

REVISTA AIDIS

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

ATERRO MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE CARUARU: UM CASO DE ESTUDO SOBRE RETENÇÃO DE GASES NA CAMADA DE COBERTURA

Glauber Galdino Santos¹

* Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello¹

Maria Odete de Holanda Mariano²

Eduardo Antônio Maia Lins³

CARUARU MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL: A CASE STUDY ON GASES RETENTION IN THE COVER LAYER

Recibido el 10 de agosto de 2022. Aceptado el 10 de abril de 2023

Abstract

The landfills cover layers are responsible for isolating waste, reducing the infiltration of rainwater into the massif, and preventing the gases generated in the organic matter biodegradation process from reaching the atmosphere. This article presents the evaluation of gases retention in the cover layer of the Caruaru Municipal solid waste landfill, located in the northeast Brazil. The landfill activities were closed in March 2018. The cover layers were evaluation by geotechnical characterization of the soil (classification, granulometry, degree of compaction, moisture, degree of saturation, void index, and layer thickness). In the field, 20 static flow plate tests were performed to verify the amount the gas that reached the surface through the cover layer. The tests were carried out in 4 stages, at 5 different points selected according to the age of the waste deposited there (2, 4, 6, 8 and 10 years, respectively). Due to the low emissions indicated by plate tests, the generation of gases within the tailings mass was investigated through 20 pressure and concentration tests with the aid of the Pressure and Concentration Measuring Device (DMPC) and the emissions of gases were analyzed in 9 drains that were close to the points of the other field tests. According to the granulometric analysis of the material, 4 of the samples collected on the ground consisted of sandy materials (silty sand, clayey sand and well-graded sand) and 1 sample had sandy clay. The results of the void indexes were between 0.5 and 0.63, the degrees of saturation were between 64.4% and 90.6%, the moisture contents were between 17% and 20.3% and the degrees of compaction between 80% and 90%. The layer thickness was measured at 20 different points and the values varied between 0.80 and 1.35 m. Low concentrations of biogas were found through DMPC (0.1% to 7.6%). In most drains, low concentrations of the main greenhouse gases found in biogas (methane and carbon dioxide) were identified, however, in 2 drains high concentrations were measured (17.5% and 56%). At the end of the analysis, it was found that currently around 22.36% of gas emissions reach the atmosphere through the cover layer. These values must have been higher during the period of activity of the landfill, because, as observed, at some points there was no more generation of biogas.

Keywords: landfill, cover layer, gas flow, static flow plate, biogas.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campus do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Ambiental pelo Instituto Tecnológico de Pernambuco, Brasil.

* Autor correspondente: Campus do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco / Av. Marielle Franco, s/n -Km 59- Nova Caruaru, Caruaru- PE, CEP: 55014-900. Email: isabelamcvbello@hotmail.com

Resumo

As camadas de cobertura nos aterros sanitários são responsáveis por isolar os resíduos, impedir a entrada de água no maciço, e evitar que os gases gerados no processo de biodegradação da matéria orgânica cheguem até a atmosfera. Este artigo apresenta a avaliação da retenção de gás na camada de cobertura do aterro sanitário da cidade de Caruaru, localizada no nordeste do Brasil. As atividades deste aterro foram encerradas em março de 2018. A avaliação da camada de cobertura se deu por uma caracterização geotécnica do solo (classificação, granulometria, grau de compactação, umidade, grau de saturação, índice de vazios e espessura da camada). Em campo foram realizados 20 ensaios com uma placa de fluxo estática para verificar a quantidade de gás que chegava até a superfície através da camada de cobertura. Os ensaios foram realizados em 4 baterias, em 5 pontos diferentes selecionados de acordo com a idade do resíduo ali disposto (2, 4, 6, 8 e 10 anos, respectivamente). Devido às baixas emissões encontradas nos ensaios de placa foi também investigada a geração de gases no interior da massa de lixo através de 20 ensaios de pressão e concentração com o auxílio do Dispositivo de Medição de Pressão e Concentração (DMPC) e analisadas as emissões de gases em 9 drenos que ficavam próximos aos pontos dos demais ensaios de campo. Segundo a análise granulométrica do material, 4 das amostras retiradas em campo eram formadas por materiais arenosos, sendo: areias siltsosas, areia argilosa e areia bem graduada e 1 amostra apresentou uma argila arenosa. Os índices de vazios ficaram entre 0.5 e 0.63, os graus de saturação entre 64.4% e 90.6%, os teores de umidade entre 17% e 20,3% e os graus de compactação entre 80% e 90%. A espessura da camada foi medida em 20 pontos diferentes e os valores variaram entre 0.80 e 1.35 m. Constatou-se baixas concentrações de biogás através do DMPC (0.1% a 7.6%). Na maior parte dos drenos foram identificadas baixas concentrações dos principais gases de efeito estufa encontrados no biogás (metano e dióxido de carbono), porém, em 2 drenos foram medidas concentrações consideráveis (17.5% e 56%). Ao final das análises constatou-se que atualmente cerca de 22.36% das emissões de gases chegam até a atmosfera através da camada de cobertura. Esses valores devem ter sido mais elevados durante o período de atividade do aterro, pois em alguns pontos já não havia geração de biogás.

Palavras-chave: aterro sanitário, camada de cobertura, fluxo de gases, placa de fluxo, biogás.

Introdução

A relação entre a geração excessiva e da disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) vem sendo um dos maiores desafios da sociedade contemporânea (Leleux & Kaaij, 2019). A ampliação das demandas de bens de consumo repercute no aumento significativo da geração de RSU e do seu gerenciamento inapropriado (Doherty, 2018).

Até o início de 2020, segundo o relatório do Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco, o estado possuía cerca de 71 municípios com lixões ativos (Pernambuco, 2020), isso correspondia a 38.6% dos municípios, sendo esses responsáveis por aproximadamente 14% da geração de resíduos. Como forma de incentivo para que os municípios invistam em ações ambientais, o governo do estado estabeleceu o ICMS socioambiental através da Lei 11899/00 (Pernambuco, 2000), que trata de ajuda financeira repassada para as cidades que, entre outras coisas, destinam seus resíduos para aterros sanitários. Para municípios pequenos, que tem uma baixa geração de

RSU e que não possuam locais adequados para dispor seus resíduos, é proposto a formação de consórcios com cidades vizinhas que estejam nas mesmas condições, dividindo os custos entre os consorciados.

A disposição dos resíduos em aterros sanitários, cria uma condição anaeróbia, gerando o biogás, com teores de gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Ressalta-se que o gás metano é cerca de 28 vezes mais poluente que o gás carbônico, e ambos, os maiores contribuintes para o aquecimento global apenas as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de origem antrópica (Gioda, 2018). O Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2021) fez estimativas das emissões globais de metano e os dados gerados apontam que fontes antropogênicas geram 4.0×10^8 t/ano de CH_4 , sendo que 5 a 20% (entre 2.0×10^7 e 8.0×10^7 t/ano) são oriundas de aterros sanitários.

Diante desse contexto, se torna importante o estudo do processo de decomposição da matéria orgânica presente no RSU, tendo em vista que a geração dos gases está diretamente ligada a esse processo e que suas emissões podem vir a afetar todo o ambiente. Os aterros sanitários para onde os resíduos são enviados, devem por sua vez, estar fundamentados nos critérios das normas técnicas de engenharia para que evitem a contaminação do solo, dos recursos hídricos ou do ar.

A emissão descontrolada do biogás não é só um grave problema de poluição atmosférica. Segundo Espiritu *et al.* (2021), a liberação desses gases pode causar efeitos que vão de um mau odor até possíveis doenças cancerígenas nas comunidades vizinhas ao local de emissão. Nesse sentido, a camada de cobertura dos resíduos é, em geral, o principal item do projeto para eliminar ou amortizar os efeitos da emissão de gases, pois é este elemento que separa o ambiente interno, também chamado de maciço, e a atmosfera.

Segundo Costa *et al.* (2018), a camada de cobertura final de um aterro sanitário é um sistema que tem como objetivo principal impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro, bem como evitar a saída de gases para a atmosfera.

No que diz respeito ao reaproveitamento do biogás, um ponto importante que deve ser avaliado é o quão eficiente é a camada de cobertura em relação a retenção dos gases gerados na massa de resíduos. Os materiais utilizados na cobertura dos resíduos são diretamente responsáveis por essa eficiência (Franqueto, 2020). Em Pernambuco, de maneira geral, o material utilizado na cobertura é retirado de jazidas minerais próximas aos locais de disposição.

Este artigo apresenta a avaliação da eficiência da camada de cobertura utilizada no aterro sanitário municipal de Caruaru, localizado no estado de Pernambuco, quanto a retenção dos gases gerados no interior da massa de resíduos.

Materiais e métodos

Descrição da área de estudo

O município de Caruaru está localizado na região agreste do estado de Pernambuco, a 08°17'00" de latitude sul e 35°58'34" de longitude oeste, a cerca de 130 km da capital do estado (Figura 1). Possui uma população estimada de 351,686 habitantes (IBGE, 2016). Situa-se no Planalto da Borborema e na bacia hidrográfica do rio Ipojuca e do rio Capibaribe.

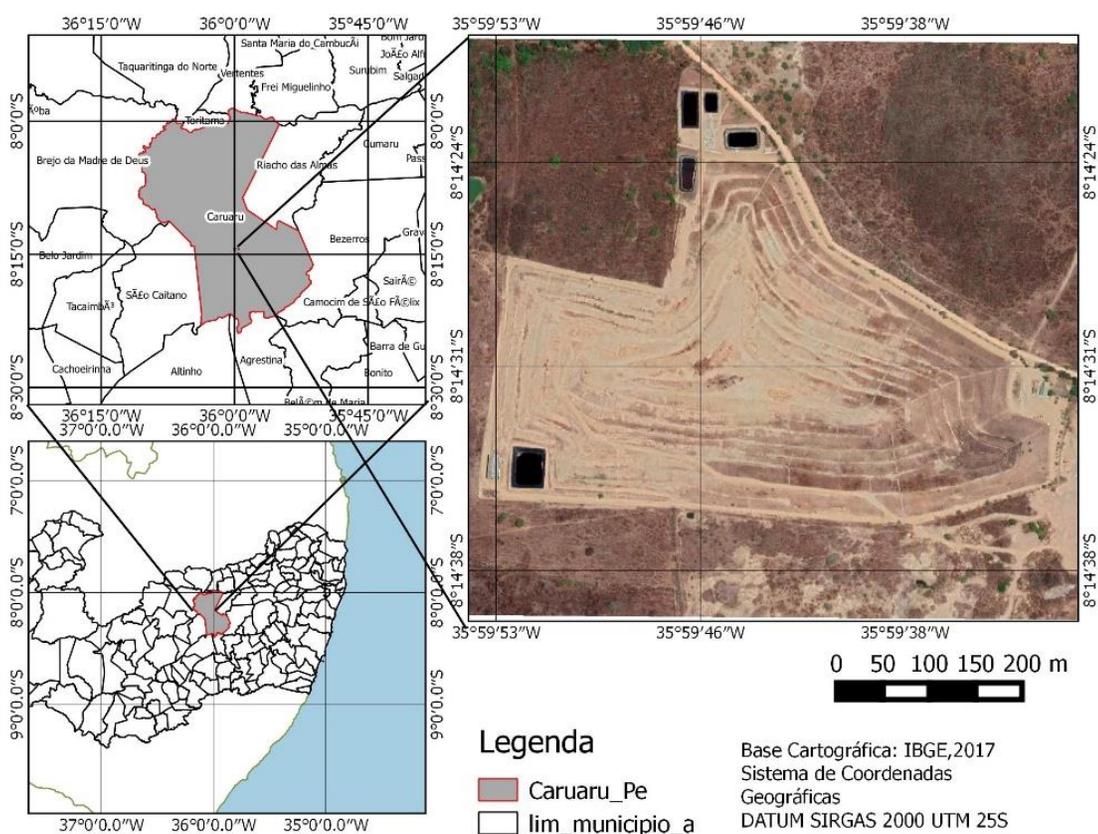


Figura 1. Mapa de localização do aterro Municipal de Caruaru.

Segundo Biondi *et al.* (2011), os tipos de solos mais recorrentes no estado de Pernambuco são os Neossolos e os Latossolos, com exceção das mesorregiões Zona da Mata e Zona Metropolitana do Recife, sendo que o tipo de solo predominante em Caruaru é o latossolo vermelho-amarelo. Situa-se numa região de baixa precipitação, onde segundo dados da APAC (2019), no ano de 2018 choveu o equivalente a 432.3 mm. O baixo índice de precipitação é graças em parte ao clima semiárido da região, que faz com que a média anual do município fique abaixo dos 600 mm.

O aterro sanitário municipal de Caruaru encontra-se a 10.8 Km do centro da cidade, no sítio Juriti S/N, na zona rural da cidade, próximo ao Polo Comercial e ao Autódromo Ayrton Senna, que fica as margens da BR 104. O aterro entrou em operação no início 2002. Inicialmente o aterro era composto por 4 células independentes, separadas por vias de tráfego e que ocupavam aproximadamente metade da área atual do empreendimento. Com o passar do tempo e o aumento pela demanda por espaço, foram ocorrendo ampliações. Em 2012 ocorreu a construção de uma nova célula. Na ocasião, as células iniciais já haviam sido unificadas. Em 2017, houve uma segunda ampliação, antes da paralização das atividades em 2018.

Atualmente o aterro passa por estudos para uma possível ampliação, enquanto isso os resíduos gerados pelo município são dispostos na CTR Caruaru, empreendimento privado construído na cidade. Durante o período de funcionamento do aterro sanitário municipal foram dispostos aproximadamente 1.65 milhão de toneladas no local. Na Figura 2 é mostrado o aterro sanitário após a paralização de suas atividades, indicando o local de disposição dos últimos resíduos, os locais das unidades administrativas, da ETL e do galpão de triagem dos resíduos recicláveis.

O aterro municipal de Caruaru recebia diariamente, em média 330 toneladas de resíduos sólidos urbanos totalizando 10,000 t/mês, cuja composição gravimétrica é de papel (12.34%), material orgânico (33.89%), plástico (8.28%), vidro (11.72%), metal (12.51%), tecido (21.27%).

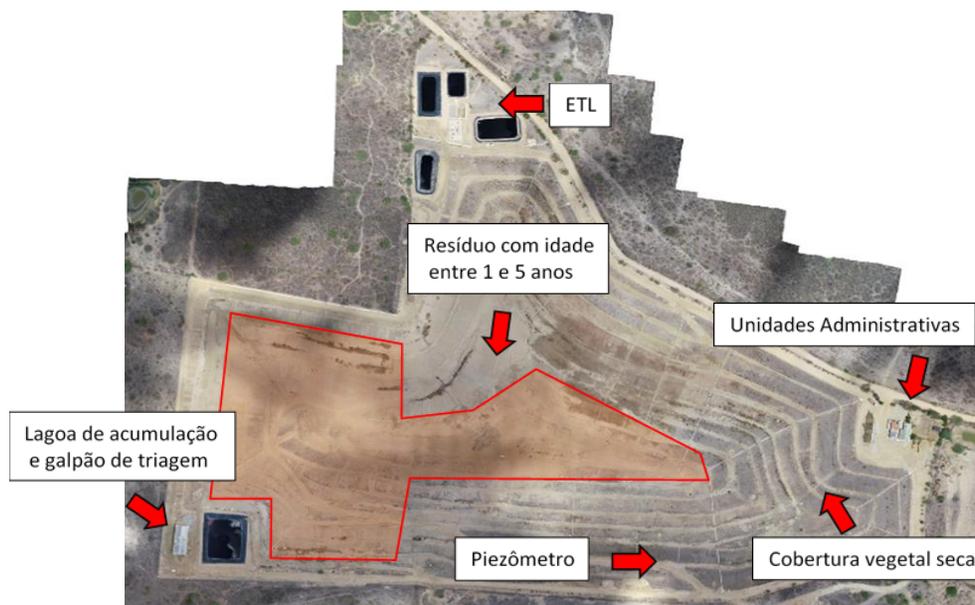


Figura 2. Aterro Sanitário Municipal de Caruaru.

Camada de cobertura e sistema de captação de gases

O tipo de camada de cobertura utilizado nos taludes e nas bermas foi o convencional, porém muito espessa, composta em média 96 cm de solo compactado, chegando a variar 80 e 135 cm. Algumas partes do aterro, principalmente nas faces leste, norte e sul, onde o resíduo foi disposto a mais tempo, há a presença de uma cobertura vegetal irregular formada por gramíneas. Durante os meses de estiagem essa cobertura se torna esbranquiçada e seca, características da caatinga.

O sistema de drenagem de gases é composto por 39 drenos, formados por uma anilha de concreto de 1 m de diâmetro, desses, 5 drenos possuem queimadores (flares). A distância entre os drenos varia bastante, sendo cerca de 30m em alguns pontos e de mais de 130 m em outros (Figura 3). Durante os últimos meses de atividade do aterro, 4 drenos possuíam vazão suficiente para se manterem acesos, contudo, após 18 meses do encerramento só 2 deles se mantiveram queimando de gás.



Figura 3. Localização dos drenos no aterro e pontos de retirada de amostra.

Campanha de investigação do solo e do resíduo do aterro

A campanha de investigação do solo e dos resíduos do aterro foi composta de 187 ensaios distribuídos entre campo e laboratório (Tabela 1). Os pontos foram escolhidos pela idade do resíduo ali disposto, sendo 5 pontos com 2, 4, 6, 8 e 10 anos respectivamente (Figura 3).

Procedimentos de investigação in situ

Para determinação do fluxo de gases pela camada de cobertura foram realizados 20 ensaios de placa de fluxo, feitos em 5 pontos diferentes entre as cotas 4.88 m e 24.81 m. A menor altitude na área do aterro, usada para determinação das cotas dos pontos foi de 562.76 m. Como os locais dos ensaios foram escolhidos a partir da idade do resíduo, os pontos se encontram em cotas distintas.

Tabela 1. Tipo e quantidade dos ensaios realizados em campo e em laboratório.

Ensaio	Total	Local	Ensaio	Total	Local
Placa de Fluxo	20	Campo	Granulometria	05	Laboratório
Medição de Pressão	20	Campo	Limite de Liquidez	05	Laboratório
Medição de Temperatura	20	Campo	Limite de Plasticidade	05	Laboratório
Concentração solo-resíduo	20	Campo	Peso Específico dos Grãos	05	Laboratório
Pressão do gás DMPC	20	Campo	Grau de compactação	05	Laboratório
Espessura da camada	20	Campo	Proctor Normal	05	Laboratório
Concentração nos drenos	09	Campo			
Pressão nos drenos	09	Campo			
Temperatura nos drenos	09	Campo			
Densidade "in situ"	05	Campo			
Umidade "in situ"	05	Campo			

Os ensaios foram divididos em 4 baterias, realizadas em entre outubro e dezembro de 2020. A distância entre os ensaios realizados no mesmo ponto era de pelo menos 4 m. Na Figura 4 estão dispostos os locais dos ensaios com a placa de fluxo.

Simultaneamente aos ensaios com a placa de fluxo foram medidas as espessuras das camadas e as concentrações de gases (CH₄, CO₂ e O₂) nos drenos que ficam num raio de 25 m dos pontos de cada ensaio. Para determinar o fluxo dos gases foi utilizada a metodologia aplicada para ensaios de placa de fluxo estática descrita por Maciel (2003). Para efetuar as leituras foi utilizado o detector de gases. A temperatura do ambiente e do biogás no interior da placa foi averiguada com um termômetro digital e a pressão interna era medida com o auxílio de um manômetro digital.

A placa de fluxo utilizada no estudo das emissões de gases foi desenvolvida por Maciel (2003). Esta placa ou caixa de fluxo foi realizada em aço galvanizado (e = 2 mm) com o topo constituído por uma chapa de acrílico cristal (e = 8 mm). Ainda de acordo com o autor, o design da placa em forma de “degrau” foi concebido “para evitar entrada de ar atmosférico para o interior da caixa induzida pelo vento”, conforme observado na Figura 5.

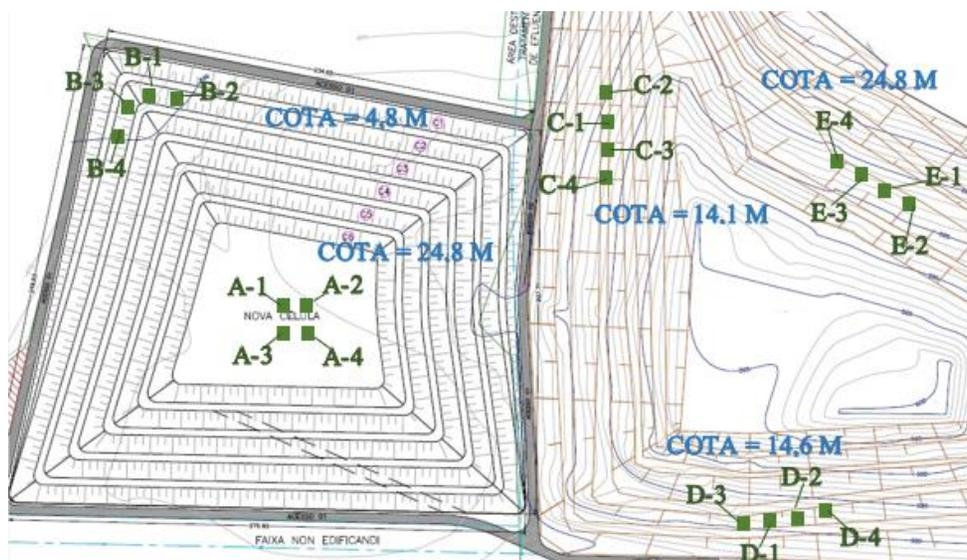


Figura 4. Locais dos ensaios com a placa de fluxo.

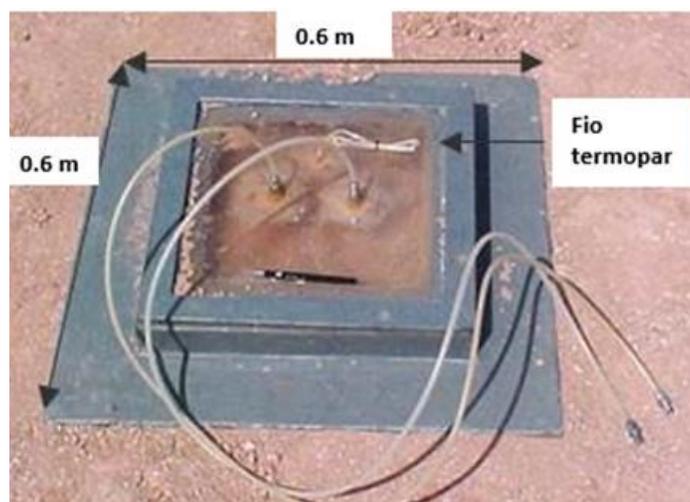


Figura 5. A placa de fluxo. Fonte: Maciel (2003).

Concentração e vazão de bioqás nos drenos

A medição da concentração dos gases nos drenos do aterro se fez necessário para que fosse conhecida a quantidade de CH₄ gerada em cada um dos pontos analisados, para que pudesse correlacionar com a idade do resíduo disposto naquele ponto e analisar se o material utilizado na camada de cobertura do aterro exerceu alguma influência no processo de biodecomposição, visto que em alguns dos pontos onde há vazão de gás suficiente ocorria a queima.

Foram realizados 27 ensaios, sendo 3 por dreno (concentração, temperatura e pressão do gás), nos drenos mais próximos (até 25 m) dos pontos onde foram realizados os ensaios de placa. Na Figura 6 está apresentado um esquema da localização no aterro dos drenos em que foram realizados os ensaios e a distância entre eles em metros. O ensaio foi realizado seguindo uma metodologia aplicada por Mariano (2008) e por Oliveira (2013).

A Figura 7 apresenta os tipos de ensaios realizados e suas respectivas localizações.

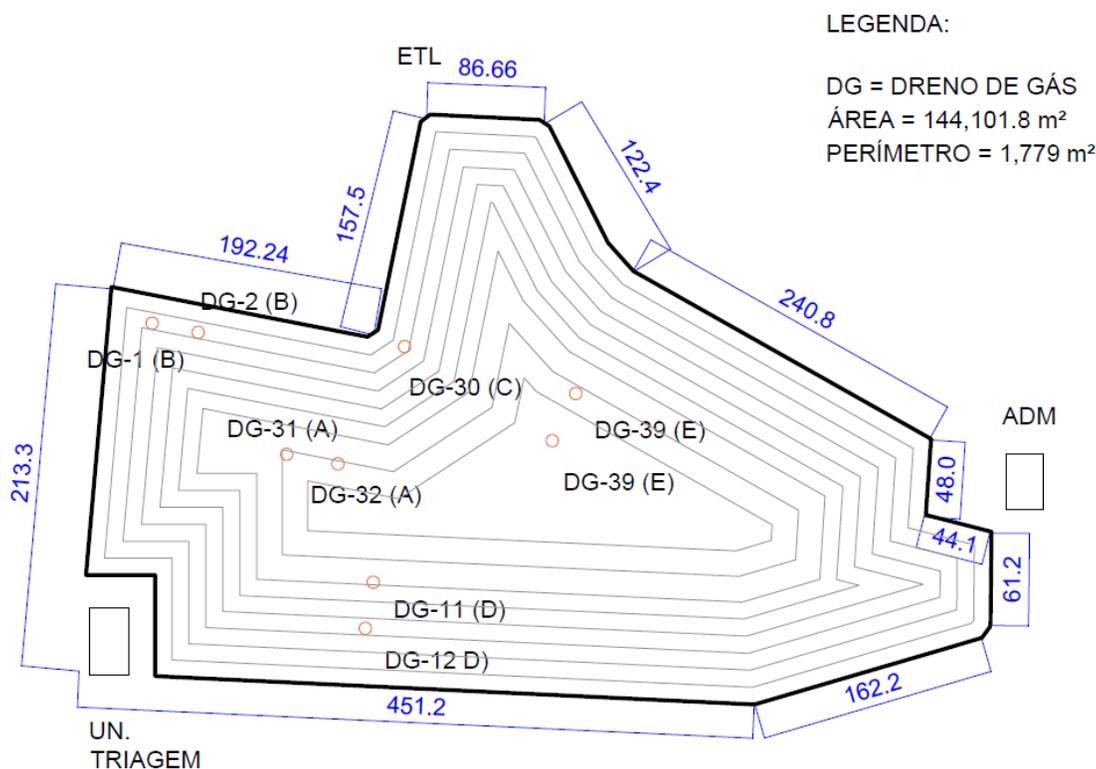


Figura 6. Esquema da localização dos drenos analisados.

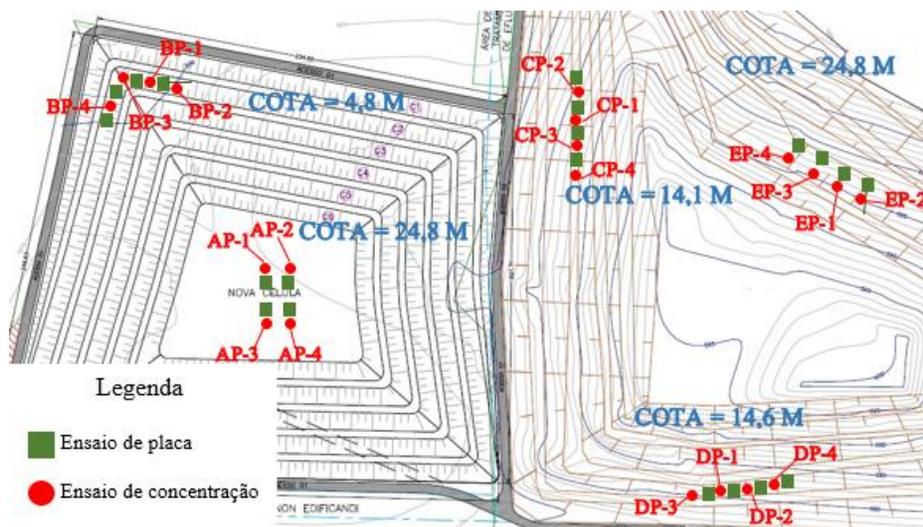


Figura 7. Locais dos ensaios e respectivas localizações.

Os detectores portáteis Multwarn II - Dräger e o GEM2000 foram utilizados para avaliar a concentração de diferentes compostos no biogás, onde o detector Multwarn II apresenta sensores para análise dos gases CH_4 e O_2 , enquanto o GEM2000 detecta o CO_2 , CO e H_2S , além dos gases supracitados. A determinação da vazão dos drenos de biogás foi baseada na Norma BSI 1042-2.3 – 19984, onde:

$$Q = v \times A \text{ (Equação 1)}$$

Q é a vazão do biogás, em m^3/s ;

v é velocidade do gás, em m/s

A é a área da seção por onde está passando o gás, no caso, seção do tubo de PVC, em m^2 .

O ensaio de medição da velocidade do biogás foi executado em dois locais na superfície dos drenos, o primeiro na borda e o segundo no centro da seção transversal do dreno. O procedimento consistiu em:

- Isolar o dreno do ambiente externo, por meio de uma lona de polietileno totalmente fixada ao dreno através da amarração com cordões de borracha;
- Realizar um furo na lona objetivando acoplar um tubo de PVC com 0.037 m de diâmetro, 0.5 m de comprimento, e perfurado 0.04 m abaixo do seu final para colocação da haste do anemômetro;
- Colocar o anemômetro no orifício e esperara leitura estabilizar, então finalmente realizar a leitura da velocidade. Observando sempre a influências dos ventos na leitura.

Ressalta-se que a velocidade do biogás considerada foi média dos valores obtidos nas duas leituras. A Figura 8 apresenta as etapas de colocação do anemômetro e leitura da velocidade nos drenos.



Figura 8. Etapas do monitoramento de gás nos drenos.

Cálculo da estimativa das emissões totais de biogás no aterro

Os dados relativos à população do município durante o período no qual o aterro se manteve ativo foram retirados de censos do IBGE que forneceram valores para os anos 2000, 2007, e 2017. Os dados nos demais anos foram calculados com base na taxa de crescimento populacional do município durante esse intervalo de tempo.

Segundo Paz e Firmo (2018), para a aplicação do modelo do IPCC (2000) é necessário o levantamento de dados da pluviometria anual acumulada ($\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) considerando, no mínimo, uma série histórica de 30 anos. As informações climáticas utilizadas foram os acumulados mensais de precipitação de Caruaru entre os anos de 1988 e 2017, disponíveis no site da APAC.

Os dados climatológicos são utilizados para o cálculo da constante cinética de decaimento (k), seguindo a condição *default* definida pelo IPCC (2000) e utilizada pelo MCT (2010): se precipitação $< 1,000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, então k é igual a 0.065; se precipitação $\geq 1,000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, então k é igual a 0.17. No caso do município de Caruaru, no posto analisado houve 2 casos em que o índice pluviométrico ultrapassou os $1,000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ nos últimos 30 anos, sendo os 1,022.7 milímetros do ano de 2004, o maior valor dentro o histórico analisado.

Segundo o plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos (CARUARU, 2018) a produção média de resíduos sólidos urbanos por habitante é de cerca 0.95 kg/hab/dia , totalizando uma geração média de 330 toneladas/dia. Os dados de composição gravimétrica foram obtidos a partir do plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos.

Resultados e discussão

Ensaio de laboratório

Das 5 amostras de solos analisados da camada de cobertura, 4 foram classificadas como solos arenosos e 1 como solo argiloso, baseado nos ensaios de granulometria e sedimentação. Quanto aos índices de vazios (e) encontrados nas amostras, seus valores variaram entre 0.5 e 0.63, enquanto a porosidade (η) variou entre 33.2% e 38.6%, e, o grau de saturação (S_r) entre 64.5% e 90.6%. A presença de um solo predominante arenoso na camada de cobertura e os resultados do índice de vazios, da porosidade e do grau de saturação indicariam um alto fluxo de gás pela camada, contudo, as altas espessuras da camada (entre 0.80 e 1.35 m) foram um fator significativo na redução do fluxo de gás através da camada de cobertura.

No ensaio de compactação utilizando o Proctor Normal, as amostras tiveram um comportamento similar apesar de pequenas variações nos valores. Quanto ao grau de compactação, todas as amostras apresentaram valores abaixo do ideal, mostrando assim que a execução de compactação da camada de topo do aterro sanitário não foi realizada corretamente.

Ensaio de campo

Nas Figuras 9a e 9b estão os gráficos dos ensaios de placa na camada de cobertura A1 e E1 com as concentrações dos gases e as variações das temperaturas internas e externas em função do tempo de duração do ensaio. Observou-se que os ensaios de placa apresentaram baixas concentrações de CH_4 , além de não apresentar indício de CO_2 . As quantidades de O_2 , no entanto, se mantiveram idênticas ou muito próximas às encontradas na atmosfera (20.9%). Esse resultado indicou a não geração de biogás ou uma alta eficiência da camada de cobertura na retenção dos gases. O fluxo total de CH_4 através da camada de cobertura no Aterro Municipal de Caruaru durante a realização da pesquisa foi de $2.99 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ a $12.005 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, considerando toda a área de disposição de resíduos. Por sua vez, os fluxos de CH_4 obtidos no aterro sanitário de Campina Grande, Paraíba, foram bem inferiores, variando de 0 a $0.09 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ onde se encontra com camada de cobertura bem compacta. Valores inferiores também foram encontrados por Oliveira, Ritter e Mannarino (2013) no lixão remediado de Seropédica (RJ) que teve uma variação de fluxo de 0 a $2.10 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

A principal dúvida esclarecida pelo ensaio se deu quanto a concentração do biogás no interior do maciço de resíduos. Após a realização dos ensaios de placa de fluxo, por conta dos baixos valores obtidos, levantou-se a hipótese de que talvez não houvesse mais geração de biogás sob a camada de cobertura.

Contudo, apesar de não serem medidas concentrações em todos os ensaios, os 5 pontos analisados no dreno de biogás apresentaram CH_4 com valores iguais ou superiores aos identificados durante os ensaios de placa de fluxo. Em 3 pontos desses drenos (A, B e D) foram também identificadas

concentrações de CO₂, gás esse que não havia sido encontrado nos ensaios de placa, mostrando que nesses pontos, as camadas de cobertura se mostraram eficientes quanto a retenção desse gás. Por sua vez, o ponto E demonstrou a menor eficiência, pois as concentrações encontradas sob a camada foram as mesmas encontradas na superfície pelo ensaio de placa de fluxo.

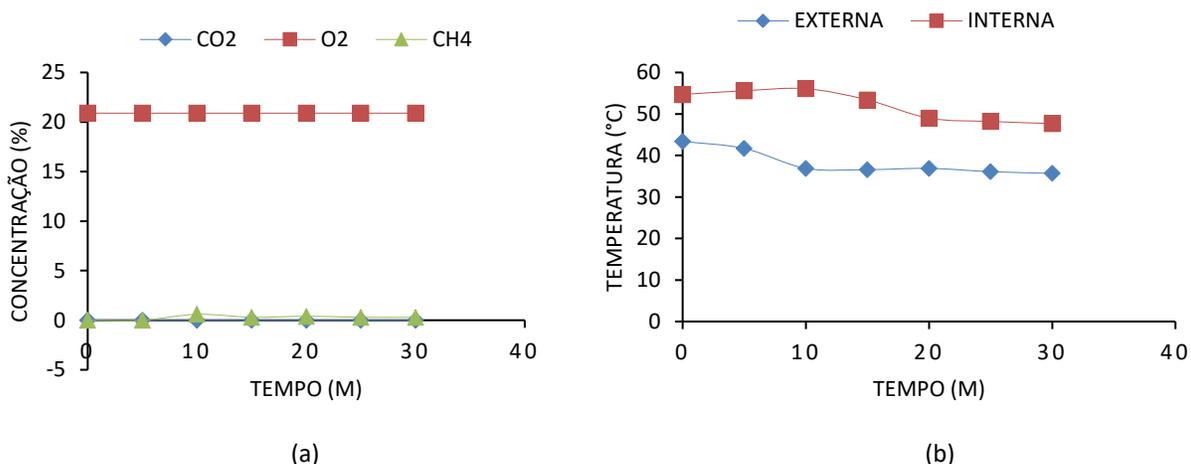


Figura 9. Ensaio de placa A1: (a) concentrações dos gases x tempo; (b) variações das temperaturas internas e externas x tempo.

Quanto aos ensaios realizados nos drenos de gás do aterro sanitário, indicaram que, após a aplicação dos métodos de correção estatística e as devidas conversões, os drenos emitem anualmente cerca de 68,269 t/ano de CH₄. As Figuras 10a a 10b apresentam as medições da massa e do fluxo de CH₄ nos drenos do aterro sanitário de Caruaru.

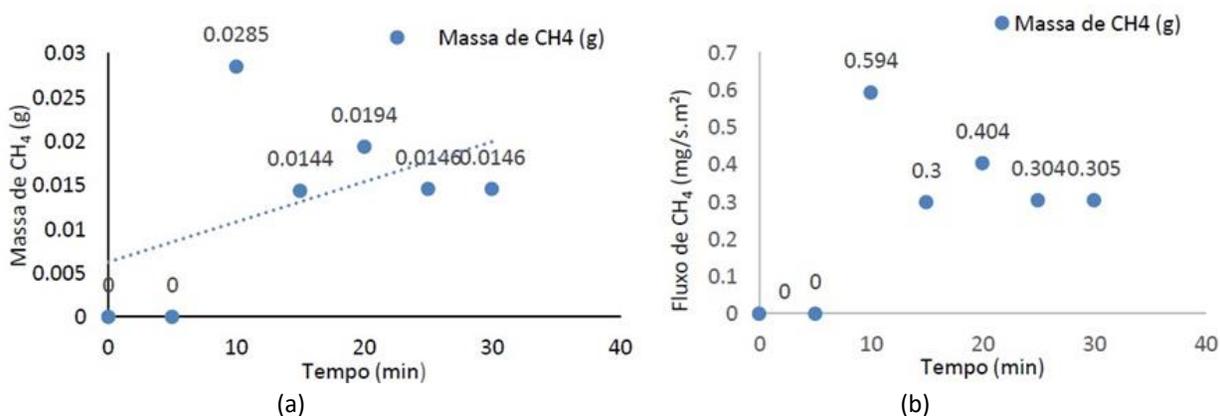


Figura 10. (a) Massa de CH₄ durante o ensaio A1 (b) Fluxo de CH₄ durante o ensaio A1.

Na Tabela 2 estão detalhados os dados de fluxo e a massa de metano em cada um dos ensaios e as projeções em massa e volume para o período de 12 meses.

Tabela 2. Fluxo e massa de CH₄ e projeções de emissões.

Ensaio	% de CH ₄ na placa	Massa de CH ₄ na placa (g)	Fluxo de CH ₄				Classificação do fluxo	
			g/s. m ²	g/dia. m ²	Kg/ano. m ²	m ³ /m ² . dia		m ³ /m ² . ano
A1	0.3	0.014	0.000100	8.640	3.110	0.0144	5.173	Baixo
D1	0.4	0.020	0.000140	12.010	4.323	0.0199	7.160	Baixo
D4	0.1	0.005	0.000034	2.998	1.079	0.0047	1.704	Baixo
E2	0.2	0.010	0.000069	5.996	2.158	0.0096	3.454	Baixo
E3	0.3	0.015	0.000104	8.985	3.234	0.0142	5.121	Baixo
E4	0.2	0.010	0.000069	5.996	2.158	0.0095	3.437	Baixo

Realizando-se uma comparação entre os valores obtidos por meio dos ensaios nos drenos e os valores obtidos por meio dos ensaios com a placa de fluxo, tem-se que aproximadamente 10,5%, considerando o melhor resultado dos ensaios, e 31.7%, considerando o pior, de toda a emissão de metano do aterro que chega à atmosfera através da camada de cobertura do aterro, naturalmente os outros 89.5% a 68.3%, levando em conta o mesmo raciocínio, são conduzidos até o ambiente externo através do sistema de drenagem de gás. Tomando-se uma média entre os resultados obtidos nos ensaios, obtém-se um valor de 22.36% de emissões fugitivas.

Os ensaios realizados nos drenos 02 e 04 foram os que apresentaram as maiores concentrações de gás metano e dióxido de carbono, com 56% e 17.5% de CH₄ e 43% e 15.5% de CO₂ ao final do ensaio, respectivamente. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de concentração dos gases e pressão nos drenos de gás.

Tabela 3. Resumo dos ensaios nos drenos de gás.

Dreno	Duração (min)	Concentração final dos gases (%)			Pressão (kPa)	
		CH ₄	CO ₂	O ₂	Mín.	Máx.
01	30	1.1	0.8	20.3	0.000	0.042
02	40	56.0	43.0	0.2	0.000	0.025
03	30	0.3	0,0	20.9	0.000	0.012
04	60	17.5	15.5	12.1	0.061	0.084
05	40	1.0	0.6	20.6	0.000	0.025
06	30	0.2	0.0	20.8	0.003	0.009
07	40	0.4	0.0	20.9	0.000	0.032
08	40	0.3	0.0	20.9	0.000	0.019
09	30	0.5	0.0	20.9	0.000	0.006

Para o cálculo de vazão foi utilizada a metodologia aplicada a Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – Medição do fluxo de fluídos em condutos fechados, que é um método de velocidade de área, usado em métodos de medição de vazão em condições de fluxo turbulento ou assimétrico em dutos circulares, no qual a velocidade do gás é obtida a partir da diferença das pressões. A duração dos ensaios foi de pelo menos 30 minutos para que houvesse a estabilização da leitura. As determinações das vazões nos drenos estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Fluxo de metano nos drenos de gás.

Dreno	CH ₄ (%)	Velocidade	Vazão (m ³ /s) Ø = 25.4 mm	CH ₄				
				Vazão			Fluxo	
				m ³ /s	m ³ /h	m ³ /ano	kg/m ² . s	kg/m ² . ano
01	1.1	1.340	0.0340	0.000374	1.34742	11,803.46	0.000299	9,439.63
02	56	1.364	0.0346	0.019398	69.8345	611,750.20	0.015819	498,855.68
03	0.3	1.336	0,0339	0.000102	0.36650	3,210.52	0.000008	2,581.66
04	17.5	1.343	0.0341	0.005971	21.4961	188,305.90	0.004786	150,934.17
05	1.0	1.332	0.0338	0.000338	1.21809	10,670.46	0.000274	8,633.41
06	0.2	1.332	0.0338	0.000067	0.24354	2,133.44	0.000054	1,726.15
07	0.4	1.325	0.0337	0.000135	0.48467	4,245.75	0.000001	3,471.32
08	0,3	1.320	0.0335	0.000101	0.36214	3,172.32	0.000083	2,612.57
09	0.5	1.323	0.0336	0.000168	0.60485	5,298.51	0.000138	4,439,20
					TOTAL	840,590.50		682,693.79

Segundo a estimativa realizada utilizando-se o método de decaimento de primeira ordem do Guidelines (1996) e do Good Practice Guidance (2000), na melhor das hipóteses o aterro sanitário municipal de Caruaru poderia gerar aproximadamente 4,750 toneladas de CH₄ para o ano estudado. De acordo com os estudos de Quadros, Audibert e Fernandes (2018) no aterro encerrado de Londrina, PR, sugere-se uma produção de 9,600 toneladas de CH₄, maior que o aterro de Caruaru. Sugere-se que tal valor associado ao aterro de Londrina pode ser justificado por se tratar de um aterro encerrado e coberto, cuja análise foi realizada um ano após seu encerramento, reduzindo bastante a disponibilidade de oxigênio no meio.

Por sua vez, inúmeros fatores podem ter contribuído para um valor reduzido de fluxo de biogás no aterro de Caruaru, sendo os principais a presença de altos índices de O₂ encontrados sob a camada de cobertura nos ensaios e o uso constante de recirculação de lixiviado, pelo qual o efluente é aspergido diretamente sobre a camada de cobertura aumentando assim a umidade e a linha piezométrica no interior do maciço. Tais atenuantes podem impedir ou dificultar a fase metanogênica da biodegradação.

Também foram identificados em diversos pontos a presença de fissuras na camada de cobertura. Esse tipo de patologia prejudica a eficiência da camada de cobertura, criando vazios conectados e aumentando assim a permeabilidade do meio.

Considerações finais

Durante o período de atividade do aterro municipal de Caruaru, a quantidade de metano que chegava até a atmosfera através da camada de cobertura pode ter sido maior, uma vez que alguns pontos gravavam quantidades insignificantes de CH₄.

Em alguns casos, a pequena quantidade gerada de metano alcançava a superfície da camada de cobertura, atravessando-a, demonstrando que o tipo de material utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário municipal de Caruaru não obteve a mesma eficiência de uma camada de argila compactada, mesmo tendo uma espessura maior que a recomendada, seja por permitir emissões fugitivas do biogás ou por prejudicar a sua geração por conta da infiltração de líquidos e consequente aumento da umidade no interior do maciço.

Através deste estudo, sugere-se que o aterro sanitário municipal de Caruaru poderia gerar aproximadamente 4,750 toneladas de CH₄ para o ano estudado. Contudo, realizando-se as devidas correções em campo, este valor poderá elevar.

Referências bibliográficas

- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2021) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020*. Acesso em: 08 de agosto de 2021, disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2020.pdf>
- APAC, Agência Pernambucana de Águas E Clima (2019) *Monitoramento Pluviométrico de Caruaru*. Acesso em 27 de agosto de 2019, disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>
- Biondi, M., Nascimento C. A., Williams, C., Adelazil, F. B. N. (2019) Teores naturais de bário em solos de referência de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **35**(5): Acesso em: 24 de fevereiro de 2019, disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180221126036>
- Caruaru, Prefeitura Municipal de Caruaru (2018) *Plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos*. Acesso em: 24 de fevereiro de 2020, disponível em: <https://caruaru.pe.gov.br/wp-content/uploads/2019/05/Dec037-Plano-de-Saneamento-e-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos.pdf>
- Costa, M. D., Mariano, M. O. H., Araujo, L. B., Jucá, J. F. T. (2018) Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Eng. Sanit. Ambient.*, **23**(01), Jan-Feb 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018160393>
- Doherty, J. (2018) Why is this trash can yelling at me? big bellies and clean green gentrification. *Anthropology Now*, **10**(1), 93-101. <http://dx.doi.org/10.1080/19428200.2018.1437983>

- Espírito, J. G. M., Imbiriba, B. C. O., Ramos, J. R. S., Couto, L. L., Mitschein, T. A. (2021) Percepção da comunidade sobre a poluição por odores de um aterro sanitário na Amazônia Oriental Brasileira. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, **12**(5), 199-209, 2021. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0018>
- Franqueto, R., Martins, E. H., Cabral, A. R., Schirmer, W. N. (2021) Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário. *Revista UNINGÁ Review*, **35**(eRUR2603) ISSN 2178-2571. Acesso em: 22 setembro 2021, disponível em: <http://34.233.57.254/index.php/uningareviews/article/view/2603>
- Gioda, A. (2018) Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados para cocção e sua influência no aquecimento global. *Quim. Nova*, **41**(8), 839-848. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170260>
- Goldenberg, M., Reddy, K.R. (2017) Sustainability Assessment of Conventional and Alternate Landfill Cover Systems. *Geotechnical Frontiers 207*, Orlando, Flórida.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (1997) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories. Reference Manual, Houghton JT, Meira Filho LG, Lim B, Treanton K, Mamaty I, Bonduki Y, Griggs DJ, Callander BA (Eds), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2000) *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Hayama, Japan.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2020) *Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions – Guideline for National Greenhouse Gas Inventories*. United Nations for Environmental Program. The Organization for Economic Cooperation and Development and The International Energy Agency. London, UK.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Climate change 2021 The Physical Science Basis*. Summary for Policymakers. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland.
- Leleux, B., Kaaij, J. V. D. (2019) Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. In: *Estratégias Vencedoras de Sustentabilidade Cham: Palgrave Macmillan*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97445-3_5
- Maciel, F.J. (2003) *Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE*, Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 159pp. Acesso em: 22 de janeiro de 2020, disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5806>
- Maciel, F. J. (2009) *Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Doutorado - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 355pp. Acesso em: 22 de janeiro de 2020, disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5213>
- Mariano, O. H. M. (2008) *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, 232 pp. Acesso em: 05 de janeiro de 2020, disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5082>
- MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia (2010) Emissões de Gases de Efeito Estufa no Tratamento e Disposição de Resíduos. *Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. Brasília – DF. Acesso em: 05 de maio de 2021, disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial/pdf/inventario2/rr_residuos_ii_cn.pdf
- Moreira, F. G. S., Guedes, M. J. F., Monteiro, V. E. D., Melo, M. C. Emissões fugitivas de biogás em camada de cobertura de solo compactado em aterro sanitário. *Eng. Sanit. Ambient.* **25**(2), Mar-Apr 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020189648>
- Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – Measurement of Fluid flow in closed conduits. Velocity área methods. Methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of currentmeters or Pilot statis tubes.
- Oliveira, L. R. G. (2013) *Estudo das emissões de biogás em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido urbanos*. Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de

- Pernambuco, 93 pp. Acesso em: 01 de fevereiro de 2021, disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11627>
- Oliveira, A.C.E., Ritter, E., Mannarino, C.F. (2013) Diagnóstico e avaliação de emissões fugitivas de biogás na camada de cobertura final da central de tratamento de resíduos de Nova Iguaçu e do lixão de Seropédica, Rio de Janeiro. *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013*, Goiânia. Anais. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. p. 1-8.
- Oliveira, L. R. G., Jucá, J. F. T., Mariano, M. O. H., Norberto, A. de S. (2020) Estudo das Emissões de Biogás de Camadas de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, **13**(6), 731–748. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.67920>
- Paz, D. H. F., Firmo, A. L. B. (2018) *Estimativa da geração de metano proveniente dos locais de disposição final de RSU em Pernambuco seguindo as diretrizes do Plano Estadual de Resíduos Sólidos*. *Revista DAE, São Paulo*, **211**(66), 5-19.
- Pernambuco, Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (2020) *Diagnóstico: Destinação de resíduos sólidos em PE – 2018/2019*. Acesso em 29 de março de 2020, disponível em: <http://www.tce.pe.gov.br/internet/index.php/estudos-e-levantamento-novo>
- Quadros, A., Audibert, J. L., Fernandes, F. Decaimento das emissões de biogás após um ano do encerramento de um aterro controlado de uma cidade de 500.000 habitantes. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina*, **39**(1), 61-68, jan./jul.2018.