

Estudo da composição dos gases de aterro sanitário sob diferentes condições de bombeamento

Study of the composition of landfill gases under different pumping conditions

- **Data de entrada:**
03/02/2021
- **Data de aprovação:**
04/05/2022

Cássia Liliane Alves Cavalcante^{1*} | Gemelle Oliveira Santos¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.028>

ORCID ID

Cavalcante CLA  <https://orcid.org/0000-0002-7726-6590>

Santos GO  <https://orcid.org/0000-0003-1852-8770>

Resumo

O estudo objetivou avaliar a influência das alterações na pressão de bombeamento sobre a qualidade e a vazão dos gases em 6 poços do Aterro Sanitário de Caucaia-CE, sendo 2 poços verticais de PEAD, 2 poços verticais de concreto e 2 poços horizontais de PEAD. O monitoramento ocorreu entre maio de 2019 e março de 2020, totalizando 12 campanhas. Para as leituras das concentrações foi utilizado o Leitor de Gás GEM5000 e realizados ajustes na pressão de sucção com a válvula do cabeçote 25% aberta, 50, 75 e 100%. Nos poços monitorados, a concentração de CH₄ variou entre 56,4 e 58,7%, a concentração de CO₂ variou de 37,4% a 39,9%, a concentração de Outros Gases variou de 2,1% a 4,8% e a concentração de O₂ variou de 0,3 a 0,9%. Cada poço teve uma particular condição de operação; entretanto, considerando a maior concentração de metano e menor presença de contaminantes, foi possível concluir que a abertura de 25% (pressão entre -1,39 e -2,18mb) foi a ideal para otimização da captação.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Aterro sanitário. Gases.

Abstract

The study aimed to evaluate the influence of pumping pressure changes on the quality and flow of gases in 6 wells of the Sanitary Landfill in Caucaia-CE, being 2 vertical wells of PEAD, 2 vertical wells of concrete and 2 horizontal wells of PEAD. The monitoring took place between May 2019 and March 2020, totaling 12 campaigns. For the concentration readings, the GEM5000 Gas Reader was used and adjustments were made to the suction pressure with the head valve opening varying 25, 50, 75 and 100%. In the monitored wells, the concentration of CH₄ varied from 56,4 to 58,7%, the concentration of CO₂ varied from 37,4% to 39,9%, the concentration of other gases varied from 2,1% to 4,8% and the O₂ concentration varied from 0,3 to 0.9%. Each well presented a particular operating condition, however, considering the highest concentration of methane and the lowest presence of contaminants, it was possible to conclude that the 25% opening (pressure between -1.39 and -2.18mb) was ideal for the capture optimization.

Keywords: Solid Waste. Landfill. Gases.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Autora correspondente:** cassialacavalcante@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

O envio de resíduos sólidos para os aterros sanitários vem crescendo paulatinamente no Brasil, e os diversos processos que ocorrem no interior das células de aterramento (atrito entre os materiais, mudanças na granulometria dos resíduos, recalques, elevação de temperatura, crescimento microbiano, reações de oxidação-redução), sob influência também das condições externas (regime de chuvas, pressão, temperatura, ventos), resultam na degradação dos resíduos e na geração de lixiviados e gases.

A extração dos gases e a drenagem dos líquidos são formas de reduzir a pressão interna no maciço de resíduos, permitir a acomodação das camadas, aumentar a estabilidade do aterro sanitário, favorecer propriedades geomecânicas e viabilizar o tratamento e/ou aproveitamento desses dois subprodutos.

A captação ativa dos gases de aterro está geralmente associada com algum projeto de aproveitamento do gás metano (para queima direta ou geração de energia térmica ou elétrica) e demanda a escolha de bons materiais para compor o sistema de drenagem (geralmente são utilizados tubos de PEAD), precisão na profundidade e distanciamento dos poços verticais e na inclinação dos poços horizontais, além de proteção mecânica e adequada pressão de sucção.

A pressão necessária para extrair os gases do interior do aterro sanitário depende de muitos fatores: distância entre o aterro e a planta de aproveitamento (que influencia na perda de carga e em alterações na qualidade dos gases), espaçamento entre os poços, tipo de drenagem, qualidade do sistema de impermeabilização superior do aterro, concentração e volume dos gases. Uma pressão inadequada pode gerar explosões em qualquer ponto do sistema (TERRAZA; WILLUMSEN, 2009), aumentar custos com energia elétrica, captar maiores teores de contaminantes ou mesmo su-

utilizar a planta de aproveitamento energético (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA, 2009).

Nesse sentido, o dimensionamento dos componentes de uma usina de aproveitamento do metano dos aterros também deve considerar as condições geográficas e climáticas de cada local. De acordo com Kashyapa; Chughb; Nandakumar (2016), a decomposição de resíduos em países tropicais é muito mais rápida em comparação com os países de clima temperado e, assim, os aterros atingem um estágio metanogênico estável muito rapidamente, com uma elevada produção de metano dentro do 3º ao 20º ano.

Para Sun et al. (2019), o tipo de resíduo existente no local exerce mais influência sobre a geração de CH_4 que a própria taxa de biodegradação (que tem maior influência sobre a velocidade de geração). De acordo com o Xu; Qin; Hac (2019), a produção ou inibição de CH_4 depende da tolerância dos microrganismos metanogênicos às concentrações de ácidos graxos.

Alguns indicadores têm um efeito positivo na produção de CH_4 : o pH (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015), a compactação dos resíduos (XU; QIN; HAC, 2019). Outros indicadores, como a pressão atmosférica, afetam a emissão, como destacaram Czepiel et al. (2003), Aghdam; Scheutz; Kjeldsen (2019). Segundo essas duas publicações, quando a pressão atmosférica está alta, mais ar entra no aterro, o que resulta em uma maior taxa de fluxo de biogás, porém com menor % de CH_4 em função da diluição.

O fluxo de gás também sofre influência das alterações temporais na permeabilidade do meio resultantes da variação no teor de precipitação e umidade (AGHDAM; SCHEUTZ; KJELDSEN, 2019). Resíduo altamente compactado ou com alto nível de umidade resulta em menor eficiência de captura de CH_4 (JUNG et al., 2011). A difusão dos gases também se reduz em espessas camadas de resíduos (ZHANG; MATSUTO, 2013). A diferença

entre a temperatura do resíduo e a temperatura ambiente também influencia o movimento do gás (MATSUTO et al., 2015).

Conforme Faitli et al. (2014), os aterros sanitários representam grandes reservatórios de calor e uma enorme quantidade pode ser usada desde que as propriedades térmicas dos aterros sejam bem caracterizadas, e o calor, armazenado. Esse calor é consequência de processos físicos (condensação da água), químicos (hidrólise de substratos sólidos e produção de CO_2 e CH_4) e microbiológicos (a atividade metabólica dos microrganismos e a respiração microbiológica). O calor do biogás pode ser aplicado para geração de eletricidade e, dependendo da sua qualidade, esse biogás pode ser usado como gás natural após remoção de sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e vapor de água (NIKKHAH et al., 2018).

Entende-se de Silva e Campos (2008) que o O_2 existente em poços com extração ativa decorre do(a): entrada de ar atmosférico pelas trincas e fissuras existentes em volta do poço sob sucção; rompimento da tubulação ou flanges mal apertados; poços localizados ao lado de drenagens de águas pluviais. A aeração no aterro sanitário tem como efeitos colaterais negativos o aumento das emissões de CO_2 e aumento da liberação de um potente gás de efeito estufa (N_2O), conforme Brandstätter; Prantl; Fellnera (2020). Um aterro aerado produz metade do CH_4 produzido por um aterro anaeróbico de tamanho igual (SUTTHASIL et al., 2019).

Conforme Liu et al. (2018), o acúmulo excessivo de ar próximo a um poço aumenta acentuadamente a temperatura em função do crescimento das reações químicas, enquanto a ocorrência de caminhos preferenciais tem efeito significativo sobre o fluxo e a distribuição do oxigênio em aterros. A direção do fluxo também muda com o assentamento mecânico dos resíduos aterrados (TINET; OXARANGO, 2010) e com a recirculação de lixi-

viados ou infiltração de águas de chuva (JUNG et al., 2011).

Em 2019, uma parceria entre o IFCE (Campus Fortaleza) e a empresa responsável pela exploração do gás metano no Aterro Sanitário de Caucaia - ASC (a GNR Fortaleza) resultou em uma pesquisa de mestrado cujo objetivo principal foi avaliar a influência das alterações da pressão de bombeamento (sucção) sobre a qualidade dos gases captados por alguns poços do ASC. Captar gases de melhor qualidade influencia positivamente na operação do aterro, visto que a abertura das válvulas dos cabeçotes ocorria de forma sem critério, o que aumentava a entrada de contaminantes no sistema (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono e outros), com prejuízos financeiros e operacionais para a planta de aproveitamento.

O presente artigo resume uma parte dos resultados dessa pesquisa que, em termos experimentais, começou em maio de 2019 e encerrou-se em março de 2020, totalizando 12 campanhas de campo.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi realizada no Aterro Sanitário Caucaia (ASC), o maior aterro sanitário do Estado do Ceará, localizado na Região Metropolitana de Fortaleza (capital do Estado do Ceará), com 123 hectares. O empreendimento começou a operar em 1991 com os resíduos do município de Caucaia-CE e, em 1998, passou a receber os resíduos coletados em Fortaleza (capital do Estado). Em 2015, o ASC recebeu as primeiras melhorias para instalação de um projeto de aproveitamento comercial e energético do gás metano. Em 2017, a planta entrou em operação de forma experimental.

Na época da pesquisa, o aterro recebia cerca de 5 (cinco) mil toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia e encontrava-se em fase final de operação. A área total do ASC equivale a 123,20 hec-

tares e a célula estudada, chamada de Lateral E (Fig. 1), possuía uma área de 9,3 hectares e altura média de 60m. Os poços horizontais monitora-

dos alcançavam resíduos mais novos (< 05 anos), enquanto os poços verticais perfuram resíduos de diferentes camadas e idades.



Figura 1 - Identificação da Lateral E, área de estudo da pesquisa

Fonte: Google Maps, adaptado pela autora (2020)

No aterro sanitário há um conjunto de poços (verticais e horizontais) interligados a um sistema de bombeamento/sucção que extrai e envia para purificação o metano (aproximadamente $6.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). A pesquisa desenvolvida monitorou

06 poços do ASC (Fig. 2 e 3) em função dos recentes problemas que apresentaram na qualidade dos gases. Foram 02 poços verticais de PEAD (chamados PP's), 02 poços verticais de concreto (PV's) e 02 poços horizontais de PEAD (PH's).



Figura 2 - Poços analisados na pesquisa de campo no ASC

Fonte: Autora (2020)

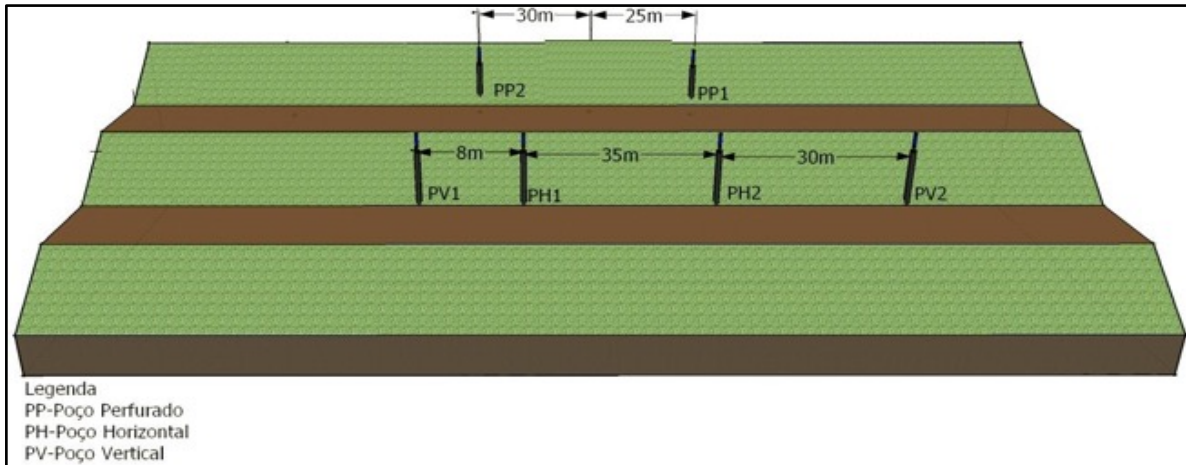


Figura 3 - Distribuição dos poços
 Fonte: Autora (2020)

Em cada poço foi realizada a leitura das concentrações de metano (%), oxigênio (%), dióxido de carbono (%), outros gases (%), temperatura (°C), pressão (mb) e fluxo ($m^3 \cdot h^{-1}$) com o equipamento da Landtec GEM5000. Foram realiza-

dos ajustes e testes na pressão de sucção para determinar as condições ótimas de captação de metano ($m^3 \cdot h^{-1}$) sob 04 diferentes situações: com a válvula do cabeçote 25% aberta, 50, 75 e 100% (Fig. 4).

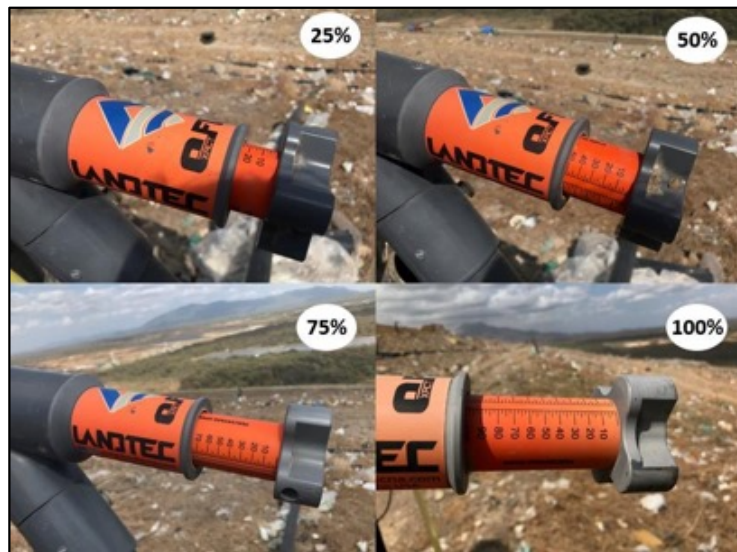


Figura 4 - Cabeçote do poço em diferentes situações (25%, 50%, 75% e 100% aberta)
 Fonte: Autora (2020)

O princípio de detecção do metano e do gás carbônico é baseado na capacidade que esses gases têm de absorver radiação eletromagnética na faixa do infravermelho. Já a detecção do oxigênio é feita mediante célula eletroquímica interna. O equipamento é capaz de realizar medições de 0 a

100% (% em volume) de CH_4 e CO_2 , com precisão típica de $\pm 0,3\%$ para concentrações até 5%, de $\pm 1\%$ para concentrações entre 5 e 15% e de $\pm 3\%$ para concentrações maiores que 15%. Para o oxigênio, a faixa de leitura varia entre 0 e 25% com uma precisão de $\pm 1\%$.

O monitoramento iniciou-se em maio de 2019 e se encerrou em março de 2020, sempre no turno da manhã, totalizando 12 campanhas de campo com intervalo de tempo mínimo de 15 dias. Cada leitura da concentração dos gases ocorreu durante 120 segundos em cada uma das 4 posições da válvula. Entre as leituras, foi realizada uma “purga” de 15 segundos no equipamento para limpeza. O trabalho de campo foi encerrado pelo início da Pandemia da COVID-19 no estado.

3 RESULTADOS

A pressão de bombeamento e a concentração dos quatro gases variaram ao longo do monitoramento (ou seja, 1^a até a 12^a campanha) em todos os poços, bem como de acordo com os sucessivos ajustes na abertura da válvula do cabeçote.

No Poço Perfurado (PP1), a pressão média variou entre -2,0 e -5mb, enquanto no PP2 variou entre -2,2 e -5,0mb. As maiores variações na pressão nesses dois poços ocorreram com a válvula 100% aberta. As concentrações dos gases captados pelo PP1 e PP2 podem ser observadas na Tabela 1 e 2.

Tabela 1 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PP1

Abertura da Válvula	PP1	Pressão (-mb)	T (°C)	Concentração (%)			
				M	D	OG	O
25%	Média	2,0	48	58	39	3	0,3
	DP	0,5	3,2	1	1	1	0,04
50%	Média	3,3	50,9	57	39	3	0,3
	DP	1,5	3,2	2	1	1	0,05
75%	Média	4,4	50,3	57	39	3	0,3
	DP	1,5	1,4	1	1	1	0,07
100%	Média	5	50,3	56	40	3	0,3
	DP	1,8	1,3	2	1	2	0,1

Legenda: T (Temperatura), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão). Valores arredondados pelo Excel.
Fonte: Autora (2020)

Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%), nos dois Poços Perfurados, observou-se uma relação inversa entre a pressão e a concentração de CH₄. Enquanto no PP1

houve uma relação direta da pressão com os demais componentes (CO₂, OG e O₂), o PP2 teve uma relação inversa com o CO₂, e direta com OG e O₂.

Tabela 2 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PP2

Abertura da Válvula	PP2	Pressão (-mb)	T (°C)	Concentração (%)			
				M	D	OG	O
25%	Média	2,0	42,8	59	39	2	0,3
	DP	0,5	2,5	1	1	1	0,04
50%	Média	3,3	43,6	58	39	2	0,3
	DP	1,5	2,8	1	1	1	0,1
75%	Média	4,4	43,7	58	39	2	0,3
	DP	1,5	2,5	1	1	1	0,04
100%	Média	4,9	43,9	58	39	3	0,3
	DP	1,8	3,9	1	1	1	0,1

Legenda: T (Temperatura), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão). Valores arredondados pelo Excel.
Fonte: Autora (2020)

No Poço Perfurado PV1, a pressão média variou entre -1,6 e -4,5mb, enquanto no PV2 variou entre -1,8 e -4,5mb. As maiores variações na pressão no PV1 ocorreram com a válvula

100% aberta, enquanto no PV2 ocorreu com 75% aberta. As concentrações dos gases captados pelo PV1 e PV2 podem ser observados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PV1

Abertura da Válvula	PV1	Pressão (-mb)	T (°C)	Concentração (%)			
				M	D	OG	O
25%	Média	2,1	47,4	57	39	3	0,3
	DP	0,5	1,9	1	1	1	1
50%	Média	3,3	48,1	57	39	3	0,4
	DP	1,5	2,1	2	3	1	0,2
75%	Média	4,4	48,3	57	39	4	0,4
	DP	1,5	2,4	2	3	1	0,2
100%	Média	4,9	48	57	38	4	0,4
	DP	1,8	2,9	2	3	2	0,3

Legenda: T (Temperatura), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão). Valores arredondados pelo Excel.
Fonte: Autora (2020)

Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%) nos dois Poços Verticais, observou-se uma relação inversa entre a pressão e a concentração de CO₂, ou

seja, quanto maior a pressão, menor a concentração desse gás. Para os outros três componentes do gás, a relação com a pressão foi direta.

Tabela 4 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PV2

Abertura da Válvula	PV2	Pressão (-mb)	T (°C)	Concentração (%)			
				M	D	OG	O
25%	Média	2,1	46,1	57	38	4	0,3
	DP	0,5	2,3	2	2	1	0,1
50%	Média	3,3	46,4	57	38	4	0,3
	DP	1,5	2,4	2	2	1	0,2
75%	Média	4,4	46,4	57	38	4	0,3
	DP	1,5	2,8	1	1	1	0,1
100%	Média	4,9	46,2	58	37	4	0,3
	DP	1,8	2,4	2	2	1	1,0

Legenda: T (Temperatura), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão). Valores arredondados pelo Excel.
Fonte: Autora (2020)

No Poço Perfurado PH1, a pressão média variou entre -1,4 e -3,7mb, enquanto no PH2 variou entre -1,4 e -3,7mb. As maiores variações na pressão no PH1 ocorreram com a válvula 50%

aberta, enquanto no PH2 ocorreu com 100% aberta. As concentrações dos gases captados pelo PH1 e PH2 podem ser observados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PH1

Abertura da Válvula	PH1	Pressão (-mb)	T (°C)	Concentração (%)			
				M	D	OG	O
25%	Média	2,1	53,2	57	38	4	0,6
	DP	0,5	2,4	1	1	1	0,1
50%	Média	3,3	53,4	57	38	4	0,6
	DP	1,5	2,1	1	1	1	0,1
75%	Média	4,4	53,5	57	38	4	0,6
	DP	1,5	2,5	1	1	1	0,1
100%	Média	5	53,8	57	38	4	0,6
	DP	1,8	2,1	2	2	1	0,2

Legenda: T (Temperatura), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão). Valores arredondados pelo Excel.

Fonte: Autora (2020)

Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%) nos dois Poços Horizontais, observou-se uma relação inversa entre a pressão e a concentração

de CH₄, ou seja, quanto maior a pressão, menor a concentração desse gás. Para os outros três componentes do gás, a relação com a pressão foi direta.

Tabela 6 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PH2

Abertura da Válvula	PH2	Pressão (-mb)	T (°C)	Concentração (%)			
				M	D	OG	O
25%	Média	2,1	55,1	57	38	5	0,6
	DP	0,5	1,5	1	1	1	0,2
50%	Média	3,3	55,0	58	38	5	0,7
	DP	1,5	1,7	1	1	1	0,1
75%	Média	4,4	55,0	58	38	5	0,8
	DP	1,5	1,5	1	1	1	0,2
100%	Média	5,0	55,4	56	38	5	0,9
	DP	1,8	1,3	2	1	1	0,1

Legenda: T (Temperatura), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão). Valores arredondados pelo Excel.

Fonte: Autora (2020)

A pesquisa também levantou os valores da pluviometria nos três postos de monitoramento da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME mais próximos do aterro estudado, conforme a Fig. 5. Houve um pico no nível de pluviometria no mês de março/2020, iniciando-se a redução a partir de junho/2020, ocorrendo um aumento somente em janeiro/2021.

Em quatro poços (PP1, PP2, PH1, PH2), a concentração média geral de CH₄ diminuiu com o fim das chuvas, ou seja, a concentração de metano (%) foi de 61% em maio/2019 (primeira campanha) para 57% em julho/2019, permanecendo

a concentração abaixo de 57% até dezembro de 2019, quando os milímetros de pluviometria permaneceram próximos a zero.

Já nos outros dois poços (PV1, PV2) as concentrações de CH₄ aumentaram com o fim das chuvas, ou seja, a concentração de metano entre maio/2019 (primeira campanha) até dezembro/2019 foi de 55% até 58%. Como bem explica a literatura (GIOANNIS et al., 2009; SCHROTH et al., 2012; SUTTHASIL et al., 2019), as emissões de CH₄ são maiores em condições molhadas, mas, quando os resíduos estiverem bem estabilizados, o impacto da precipitação diminuirá.

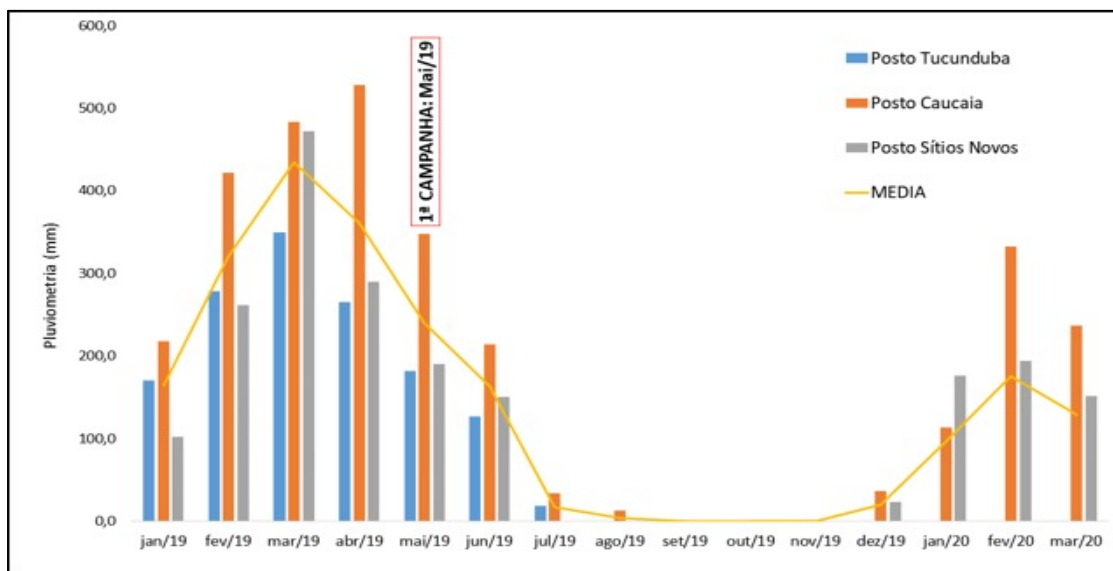


Figura 5 - Comportamento da pluviometria ao longo do período estudado.

Fonte: Autora (2020).

4 DISCUSSÃO

Nessa pesquisa, a predominância da concentração do CH_4 sobre os demais gases (em todos os poços monitorados) indicou a presença da fase metanogênica na área estudada (FISCHER; MAURICE; LAGERKVIST, 1999; KIM, 2003; AYDI et al., 2015; GIOANNIS et al., 2009).

A concentração de CH_4 nessa pesquisa variou entre 56,45 e 58,66%. Para Desideri et al. (2003), as características dos resíduos, a idade do aterro e as condições ambientais podem elevar em mais de 50,00% (em volume).

Alguns fatores devem ter contribuído para resultados parecidos entre os poços estudados: a possível semelhança na composição dos resíduos e no tempo de aterramento, já que os poços monitorados, a pedido dos técnicos do aterro, estavam em uma mesma lateral do aterro sanitário e seus resíduos, provavelmente, passaram pela mesma sequência de degradação, já que foram dispostos na mesma época. Além disso, a proximidade entre os poços limitou a heterogeneidade de alguma forma, concordando com Brandstätter; Prantl; Fellnera (2020).

Nessa pesquisa, o fluxo de gás variou entre 27,05 e 74,60 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (média global: 52,94 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), aumentando em todos os poços com o aumento da pressão de bombeamento, como esperado para poços em perfeito funcionamento e conforme Yu et al., 2009. Verificou-se também que a eficiência da coleta dos gases variou ao longo do monitoramento, como também destacaram Lee; Han; Wang (2017) e Sun et al. (2019). A extração do gás é bastante irregular durante os primeiros anos após o fechamento do aterro (FABBRICINO, 2007), justificando as variações nas vazões encontradas.

Além disso, a compressão do aterro sanitário também afeta o fluxo de gás e gera um gradiente vertical de pressão que aumenta com a profundidade (TINET; OXARANGO, 2010). Por isso, a permeabilidade horizontal é maior que a permeabilidade vertical (YU et al., 2009). A diminuição dos vazios em resíduos mais profundos pode provocar a formação de bolsões de chorume que impedem a passagem do gás (ZHAN et al., 2017; XU; QIN; HAC, 2019), reduzindo a eficiência da recuperação (HU et al., 2020). Quando o chorume preenche parte de um poço, o fluxo de gás também é prejudicado (MA et al., 2019), exigindo

maior pressão de bombeamento. O conteúdo de gás tende a aumentar com o rebaixamento do nível de lixiviado (ZHAN et al., 2017).

Para os maiores valores encontrados, Hu et al. (2020) explicam que grandes quantidades de gás são geralmente bombeadas em zonas nominalmente saturadas do aterro, onde há degradação contínua de resíduos na área de influência do poço. Como o fluido que está sendo recuperado é um gás e não um líquido, essa zona deve ser cuidadosamente estimada para ser eficiente, já que há distribuição heterogênea nas propriedades de transferência e, talvez, na sucção imposta pelo poço (TINET; OXARANGO, 2010). A zona de influência de um poço de gás pode ser limitada quando o resíduo é altamente compactado (JUNG et al., 2011). Quando há uma grande distância entre dois poços, é melhor aumentar a espessura da camada de cobertura e/ou diminuir sua permeabilidade que aumentar o vácuo (YU et al., 2009) para manter o ritmo de extração; nessa pesquisa, quando o vácuo crescia, cresciam os contaminantes.

A eficiência da coleta do gás de aterro varia de acordo com a estratégia de coleta, a operação do sistema, tipo e idade da cobertura empregada (LEE; HAN; WANG, 2017). A coleta pode diminuir cerca de 15%, quando são constatados resíduos em contato com a atmosfera em função da baixa espessura da camada de cobertura diária, presença de erosão, rachaduras e escoamento de lixiviados pelas laterais do talude (AYDI et al., 2015).

A redução da pluviometria em alguns meses do período monitorado contribuiu para o aumento da temperatura dos resíduos e dos gases captados em todos os poços e mais intensamente no PH1 e PH2, pela proximidade destes com a camada de cobertura final e trocas com a atmosfera.

Nessa pesquisa, ocorreu uma relação diretamente proporcional entre a temperatura e a concentração do CH_4 em 04 poços (PP1, PP2, PH1, PH2),

ou seja, onde houve menor concentração do gás CH_4 , houve menor temperatura. O mesmo é indicado nas pesquisas de DESIDERI et al., (2003), MATSUTO et al., (2015), JAFARI; STARK; THALHAMER (2017) e TUPSAKHARE et al., (2020).

Conforme Jafari; Stark; Thalhamer (2017), a temperatura controla a qualidade e a quantidade de gás de aterro dentro de duas faixas de saturação: (1) a faixa mesófila, onde as temperaturas estão entre 20 e 45°C; e (2) a faixa termófila, com temperaturas entre 45-65°C. Nesta pesquisa, todos os poços monitorados estariam classificados como termófilos (considerando apenas a média geral da temperatura), exceto o PP2. As temperaturas observadas nos poços horizontais foram até 11,6°C maiores do que as dos poços verticais, provavelmente pela proximidade dos resíduos com o ambiente externo e como efeito da entrada de ar e oxidação, concordando com Matsuto et al. (2015).

Em quatro poços monitorados (PP1, PP2, PH1, PH2), a concentração de CH_4 diminuiu com o aumento da pressão de bombeamento e, em todos os poços, aumentou a presença de Outros Gases/Contaminantes e O_2 com o crescimento da pressão, reduzindo a qualidade do biogás captado, prejudicando o sistema de aproveitamento e denunciando a necessidade de cuidadosos ajustes na abertura da válvula do cabeçote de cada poço. O CO_2 também aumentou em 03 poços (PP1, PH1, PH2) com o crescimento da pressão.

Conforme Popov (2005), a pressão de bombeamento direciona o ar atmosférico para dentro das camadas mais superficiais ao aterro, fazendo com que aumente a concentração de contaminantes no poço de gás. Ainda segundo o autor, o nitrogênio presente no ar, ao entrar no sistema, é o que requer o maior investimento para ser removido, sendo mais viável impedir que o ar entre.

Os efeitos negativos do nitrogênio sobre a qualidade dos gases de aterro foram estudados por

Price, Barlaz e Hater (2003). No experimento realizado pelos autores, a taxa de produção de CH_4 diminuiu 15% com a adição de nitrato, e essa inibição foi atribuída (i) aos elementos tóxicos intermediários do processo de desnitrificação e (ii) a redução global da decomposição da celulose. Ainda segundo os autores, os aterros sanitários têm significativa capacidade de converter nitrato em nitrogênio, justificando a preocupação com a presença desse elemento (especialmente perto da superfície do aterro, onde a coleta do biogás é mais difícil).

Nessa pesquisa, a relação da concentração de CH_4/CO_2 variou entre 1,42 e 1,55. Conforme Jafari; Stark; Thalhamer (2017), quando essa relação está próxima ou maior que 1,00, tem-se um bom indicador sobre a normalidade da decomposição anaeróbia. Essa razão é usada como um indicador da idade e maturidade dos resíduos (AYDI et al., 2015). O aumento da razão CH_4/CO_2 significa crescimento da produção de CH_4 , do consumo de CO_2 ou de alguma combinação de ambos (TUPSAXHARE et al., 2020). O aumento da temperatura do resíduo, por exemplo, pode provocar uma diminuição na relação entre CH_4/CO_2 , já que afeta a metanogênese (JAFARI; STARK; THALHAMER, 2017).

As concentrações de O_2 nos poços monitorados variaram entre 0,26 e 0,65%, sendo consideradas baixas e adequadas. Silva e Campos (2008) consideram até 3,00% de O_2 como concentrações seguras para aterros sanitários com projetos de aproveitamento do biogás (como o investigado nessa pesquisa); valores acima disso tornam-se perigosos.

O estudo realizado por Jafari; Stark; Thalhamer (2017) encontrou níveis de O_2 no cabeçote do poço acima de 5,00%. Segundo Popov (2005), concentrações iguais ou superiores a 5,00% impedem a digestão anaeróbia e, portanto, a extração do gás para utilização energética pode ser inviável economicamente. Ainda segundo o autor, a concentração de O_2 deve ser monitora-

da diariamente, e números acima de 10,00% podem indicar uma falha na rede extrativa devido à penetração do ar. Além disso, na presença de oxigênio em quantidade volumétrica de 5 a 15%, o metano é explosivo (TINET; OXARANGO, 2010).

A concentração de O_2 no poço de extração depende de vários fatores (MAJDINASAB; YUAN, 2017; LIU et al., 2018): espessura da cobertura, características do gás, textura do solo e condições meteorológicas. Schroth et al. (2012) observaram que as concentrações de O_2 diminuem com o aumento da espessura do solo aplicado na camada de cobertura (nessa pesquisa, verificações esporádicas mostraram camadas com 30-40cm). A presença de uma cobertura de baixa permeabilidade diminui significativamente a área de entrada de ar (TINET; OXARANGO, 2010).

Para a ATDRX (2001), baixos teores de O_2 indicam alta compactação dos resíduos, presença da fase anaeróbia e um bom sistema de isolamento da camada de cobertura com relação à atmosfera. Mesmo assim, a presença de O_2 pode rapidamente transformar o CH_4 em CO_2 (FISCHER; MAURICE; LAGERKVIST, 1999; LEE; HAN; WANG, 2017; LIU et al., 2018). As bactérias metanotróficas são responsáveis pelo processo de oxidação do CH_4 e são organismos aeróbios obrigatórios (MAJDINASAB; YAUN, 2017). Três estudos realizados pelo IPCC sugerem uma taxa de oxidação de CH_4 em torno de 10%; entretanto, é questionável se esse valor é realmente representativo (LEE; HAN; WANG, 2017).

5 CONCLUSÕES

- O monitoramento realizado no aterro sanitário estudado permitiu, de certo modo, prever a melhor condição de funcionamento para cada poço, sugerindo melhorias na eficiência de coleta do metano com redução de contaminantes.

- Com base na literatura consultada, a área pesquisada apresentou características de resíduos na fase metanogênica de degradação, sendo corroborada, em termos energéticos, a decisão pela instalação da estrutura de captação e da planta de aproveitamento dos gases.
- O comportamento das concentrações dos gases nos poços PP1, PP2, PH1 e PH2 seguiu uma mesma tendência, ou seja, com o aumento da pressão, houve diminuição da concentração de CH₄ e aumento da concentração de CO₂, O₂ e O₂. Já os poços PV1 e PV2 tiveram comportamento inverso.
- Cada poço teve uma particular condição de operação; entretanto, considerando a maior concentração de metano e a menor presença de contaminantes (outros gases), foi possível concluir que a abertura de 25% (pressão entre -1,39 e -2,18mb) foi a ideal para otimização da captação.
- A abertura sem critério das válvulas dos cabeçotes, que representa uma rotina no ASC, tem influência negativa sobre a qualidade dos gases captados, especialmente nos poços PV1 e PV2.
- A concentração de CH₄ nos poços monitorados variou vertical e horizontalmente em curtas distâncias.
- Houve uma relação, diretamente proporcional, entre a temperatura e a concentração do CH₄ nos poços monitorados, concordando com a literatura.
- A concentração média geral de CH₄ diminuiu com o fim das chuvas, mostrando a influência da presença ou ausência de água dentro do aterro para a geração desse gás.
- A redução da pluviometria contribuiu para o aumento da temperatura dos resíduos e dos gases captados em todos os poços.

- A temperatura dos gases captados por poços horizontais foi maior que a observada em poços verticais, corroborando o que diz a literatura sobre o comportamento aeróbico e as trocas com a atmosfera nas camadas superiores.
- O aumento da pressão de bombeamento influenciou no aumento da vazão captada, mas prejudicou a qualidade do que foi captado.

6 AGRADECIMENTO

À EMPRESA GNR FORTALEZA, pelos recursos humanos e materiais.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

8 REFERÊNCIAS

- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES & DISEASE REGISTRY - ATDRX. **Landfill Gas Primer: An Overview for Environmental Health Professionals**. ATDRX: Division of Health Assessment and Consultation. 74p., 2001.
- AGHDAM, F.; SCHEUTZ, e.; KJELDEN, C. Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow. **Waste Management**. v. 87, p. 905-914, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.045>
- AYDI et al. Assessment of electrical generation potential and viability of gas collection from fugitive emissions in a Tunisian landfill. **Energy Strategy Reviews**. v. 8, p. 8-14, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.06.002>
- BRANDSTÄTTER, C.; PRANTL, R.; FELLNER, J. Performance assessment of landfill in-situ aeration – A case study. **Waste Management**. v. 101, p. 231-240, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.022>
- CZEPIEL et al. The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions. **Waste Management**. p. 593-598, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00103-X)
- DESIDERI et al. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. **Energy Conversion and Management**. v. 44. p. 1969-1981, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00224-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00224-8)

- EMKES; COULON; WAGLAND, S. A decision support tool for landfill methane generation and gas Collection. **Waste Management**. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.003>
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Estimates of Methane Recovery in Landfill Gas Flaring and Utilisation**. Ireland: Fehily Timoney & Co. Ltd, 2009. 50 p.
- FABBRICINO, M. Operational vacuum assessment for landfill biogas extraction. **Waste Management**. v. 27, ed. 10, p. 1393-1399, 2007.
- FAITLI et al. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. **Waste Management**. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.028>
- FISCHER, C.; MAURICE, C.; LAGERKVIST, A. **Gas Emission from Landfills - An overview of issues and research needs**. 57 p., 1999.
- GIOANNIS, G. D. et al. Landfill gas generation after mechanical biological treatment of municipal solid waste. Estimation of gas generation rate constants. **Waste Management**. v. 29, ed. 3, p. 1026-1034, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.016>
- HU et al. Installation and performance of horizontal wells for dewatering at municipal solid waste landfills in China. **Waste Management**. p.159-168, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.035>
- JAFARI, N. H.; STARK, T. D.; THALHAMER, T. Spatial and temporal characteristics of elevated temperatures in municipal solid waste landfills. **Waste Management**. p. 286-301, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.052>
- JUNG et al. Mitigating methane emissions and air intrusion in heterogeneous landfills with a high permeability layer. **Waste Management**. p. 1049-1058, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.025>
- KASHYAPA, R. K.; CHUGHB, P.; NANDAKUMARC, T. Opportunities & Challenges in Capturing Landfill Gas from an Active and Unscientifically Managed Land Fill Site - A Case Study. **Procedia Environmental Sciences**. v.35, p.348-367, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.015>
- KIM, M. **The study of landfill microbial communities using landfill gas and landfill gas condensate**. 2003. 115p. Tese (Doutorado em Filosofia). Drexel University, Philadelphia, US, 2003
- LEE, U.; HAN, J.; WANG, M. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. **Journal of Cleaner Production**. V. 166, p. 335-342, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016>
- LIU et al. The in situ aeration in an old landfill in China: Multi-wells optimization method and application. **Waste Management**. v. 76. p. 614-620, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.041>
- MA et al. Field measurement of pore pressures and liquid-gas distribution using drilling and ERT in a high food waste content MSW landfill in Guangzhou, China. **Engineering Geology**. v. 250, p. 21-33, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.01.004>
- MAJDINASAB, A.; YUAN, Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review. **Ecological Engineering**. v. 104, p.116-130, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.015>
- MATSUTO, T. et al. Onsite survey on the mechanism of passive aeration and air flow path in a semi-aerobic landfill. **Waste Management**. v.26, p.204-2012, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.007>
- NIKKHAH et al. Hybrid landfill gas emissions modeling and life cycle assessment for determining the appropriate period to install biogas system. **Journal of Cleaner Production**. v. 185, p. 772-780, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.080>
- POPOV, V. A new landfill system for cheaper landfill gas purification. **Renewable Energy**. P. 1021-1029, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.018>
- PRICE, G. A.; BARLAZ, M. A., HATER, G. R. Nitrogen management in bioreactor landfills. **Waste Management**. p. 675-688, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00104-1)
- SCHROTH et al. Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. **Waste Management**. v 32, ed 5, p. 879-889, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.003>
- SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. D. S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes – SP. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 13, n. 1, p. 88-96, jan/mar, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000100012>
- STACHOWITZ, W. H. 15 years of experience in the field of landfill gas disposal – standards, problems, solution, and procedures. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 8., 2001. **Proceedings** [...]. Sardinia, Sardinia: DAS-IB, 2001, p.601-611.
- SUN et al. Evaluation of optimal model parameters for prediction of methane generation from selected U.S. landfills. **Waste Management**. p. 120-127, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.004>
- SUTTHASIL et al. The effectiveness of passive gas ventilation on methane emission reduction in a semi-aerobic test cell operated in the tropics. **Waste Management**. v. 87, p. 954-964, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.013>
- TERRAZA, H.; WILLUMSEN, H. **Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization**. Inter-American Development Bank, 2009, 68p.
- TINET, A.-J.; OXARANGO, L. Stationary gas flow to a vertical extraction well in MSW landfill considering the effect of

mechanical settlement on hydraulic properties. **Chemical Engineering Science**. v. 65, ed. 23, p. 6065-6340, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.09.007>

TUPSAKHARE, et al. The impact of pressure, moisture and temperature on pyrolysis of municipal solid waste under simulated landfill conditions and relevance to the field data from elevated temperature landfill. **Science of The Total Environment**. v. 723, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138031>

XU, Q.; QIN, J.; HAC, J. Municipal solid waste landfill performance with different biogas collection practices: Biogas and leachate generations. **Journal of Cleaner Production**. p. 446-454, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.083>

YU et al. Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills. **Journal of Hazardous Materials**. v. 168, ed. 2-3, p 1404-1416, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.045>

ZHAN et al. Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Liquid-gas interactions observed from a large-scale experiment. **Waste Management**. v. 68, p. 307-318, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.023>

ZHANG, X.; MATSUTO, T. Assessment of internal condition of waste in a roofed landfill. **Waste Management**. v. 33, ed.1, p. 102-108, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.008>