª edição destas conferências (COP 22) para discutir as medidas já definidas na COP 21 em Paris, onde o Brasil se comprometeu a reduzir 37% das emissões de GEE até 2025, chegando a 43% até 2030 (BRASIL, 2016; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016).

Métodos de investigação de emissões fugitivas e quantificação do biogás gerado em aterros sanitários

A gestão dos gases em aterros sanitários depende da quantificação do biogás gerado e das emissões fugitivas. Com isto, é possível determinar a eficiência da camada de cobertura (MACIEL, 2009) e estimar a quantidade de gases que estão sendo emitidos em determinada área de superfície por um

tempo pré-estabelecido, seja em minutos ou horas (EKLUND, 2012). Neste contexto, os modelos matemáticos são uma importante ferramenta na simulação do transporte, oxidação e emissão de CH₄ em solos de cobertura (BIAN; XIN; CHAI, 2018)

A modelagem matemática utilizada nas estimativas do potencial de geração de biogás em aterros brasileiros baseia-se em critérios e experiências internacionais, utilizando parâmetros referenciais de países desenvolvidos (BOSCOV, 2008; CANDIANI, 2011). Tais modelagens são importantes na comparação/complementação com outros métodos (como os métodos de campo), apresentando vantagens, como o baixo custo e resultados rapidamente observáveis (ALEXANDER; BURKLIN; SINGLETON, 2005; KORMI *et al.*, 2017).

Dentre os vários modelos existentes, o LandGem, proposto pela EPA, é um dos modelos mais utilizados devido a sua simplicidade. É um modelo matemático de primeira ordem com uso recomendado na avaliação do potencial de geração de biogás em aterros com capacidade total superior a 2,5 milhões de toneladas (MMT) de resíduos dispostos (KUMAR; SHARMA, 2014). Os dois parâmetros principais do LandGem são L₀, que representa o potencial de produção de metano (m³ Mg⁻¹ de resíduo úmido) e k, que representa a taxa de decaimento de primeira ordem associada à decomposição de resíduos (ano⁻¹) (ALEXANDER; BURKLIN; SINGLETON, 2005). O LandGem é usado também pelas agências norte-americanas, como forma de regular as emissões de gases de aterro. Na Europa, tem-se dado preferência à redução do biogás na fonte; nesse caso, os gestores de aterro devem emitir relatórios discriminando as emissões totais de GEE a partir dessas fontes.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) também propõe outro tipo de modelo matemático de primeira ordem que, diferentemente do LandGEM, permite inserir valores de carbono orgânico degradável (COD) para cada tipo de resíduo, levando a previsões mais precisas.

No entanto, as taxas de geração e emissões de biogás resultantes destas modelagens matemáticas são frequentemente imprecisas, decorrente de valores *inputs* que, algumas vezes, não correspondem à realidade (BOURN *et al.*, 2019). Além disso, estudos comparativos mostraram que pode-se obter resultados diferentes mesmo quando empregados os mesmos valores *inputs* nas modelagens matemáticas (KORMI *et al.*, 2017). Assim, enfatiza-se a necessidade de utilização de outras técnicas complementares para medição de emissões e geração de biogás.

O método do gás traçador e a técnica da câmara de fluxo são alguns dentre os vários exemplos de técnicas de quantificação de emissões de superfície (EUN, 2000).

Método do gás traçador

A técnica de sensoriamento remoto se baseia na liberação controlada de um gás traçador inerte (N₂O e SF₆), permitindo o monitoramento do progresso do gás em condições reais, a uma taxa conhecida e medições simultâneas de concentração de metano (SCHEUTZ *et al.*, 2009; DELRE *et al.*, 2018). Com isto, é possível determinar a taxa de emissão de metano a partir da pluma do marcador CH₄/gás em relação ao vento.

O método de traçadores atmosféricos tem sido utilizado para estudar as emissões de aterros sanitários (TRÉGOURÈS *et al.*, 1999; CZEPIEL *et al.*, 2003; DELKASH *et al.*, 2016). Delkash *et al.* (2016), por exemplo, foram os primeiros a aplicarem um modelo de dispersão atmosférica a um aterro sanitário a partir do método do gás traçador.

Existem algumas limitações nesta técnica, dentre elas a não aplicabilidade para topografia altamente variável e em locais com ventos que apresentam alta velocidade. Além disso, os cálculos necessários para analisar os resultados são complexos (TRÉGOURÈS *et al.*, 1999; EUN, 2000; SCHEUTZ *et al.*, 2009; BABILOTTE *et al.*, 2010).

Câmara de fluxo

A câmara de fluxo é uma técnica comumente utilizada para medições dos fluxos de emissão de compostos orgânicos voláteis (COV) e poluentes gasosos inorgânicos em superfícies do solo, a partir de diferentes fontes (ABICHOU *et al.*, 2006a; EKLUND, 2012; LAKHOUIT *et al.*, 2014; CAPANEMA; CABANA; CABRAL, 2014).

O método tem como princípio o acúmulo de um determinado volume de gases dentro de uma estrutura (câmara de fluxo) que é disposta acima de uma camada de cobertura de solo (KLENBUSCH, 1986; ABICHOU *et al.*, 2006a), proporcionando maior precisão, simplicidade e flexibilidade para medição de gases (USEPA, 1985; COOPER *et al.*, 1992).

Este método possui algumas dificuldades relacionadas às limitações do tempo do experimento e área amostrada (onde são feitas as medições dos gases). Normalmente, os experimentos utilizando este método são feitos em tempo limitado, impossibilitando um monitoramento representativo entre as diferentes estações do ano (USEPA, 2009). Já as limitações da área amostrada impossibilitam uma análise mais representativa, devido a não homogeneidade dos resíduos e superfície do aterro. Com isto, os gases são lançados com velocidades diferentes nessas áreas, sendo que em algumas delas a fração das emissões será mais acentuada, devido à existência de fissuras na superfície do solo.

Existem dois tipos de operações da câmara de fluxo; o regime dinâmico, mais sofisticado e o regime estático, mais simples. No modo dinâmico há circulação de ar através de uma bomba em ciclo contínuo, da câmara para o analisador e retornando à câmara. (NORMAN *et al.*, 1997; ROCHETTE *et al.*, 1997; DENMEAD, 2008; HUDSON; AYOKO, 2008). Já no modo estático, as amostragens de ar são obtidas do interior da câmara em intervalos de tempo previamente determinados, resultando numa variabilidade de concentrações dos gases. Para as análises das concentrações são utilizados sistemas automatizados, ou posteriormente, as amostras são levadas ao laboratório para análise por cromatografia gasosa (GUEDES, 2007). Este método é vantajoso devido à sua simplicidade e baixo custo de operação, bem como a facilidade no transporte (DENMEAD, 2008).

As câmaras de fluxo não possuem formatos ou dimensões padronizadas. A diferença entre câmaras com base maior e menor é que aquela ganha em representatividade, mas perde no tempo de ensaio, enquanto que esta ganha

em versatilidade, mas perde no quesito representatividade do local (PARKIN; VENTEREA, 2010). Além disso, a área e o volume são adequados conforme a intensidade do fluxo para que seja possível a detecção de variações da concentração do gás no interior da câmara (ROCHETTE *et al.*, 1997; ROCHETTE; ERIKSEN-HAMEL, 2008).

Esta técnica, no Brasil, apresenta metodologias variadas de medições de gases, principalmente no número de amostras coletadas, tempo de fechamento, “design” e área e volume das câmaras (GOMES *et al.*, 2009; SIQUEIRA NETO *et al.*, 2011; SOUSA NETO *et al.*, 2011).

Para contextualizar as metodologias da técnica de câmara fluxo estática, no Brasil, pode-se citar, por exemplo, os estudos de Maciel (2003), em Muribeca (PE); Mariano (2008), em Aguazinha (PE); e Franqueto (2016), em Guarapuava (PR). Maciel (2003) utilizou uma placa de 0,40x0,40 m para suas medições. Com isto, observaram emissões de metano entre 102 a 363 g/(m².dia) na camada de cobertura devido a inexistência de drenagem interna de biogás, juntamente com elevada produção de biogás (resíduos com menos de 5 anos) e falta de controle da compactação na execução da camada de cobertura. Mariano (2008) obteve emissões de metano que variaram de 0 a 401 g/(m².dia), com a mesma dimensão de placa e em condições muito parecidas do estudo de Maciel (2003). Franqueto (2016) utilizou uma placa com dimensões de 3,0 x 1,5 m para medições de metano, oxigênio e dióxido de carbono em duas áreas: uma convencional, com solo original do aterro, e outra melhorada, com agregado de composto, deixando o teor de matéria orgânica final em 4,5%. Os fluxos de metano variaram entre 0 e 74 g/(m² .d) para as áreas de controle e melhorada. O fluxo médio para área melhorada foi de 23 g/(m².d) e para área de controle foi de aproximadamente 37 g/(m² .d). Os valores do fluxo de metano para a área melhorada foram inferiores em todos os ensaios, comparativamente à controlada.

Técnicas analíticas aplicadas à quantificação de biogás

Os métodos físico-químicos (como a cromatografia gasosa) e os métodos sensoriais (olfatometria estática ou dinâmica) são alguns dentre os vários métodos analíticos para quantificação de poluentes atmosféricos (GOSTELOW; PARSONS; STUETZ, 2001; CRUZ, 2008).

Cromatografia gasosa

A característica principal deste método é a determinação de amostras gasosas em baixas concentrações, com alta capacidade de separação associada à facilidade de detecção dos compostos (WARDENCKI, 1998; DEWULF; VAN LANGENHOVE; WITTMANN, 2002). Aplica-se a pesquisas e análises de rotina (BRAITHWAITE; SMITH, 1999).

Na análise por cromatografia gasosa, a escolha da coluna cromatográfica é um fator primordial para a separação eficiente dos compostos. Neste caso, as propriedades da fase estacionária devem ser compatíveis com a natureza dos compostos a serem avaliados (COLLINS; BRAGA; BONATO, 1995).

Métodos Sensoriais

Nas investigações de campo são recomendados os métodos sensoriais devido à baixa concentração de compostos odoríferos dispersos na atmosfera (ROMAIN; DELVA; NICOLAS, 2008). Tais compostos estão presentes no biogás em nível de traço (TAGARIS *et al.*, 2012; LIM *et al.*, 2018). A norma ASTM E544-10 (2010), *Standard Practices for Referencing Suprathreshold Odor Intensity*, apresenta dois métodos que podem ser usados para referenciar a intensidade odorante; o método estático e o método dinâmico (VIEIRA, 2013).

A olfatométrica dinâmica é o único método padronizado para emissão de odor (ROMAIN; DELVA; NICOLAS, 2008). As análises são feitas a partir de um equipamento, o olfatômetro, que fornece a concentração odorante da amostra, utilizando-se de um painel de jurados previamente treinados para a avaliação dessa concentração, cuja resposta dá-se em UO/m³ (leia-se: unidades odor por metro cúbico) (VIEIRA, 2013).

Analisadores Automáticos

Uma das principais características de um analisador automático é a agilidade na aquisição de dados. As concentrações de metano e dióxido de carbono são obtidas *in situ* (emissões do solo), em frações de segundos, fornecendo um contínuo monitoramento da concentração desses gases. Com isto, torna-se possível, a partir das variáveis concentração e tempo, uma avaliação de fluxo bastante precisa e adequada para curtos períodos de tempo (ÁLVARES JÚNIOR; LACAVA; FERNANDES, 2002; DAVIDSON *et al.*, 2002).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As boas práticas de gerenciamento dos RSU corroboram, inclusive, para a redução de gases de efeito estufa, tal como preconizado na COP 21. O cumprimento dessa e outras metas passam, obrigatoriamente, por uma reformulação dos hábitos de consumo e disposição, por parte da população, e de coleta e gerenciamento, por parte do poder público. A camada de cobertura possui grande atuação na redução de gases odoríferos e de efeito estufa, sobretudo quando o solo original do aterro é enriquecido, de modo a aumentar seu teor final de matéria orgânica.

O monitoramento da camada de cobertura pode ser feito através de uma série de métodos de investigações de emissões fugitivas. Dentre os métodos, a câmara de fluxo estática possui maior vantagem no ponto de vista econômico e operacional. Até o momento, não existem regulamentações em nível de Brasil que tratem do controle e monitoramento de emissões de modo geral em aterro. Portanto, um dos pontos que talvez preconize o uso da técnica seja a criação dessas regulamentações a nível nacional para o monitoramento e controle de emissões dessa natureza (fugitivas). Em função de uma maior abrangência sobre a camada de cobertura a ser avaliada, câmaras de fluxo de grandes dimensões podem apresentar maior representatividade dos ensaios (em termos de emissões gasosas), comparativamente às placas de fluxo de menor área de cobertura, compensando, em grande parte, a heterogeneidade da camada de

cobertura (diferenças de permeabilidade, grau de compactação, granulometria do solo, etc.).

Os métodos analíticos de quantificação de biogás também foram apresentados no presente trabalho. Complementarmente aos métodos físico-químicos, a Olfatometria mostra-se uma excelente ferramenta na avaliação do impacto odorante global das emissões de gases odorantes provenientes dos aterros (seja de emissões pontuais ou fugitivas) nas áreas circunvizinhas a estas plantas.

Em suma, muitas técnicas de controle e monitoramento de gases em aterros sanitários têm sido estudadas; porém, é necessário o desenvolvimento de métodos ainda mais confiáveis e econômicos. Assim, o aumento de subsídios em tecnologia e inovação é uma condicionante para que seja possível o desenvolvimento e maior difusão desses métodos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), no âmbito do Programa Ciência Sem Fronteiras pelo suporte financeiro ao projeto, e à bolsa de mestrado concedida.

REFERÊNCIAS

ABICHOU, T. *et al.* Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. **Waste Management**. v.26, n. 11, p. 1305–1312. 2006a.

ABICHOU, T. *et al.* Characterization of methane flux and oxidation at a solid waste landfill. **Journal of Environmental Engineering**, v. 132, n.2, p. 220-228. 2006b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. _____ **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017, 73 p.

AHMED, S. A.; ALI, M. Partnerships for solid waste management in developing countries: linking theories to realities. **Habitat International**, v. 28, n. 3, p. 467-479, 2004.

AIT-BENICHO, S. *et al.* Methanotrophs and methanotrophic activity in engineered landfill biocovers. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2509-2517, 2009.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 366f. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALEXANDER, A.; BURKLIN, C.; SINGLETON, A. **Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide**. EPA-600/R-05/047, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005.

ÁLVARES JÚNIOR, O. de M.; LACAVAL, C. I. V.; FERNANDES, P. S. **Emissões atmosféricas**. In: Emissões atmosféricas. Brasília: SENAI/DN, 2002. 373 p.

ARMANDO, M. C. **Avaliação do potencial do biogás gerado em sistemas de aproveitamento energético no aterro sanitário do município de Toledo-PR**. 2013. 133f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013.

ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). **ASTM E544-10: Standard Practices for Referencing Suprathreshold Odor Intensity**. West Conshohocken: ASTM International, 2010.

BABILOTTE, A. *et al.* Fugitive methane emissions from landfills: field comparison of five methods on a French landfill. **Journal of Environmental Engineering**, v. 136, n. 8, p. 777–784, 2010.

BIAN, R; XIN, D; CHAI, X. A Simulation model for estimating methane oxidation and emission from landfill cover soils. **Waste Management**, v. 77, July 2018, p. 426-434, 2018.

BÖRJESSON, G.; SUNDH, I.; SVENSSON, B. Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 48, n. 3, p. 305–312, 2004.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 248p.

BOURN, M. *et al.* Regulating landfills using measured methane emissions: An English perspective. **Waste Management**, v. 87, n. 15, p. 860-869, 2019.

BRAITHWAITE, A.; SMITH, F.J. **Chromatographic Methods**. 5^a ed, Dordrecht: Ed. Kluwer Academic Publishers, 1999.

BRASIL. **Informação adicional sobre a IDNC apenas para fins de esclarecimento**. 2016. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf>. Acesso em 4 de abril de 2017.

BRASIL. Lei Federal 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, 2010. Disponível em

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.
Acesso em: 13 de abril de 2017.

BRASIL. Projeto de Lei do Senado nº. 425, de 2014. **Dispõe sobre a prorrogação do prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010.** Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.senado.leg.br/atividade/rotinas/materia/getPDF.asp?t=170465&tp=1>>. Acesso em: 13 de abril de 2017.

BRITTO, M. L. C. P. S. de. **Taxa de emissão de biogás e parâmetros de biodegradação de resíduos sólidos urbanos no aterro metropolitano centro.** 2006. 187f. Dissertação (Mestrado profissional em Gerenciamento e tecnologias ambientais no processo produtivo. Ênfase em Produção Limpa) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

CAMPOS, H.K.T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.2, p. 171-180, 2012.

CANDIANI, G. **Estudo da geração de metano em uma célula de aterro sanitário.** Tese (Doutorado em Energia) Universidade Federal do ABC. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas. Santo André-SP, 2011, 172f.

CAPANEMA, M. A.; CABANA, H.; CABRAL, A. R. Reduction of odours in pilot-scale landfill biocovers. **Waste Management**, v. 34, n. 4, p. 770-779, 2014.

COLLINS, C. H.; BRAGA, G. L.; BONATO, P. **Introdução a métodos cromatográficos.** 6ª edição. Campinas (SP): Editora da Unicamp, 1995. 279p.

COOPER, C. D. *et al.* Landfill Gas Emission: Report #92-2. State University System of Florida, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, Florida, USA, 1992.

CROVADOR, M. I. C.; SCHIRMER, W. N.; CABRAL, A. R. Energy generation from municipal solid waste and the current scenario of biogas recovery in Brazil. **Revista CIATEC – UPF**, v.8, n.1, p. 1-11, 2016

CRUZ, L. P. S. Métodos de amostragem e análise para compostos reduzidos de enxofre atmosférico. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1180–1189, 2008.

CZEPIEL, P. M. *et al.* The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions. **Waste Management**, v.23, n. 7, p.593–598, 2003.

DAVIDSON, E.A. *et al.* Minimizing artifact and biases in chamber-based measurements of soil respiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.113, n. 1, p.21-37, 2002.

DAVOLI, E. *et al.* Characterisation of odorants emissions from landfills by SPME and GC/MS. **Chemosphere**, v. 51, n. 5, p. 357–368, 2003.

DELKASH, M. *et al.* Short-term landfill methane emissions dependency on wind, **Waste Management**, v. 55, September 2016, p. 288-298.

DELRE, A. *et al.* Emission quantification using the tracer gas dispersion method: The influence of instrument, tracer gas species and source simulation. **Science of the Total Environment**, v. 634, n. 01, p. 59-66, 2018.

DENMEAD, O. T. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. **Plant and Soil**, v. 309, n.1-2, p. 5–24, 2008.

DEWULF, J.; VAN LANGENHOVE, H.; WITTMANN, G. Analysis of volatile organic compounds using gas chromatography. **TrAC trends in Analytical Chemistry**, v. 21, p. 18-31, 2002.

DUCOM, G. *et al.* Biogas - Municipal solid waste incinerator bottom ash interactions: Sulphur compounds removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 166, n. 2-3, p. 1102–1108, 2009.

EKLUND, B. Practical guidance for flux chamber measurements of fugitive volatile organic emission rates. **Journal of the Air & Waste Management Association**. v.42, p.1583-1591, 2012.

EUN, S. **Hydrogen sulfide flux measurements and dispersion modeling from construction and demolition (C&D) debris landfills**. Thèse (Doctorat, University of Central Florida), Orlando, 129p. 2000.

FELIPETTO, A. V. M. Conceito, planejamento e oportunidades. In: FELIPETTO, A.V.M.; SEGALA, K. C. (Ed.). **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal - Ibam, 2007. 40 p.

FRANQUETO, R. **Avaliação de emissões fugitivas de biogás de aterro sanitário em camada de cobertura convencional e com características melhoradas aplicando método de câmara de fluxo em regime estático**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2016.

GALLEGO, E. *et al.* Surface emission determination of volatile organic compounds (VOC) from a closed industrial waste landfill using a self-designed static flux chamber. **Science of the Total Environment**, v.470–471, February, p.587–599, 2014.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A. Passive landfill gas emission – Influence of atmospheric pressure and implications for the operation of methane-oxidising

biofilters. **Waste Management**, v. 26, n. 3, p. 245–251, 2006.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; MIEHLICH, G. Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters. **Waste Management**, v. 23, n. 7, p. 609–619, 2003.

GODECKE, M., V.; NAIME, R., H.; FIGUEIREDO, J., A., S. O Consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1700-1712, 2012.

GOMES, J. *et al.* Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil & Tillage Research**, v.106, n. 1, p. 36–44, 2009.

GONZALEZ-VALENCIA, R. *et al.* Hotspot detection and spatial distribution of methane emissions from landfills by a surface probe method. **Waste Management**, v. 55, p. 299–305, 2016.

GOSTELOW, P.; PARSONS, S. A.; STUETZ, R. Odour Measurements for Sewage Treatment Works. **Water Research**, v. 35, n. 3, p. 579-597, 2001.

GUEDES, V. P. **Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HUBER-HUMER, M.; GEBERT, J.; HILGER, H. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management & Research. ISWA**, v. 26, n. 1, p. 33–46, 2008.

HUDSON, N.; AYOKO, G. A. Odour sampling. 2. Comparison of physical and aerodynamic characteristics of sampling devices: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 3993–4007, 2008.

HU, L.; LONG, Y. Effect of landfill cover layer modification on methane oxidation. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 23, p. 25393–25401, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2007.

JUGNIA, L.-B. *et al.* Diversity and dynamics of methanotrophs within an experimental landfill cover soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n. 5, p. 1479-1487, 2009.

KARAK, T.; BHAGAT, R. M. e BHATTACHARYYA P. Municipal Solid Waste Generation, Composition, and Management: The World Scenario, **Critical**

Reviews in Environmental Science and Technology, v. 42, n. 15, p. 1509-1630, 2012.

KARTHIKEYAN, O. P.; JANE, S. Y. M.; BALASUBRAMANIAN, R. Gradient packing bed bio-filter for landfill methane mitigation. **Bioresource Technology**, v. 217, p. 205–209, 2016.

KIM, K.-H. Emissions of reduced sulfur compounds (RSC) as a landfill gas (LFG): A comparative study of young and old landfill facilities. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 34, p. 6567–6578, 2006.

KJELDSEN, P.; FISCHER, E. V. Landfill gas migration : field investigations at skellingsted landfill, Denmark. **Waste Management and Research**, v. 13, n. 5, p. 467-484, 1995.

KLENBUSCH, M. R. **Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission isolation flux chamber**. EPA/600/8-86/008, US EPA, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, Nevada, 1986.

KORMI, T. *et al.* Estimation of landfill methane emissions using stochastic search methods. **Atmospheric Pollution Research**, v. 8, n. 4, p. 597-605, 2017.

KUMAR, A.; SHARMA, M. P. Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 5, February, p. 50–61, 2014.

LAKHOUIT, A. *et al.* Evaluation of the efficiency of an experimental biocover to reduce BTEX emissions from landfill biogas. **Chemosphere**, v.97, p.98-101, 2014.

LEE, S. *et al.* Reduced sulfur compounds in gas from construction and demolition debris landfills. **Waste Management**, v. 26, n. 5, p. 526–533, 2006.

LIM, J-H. *et al.* Characterization of odorous gases at landfill site and in surrounding areas. **Journal of Environmental Management**, v. 206, January 15, p. 291-303, 2018.

LOPES, R. L. *et al.* Camadas de cobertura metanotróficas como alternativas para gerenciamento de gases de efeito estufa em aterros sanitários. **Holos**, v. 4, p.1-16, 2010.

MACHADO, S. L. *et al.* Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results. **Waste Management**, v.2, n.1, p.153–161, 2009.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**.. 2009. 335f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 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, Part A, p. 116-130, 2017.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**, 2008. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

MARINHO, F. A. M.; SOUSA, L. de. Projeto de pesquisa sobre sistema de cobertura de aterro de RSU para oxidação biológica do metano. **Revista Limpeza Pública**, v.73, n.1, p.6-13, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris**. 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em 3 de abril de 2017.

NORMAN, J. M. *et al.* A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. **Journal of Geophysical Research-All Series-**, v. 102, n. D24, p. 28771–28777, 1997.

PARKIN, T. B.; VENTEREA, R. T. Sampling Protocols. Chapter 3. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. **USDA-ARS GRACEnet Project Protocols**, p. 3-1 a 3-39, 2010.

PARO, A. de. C.; DA COSTA, F. C.; COELHO, S. T. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 113-125, 2008.

RACHOR, I. *et al.* Assessment of the methane oxidation capacity of compacted soils intended for use as landfill cover materials. **Waste Management**, v. 31, n. 5, p. 833–842, 2011.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation - A review. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 12, p. 3369–3375, 2011.

ROCHETTE, P. *et al.* Description of a dynamic closed chamber for measuring soil respiration and its comparison with other techniques. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 77, n. 2, p. 195–203, 1997.

ROCHETTE, P.; ERIKSEN-HAMEL, N. S. Chamber measurements of soil nitrous oxide flux: are absolute values reliable? **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 2, p. 331, 2008

ROMAIN, A. C.; DELVA, J.; NICOLAS, J. Complementary approaches to measure environmental odours emitted by landfill areas. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 131, n. 1, p. 18–23, 2008.

RONCATO, C. D. L.; CABRAL, A. R. Evaluation of methane oxidation efficiency of two biocovers: field and laboratory results. **Journal of Environmental Engineering** (ASCE), v. 138, n. 2, p. 164-173, 2012.

ROSE, J. L. **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais**. 2009. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SAURI-RIANCHO, M. R. *et al.* Superficial Methane Emissions from a Landfill in Merida, Yucatan, Mexico, **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, v.14, n. 3, p. 299-310, 2013.

SCHEUTZ, C. *et al.* Atmospheric emissions and attenuation of non-methane organic compounds in cover soils at a French landfill. **Waste management**, v. 28, n. 10, p. 1892–1908, 2008.

SCHEUTZ, C. *et al.* Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. **Waste Management and Research**, v.27, p.409–455, 2009.

SIQUEIRA NETO, M. *et al.* Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma cerrado. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.63-76, 2011.

SOUSA NETO, E. *et al.* Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, methane and carbon dioxide in a gradient of elevation in the coastal Brazilian Atlantic forest. **Biogeosciences**, v. 8, n. 3, p. 733–742, 2011.

SPOKAS, K. *et al.* Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?. **Waste Management**. v.26, p.516-525, 2006.

STAUB, M. J. *et al.* An incremental model to assess the environmental impact of cap cover systems on MSW landfill emissions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 3, p. 298-312, 2011.

STREESE, J.; STEGMANN, R. Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters. **Waste Management**, v. 23, n. 7, p. 573–580, 2003.

TAGARIS, E. *et al.* A methodology to estimate odors around landfill sites: the use of methane as an odor index and its utility in landfill siting. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 53, May, p. 629-634, 2003.

TEIXEIRA, P. F. **Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos**. 2008. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

TRÉGOURÈS, A. *et al.* Comparison of seven methods for measuring methane flux at a municipal solid waste landfill site, **Waste Management and Research**, v.17, p.453-458, 1999.

UK ENVIRONMENT AGENCY (2000). **Review and Guidance on the Use of Landfill Cover Materials**. Version 3.7, 2000.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount**. 2008. Disponível em <http://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf> Acesso em 3 de maio de 2017.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change**. 1998. Disponível em <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf#page=12>. Acesso em 10 de maio de 2017.

USEPA. **Measurement of Gaseous Emission Rates From Land Surfaces Using an Emission Isolation Flux Chamber, Users Guide**. EPA Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, Nevada . NTIS N°. PB-86-223161. 1985.

USEPA. **Air emissions from municipal solid waste landfills – Background information for proposed standards and guidelines**. United States Environmental Protection Agency. 1991.

USEPA. **Hazardous Waste Report Instructions and Form**. United States Environmental Protection Agency. 2009.

USEPA. **Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010**. United States Environmental Protection Agency. 2010.

VAN ELK, A. G. H. P. Redução de emissões na disposição final. In: SEGALA, K. (Ed.). **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**. Ibm ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 40, 2007.

VIEIRA, M. M. **Abordagem de procedimentos legais para o controle de incômodos olfativos**. 2013. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

WANG, X. *et al.* Leachate treatment in landfills is a significant N₂O source, **Science of The Total Environment**, v. 596–597, n. 15, p. 18-25, 2017.

WARDENCKI, W. Problems with the determination of environmental sulphur compounds by gas chromatography, **Journal of Chromatography A**, v.793, p.1–19, 1998.

ZOU, S. C. *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds at a landfill site in Guangzhou, South China. **Chemosphere**, v. 51, n. 9, p. 1015–1022, 2003.