

## *Análise temporal da composição do biogás em aterro sanitário de porte médio*

Por apresentar um alto potencial energético, o biogás gerado em aterros sanitários é uma fonte renovável de energia capaz de gerar calor ou eletricidade, evitando a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e gerando benefícios econômicos aliados ao saneamento ambiental. Tendo em mente esse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a composição do biogás gerado, relacionando-a com o tempo de aterramento dos resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário de Rio Claro/SP. Foi realizada a análise comparativa da temperatura, influência da precipitação pluviométrica na vazão e na concentração de metano (CH<sub>4</sub>) e de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do biogás no período de 18 meses. Conclui-se que a produção de biogás foi menor em áreas mais antigas. Os valores crescentes de vazão de biogás sinalizam o aumento da atividade biológica anaeróbia. A influência da precipitação na geração de biogás foi mais acentuada em células com menor tempo de disposição no aterro.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos; Aterro Sanitário; Sustentabilidade.

## *Temporal analysis of the composition of biogas in a medium-sized landfill*

Due to the high energy potential, the biogas generated in landfills is a renewable source of energy, capable of producing heat or electricity. This process avoids the emission of greenhouse gases in the atmosphere, generating economic benefits allied to environmental sanitation. The aim of this study was to analyze the composition of the biogas produced and relating it to the time of grounding of the solid waste disposed in the landfill in Rio Claro/SP. It was performed a comparative analysis on the temperature, and the rainfall influence on the flow rate and the concentration of methane (CH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) as a source for the period of 18 months. It is concluded that the biogas production was lower in the oldest areas of the city. The increasing flow rate of the biogas indicates the increase in the activity of a biological collection. The rainfall influence on the generation of biogas production was more accentuated in cells with lower time of disposal in the landfill.

**Keywords:** Urban solid waste; Sanitary Landfill; Sustainability.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **18/09/2023**

Approved: **14/11/2023**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

**Sandra Rodrigues Sarro Boarati** 

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/7959433217855341>

<http://orcid.org/0000-0003-2585-1760>

[srsarro@gmail.com](mailto:srsarro@gmail.com)

**Marcus Cesar Avezum de Castro Alves** 

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/7133895068924551>

<http://orcid.org/0000-0001-9260-8045>

[marcus.castro@unesp.br](mailto:marcus.castro@unesp.br)



DOI: 10.6008/CBPC2237-9290.2023.004.0004

### Referencing this:

BOARATI, S. R. S.; CASTRO, M. C. A. A.. Análise temporal da composição do biogás em aterro sanitário de porte médio. **Natural Resources**, v.13, n.4, p.56-73, 2023. DOI:

<http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2023.004.0004>

## INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o desenvolvimento da tecnologia contribuíram para a geração de resíduos sólidos que, quando dispostos em aterros sanitários, sua fração orgânica via degradação anaeróbia gera o biogás (ROODBARI et al., 2012; AHMADIAN et al., 2013; JAIN et al., 2014).

O biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono produzido em aterros sanitários, é utilizado como forma de energia, tornando-se uma estratégia para a substituição de combustíveis fósseis (ASGARI et al., 2017; CONCHA et al., 2019).

É necessário considerar vários fatores na geração de metano em aterros sanitários: A composição dos resíduos e suas variações com o decorrer do tempo, as condições climáticas do ambiente, a gestão operacional (que é um fator impactante na geração do metano) e a captura do gás no aterro sanitário (IBAM, 2001; SPONZA et al., 2004; FRANCOIS et al., 2006; BILGILI et al., 2009; CONCHA et al., 2019).

Visto que 65% da produção de eletricidade do parque gerador brasileiro é composta por hidroelétricas, a quantidade de chuvas afeta a geração de energia no Brasil. Dessa forma, visando a redução dessa dependência da matriz elétrica hidráulica que cede espaço para evitar racionamentos, as instituições do setor energético continuam trabalhando para o provimento da segurança energética.

Os aterros sanitários vêm liderando o crescimento do setor de biogás do Brasil, mas, para a implantação dos projetos, será necessário investimento e incentivo de políticas públicas específicas para o uso energético do biogás na produção de energia elétrica (FERNANDES et al., 2019).

Existem diversos modelos de estimativa de produção de biogás em aterros sanitários (SILVA et al., 2020). De acordo com Dornela et al. (2021) e Castro et al. (2013b), é necessário desenvolver um modelo de estimativa de geração de biogás apropriado para as condições físicas do Brasil, considerando as diferenças regionais, pois o território nacional é extenso e com variação nas condições climáticas, na temperatura e no regime pluviométrico. Essa energia mal reaproveitada poderia estar sendo administrada em prol do desempenho ambiental por meio da sua exploração nos aterros sanitários.

Devido às composições dos resíduos sólidos com elevada matéria orgânica e condições climáticas do Brasil, este possui um potencial elevado de geração de biogás em aterros. A Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás) ressalta que o país tem capacidade de produzir, anualmente, o equivalente a 12 bilhões de litros de diesel via biogás, o que corresponde a cerca de 10% do consumo do combustível em 2015 (MCTIC, 2017).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho, em condições reais de operação do aterro, foi analisar a composição do biogás gerado, relacionando-a com o tempo de aterramento dos resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário de Rio Claro/SP, realizando a análise comparativa da temperatura, influência da precipitação pluviométrica na vazão e na concentração de metano (CH<sub>4</sub>) e de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do biogás no período de 18 meses.

Neste contexto, é necessário o conhecimento da estimativa segura do potencial de geração de biogás, para que possa ser realizado seu aproveitamento em células do aterro sanitário formadas por

resíduos com diversos períodos de aterramento.

A relevância desse artigo está nos dados sobre estimativa de geração para o reaproveitamento do biogás, permitindo a construção de um plano de negócio com maior confiabilidade.

## REVISÃO TEÓRICA

### Geração e disposição final dos resíduos sólidos

De acordo com Marshall et al. (2013), Slagstad et al. (2013) e Dehghanifard et al. (2018), a composição gravimétrica e as taxas de geração de resíduos sólidos urbanos são parâmetros que variam de acordo com cada região. A caracterização deve ser feita localmente, possibilitando uma maior representatividade e confiabilidade das informações (BRAGAGNOLO et al., 2020; IBAM, 2001; FIRMO et al., 2009).

O Brasil tem uma grande quantidade de materiais orgânicos (65%) dispostos no aterro sanitário com grande potencial de geração do biogás, superando os outros países (Tabela 1).

**Tabela 1:** Composição gravimétrica de resíduos sólidos em alguns países.

Composição gravimétrica do lixo de alguns países (%)				
Composto	Brasil	Alemanha	Holanda	EUA
Material orgânico	65,00	61,20	50,30	35,60
Vidro	3,00	10,40	14,50	8,20
Metal	4,00	3,80	6,70	8,70
Plástico	3,00	5,80	6,00	6,50
Papel	25,00	18,80	22,50	41,00

Fonte: Instituto Brasileiro de Administração Municipal (2001).

A estimativa global é de 4 bilhões de toneladas ao ano e, desse montante, 1,6 a 2 bilhões correspondem aos RSU (GUTBERLET, 2015; ALKMIN et al., 2017; ABRELPE, 2017; 2020; BRAGAGNOLO, 2020).

De acordo com a EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2020), as composições de resíduos sólidos urbanos (RSU) brasileiros são de massa heterogênea, com umidade que se aproxima de 50% da massa. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), a composição média de RSU é de: 51,4% matéria orgânica, 2,9 metais, 2,4% vidro, 16,7% outros, 13,5% plástico.

No Brasil, ocorreu um aumento de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano de RSU e a geração per capita de 348 kg/ano para 379 kg/ano, no período de 2010 a 2019, e em 2022 chegou a 81.811.506 t/ano e 381 kg/hab/ano. Foi registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, partindo de 33 milhões para 43 milhões de toneladas. Já a destinação inadequada, como lixões e aterros controlados, registrou-se o valor de 25 milhões para 29 milhões de toneladas por ano, de acordo com a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos (ABRELPE, 2020; 2022).

Existe a necessidade de uma gestão eficiente na disposição final dos RSU, reduzindo impactos ambientais, utilizando novas áreas com mudanças climáticas e reciclando recursos (AGBOZU et al., 2015; WANG et al., 2017; DONG et al., 2018; WANG et al., 2020).

A proibição de disposição de resíduos sólidos de forma inadequada é amparada pela Política Nacional

de Resíduos Sólidos (PNRS), Decreto nº 12.305/2010. A Lei 14.026 foi criada em 2020 com novas abordagens sobre a limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2020).

### **Geração de lixiviado**

O lixiviado – ou percolado – é um líquido produzido pela decomposição química e microbiológica dos resíduos sólidos depositados em um aterro sanitário. Esse resíduo líquido possui uma carga orgânica elevada e de coloração forte. Possui grande variabilidade em sua composição química, pois depende da natureza dos resíduos depositados, e da disposição, do manejo e da idade do aterro. Recebe influência dos fatores climáticos, tais como a temperatura e a quantidade de chuva (IM et al., 2001; IBAM, 2001; KJELDESEN et al., 2002; OZTURK et al., 2003; SALLES et al., 2020).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM, 2001) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2020), o sistema de drenagem visa a captação e drenagem de águas de chuva nas áreas apropriadas, evitando a infiltração na massa de resíduo e aumentando a geração de lixiviado.

### **Processos biológicos anaeróbios**

O processo biológico anaeróbio ocorre na ausência de oxigênio, os microrganismos (bactérias e arqueias) exercem atividades metabólicas para que o material orgânico complexo (carboidratos, proteínas e lipídios) seja convertido em  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{NH}_3$ , traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular (SCHIRMER et al., 2014; BARCELO, 2009).

As reações bioquímicas do processo anaeróbio em aterros sanitários se desenvolvem em três fases: fase aeróbica, ácido e metanogênese, sendo esta última a principal fonte de  $\text{CH}_4$ . O biogás de aterro é produzido por degradação anaeróbia microbiana da fração orgânica dos resíduos, e o material orgânico biodegradável presente neste gás é constituído por matéria vegetal e animal, resíduos de jardim, madeira e material têxtil. O carbono orgânico é o elemento comum entre materiais biodegradáveis, o que permite o desenvolvimento da produção de metano (RADA et al., 2015; OLIVEIRA, 2011).

### **Fatores que interferem na produção e composição do biogás**

A produção e a composição do biogás gerado podem variar temporal e espacialmente no aterro, devido às diferentes formas como o aterro é preenchido ou diversidade de materiais utilizados para preenchê-lo, interferindo também na composição do biogás de outras propriedades desses resíduos. Essas propriedades compreendem o tipo de resíduo (composição), idade, umidade, pH, temperatura e densidade (SCHIRMER et al., 2014; SIMÕES, 2017; CASTRO 1996).

### **Potencial energético do biogás de aterros sanitários**

Segundo Ferreira (2018) e Delfino (2016), o biogás pode contribuir para uma diversificação das fontes de energia na matriz elétrica (GONZÁLEZ et al., 2022; MATOS, 2017). Dessa forma, poderão ser empregadas

fontes alternativas (renováveis e não-convencionais) para incentivar a busca de soluções limpas e sustentáveis para a matriz energética e minimizar o impacto do custo de produção de energia para o consumidor (EPE, 2007; FERREIRA, 2018).

O biogás é constituído de gás metano, dióxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e vapor d'água, como demonstrado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Composição do biogás.

Componentes	Símbolos	Porcentagem
Metano	CH <sub>4</sub>	45% - 75%
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	25% - 50%
Água (vapor)	H <sub>2</sub> O	2% - 7%
Sulfeto de hidrogênio	H <sub>2</sub> S	0,05% - 1%
Traços de outros componentes	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CO	<5%

Fonte: Adaptado Fricke et al. (2015).

No Brasil, entre 2004 e 2015, o biogás gerado nos aterros de resíduos foi explorado em 9 termelétricas, que produziram, juntas, 86,6 MW de energia elétrica; em duas usinas, que geraram 57 mil metros cúbicos diários de biometano; e em três aterros sanitários, que o utilizam como fonte de calor para a evaporação do lixiviado. É importante a obtenção de dados sobre a atual situação da geração e da disposição final dos RSU, da matriz energética brasileira e do potencial energético dos aterros sanitários no país, bem como projetos em Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (CRUZ et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2019).

O Brasil gera um volume expressivo de RSU (em torno de 219 mil t/dia) e elevada porcentagem de matéria orgânica (52%) e, sendo considerado um país com grande potencial de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica ou biometano (MACIEL et al., 2011; NASCIMENTO et al., 2019).

## METODOLOGIA

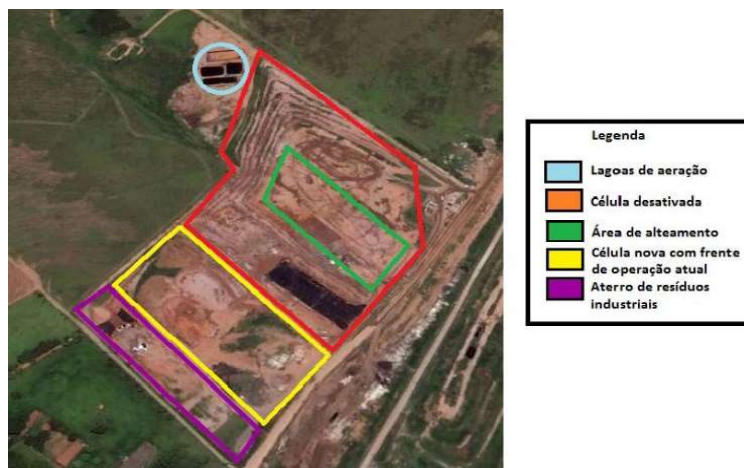
O município de Rio Claro encontra-se na região de clima tropical, com verões quentes e úmidos, invernos frios e secos, onde a temperatura média anual é de 21,6 °C e a precipitação anual média é de 1366,8 mm (CEPAGRI, 2015). O aterro de Rio Claro localiza-se em um terreno com cerca de 14 hectares de área total, situado no município de Rio Claro, estado de São Paulo. O Aterro de Rio Claro está em situação adequada, de acordo com o IQR (Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos) de 2022: IQR 8,0. Na avaliação da estrutura e a operacionalidade do aterro local, obteve a nota 9,6 (CETESB, 2018; 2022).

Segundo o Relatório Ambiental Preliminar (RAP, 2019), “o aterro sanitário do município iniciou suas atividades em 2001, em uma área total de 141.637,68 m<sup>2</sup>. Destes, aproximadamente 98.000m<sup>2</sup> são destinados à disposição de resíduos”. No projeto do aterro sanitário, a vida útil foi calculada em 16.2 anos, considerando-se 190 t/dia (5.000 t/mês) de produção de resíduos. Encerra as atividades diárias com a cobertura dos resíduos com camada de solo. O aterro sanitário recebe resíduos sólidos domiciliares (classe II-A), provenientes da coleta regular no município de Rio Claro.

No aterro, a geração média de lixiviado dos últimos 12 meses foi de 2000 m<sup>3</sup>/mês. Este líquido é pré-tratado em uma estação localizada dentro do aterro, pelo método de filtragem por micro membranas e

digestor biológico, e posteriormente encaminhado via caminhão tanque para as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) do município.

Conforme exigido para a operação de um aterro sanitário, o aterro de Rio Claro possui sistemas de proteção ambiental no empreendimento, tais como: cobertura da massa de resíduos, captação de gases, sistemas de impermeabilização, sistemas de drenagem superficial e subsuperficial, sistema de tratamento de líquidos percolados, entre outros. É possível observar o detalhamento das áreas do aterro (Figura 1).



**Figura 1:** Vista aérea das áreas do aterro sanitário de Rio Claro/SP – Brasil.  
Fonte: Castro (2016).

### Aplicação no aterro sanitário de Rio Claro/SP, Brasil

Os 42 drenos existentes no aterro sanitário de Rio Claro – SP foram numerados e georreferenciados utilizando a ferramenta Google Earth. Para este trabalho, os drenos estudados foram demarcados em vermelho (Figura 2).



**Figura 2:** Aterro sanitário de Rio Claro com a disposição dos drenos de biogás.  
Fonte: Adaptado Google Earth (2014); Castro (2016).

O conjunto de drenos de gás monitorados estão disponíveis (Tabela 3).

**Tabela 3:** Conjunto de drenos de gás monitorados.

Drenos	Localização	Características da área do aterro
8	Célula mais antiga. Próxima às lagoas de lixiviado	Resíduos com mais de 11 anos de aterramento. Área <u>sem recirculação de lixiviado</u>

1	Célula antiga	Resíduos entre 7 e 9 anos de aterramento. Área <b>sem recirculação de lixiviado</b>
5	Célula antiga	Resíduos entre 7 e 9 anos de aterramento. Área <b>com recirculação</b> de lixiviado
28	Adjacente à área de alteamento	Resíduo com tempo de disposição entre 3 a 5 anos. Área <b>sem recirculação de lixiviado</b>
25	Área de alteamento	Resíduos com idade de 3 a 5 anos (camadas inferiores). Disposição de resíduos novos (alteamento da última camada). Resíduos com idade de até 2 anos. Área <b>sem recirculação de lixiviado</b>
32	Célula nova com frente de operação do aterro	Resíduo novo (de 1 a 2 anos de disposição). Área <b>sem recirculação de lixiviado</b>

Fonte: Adaptado Castro (2016).

### Análise da vazão e da composição do biogás

Para o início da coleta de dados, os drenos foram selados com plástico filme, vedados uma hora antes da medição, para que não ocorresse interferência do ar atmosférico.

Para a medição da composição do biogás foi escolhido o instrumento de medição portátil LANTEC, Modelo GEM-2000, com precisão de 3%. O equipamento de termo anemômetro digital portátil TESTO modelo 405-V1, com precisão de 5%, foi utilizado para obter as medidas de velocidade. Com a multiplicação da velocidade do biogás pela área da seção do dreno obteve-se a aferição da vazão do biogás.

Estágios da medição da composição do biogás nos drenos: (1) apagar a chama com um pano; (2) resfriar o dreno com o pano molhado; (3) selagem do dreno com plástico filme; (4) aguardar 60 minutos da selagem; (5) aferir as concentrações de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> e de temperatura com a inserção das sondas no plástico filme (10 cm) (Figura 3).



**Figura 3:** Procedimento para aferição da composição do biogás.  
Fonte: Adaptado Castro (2016).

Neste ensaio foram coletados dados de vazão e porcentagem de metano do biogás liberados nos drenos, sempre em diferentes períodos de tempo.

Os dados são comparados a partir da proposição de três cenários, observando o potencial de geração ( $L_0$ ) e a constante de geração ( $k$ ), sendo um otimista ( $L_0=200$ ;  $k=0,09$ ), um moderado ( $L_0=170$ ;  $k=0,06$ ) e outro conservador ( $L_0=90$ ;  $k=0,04$ ) em relação à taxa de geração de metano (CEPAGRI, 2014).

Este trabalho compreendeu, no período de 18 meses, a análise comparativa da influência da precipitação pluviométrica; temperatura na vazão do biogás; concentração de metano (CH<sub>4</sub>); concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e a utilização do Coeficiente de Correlação de Pearson.

Com base nos dados coletados, foram analisados dois conjuntos de drenos: Conjunto de dados do dreno 1, **sem recirculação de lixiviado (RL)** e do dreno 5, **com RL**; Conjunto dos drenos 8, 1, 28, 25 e 32 (**todos sem RL**).

Os critérios de seleção dos drenos foram: distintos tempos de aterramento dos resíduos; sem e com RL; maior vazão de biogás. Todos os dados coletados foram tabulados, analisados e representados em gráficos.

A análise comparativa da influência da precipitação pluviométrica, da temperatura na vazão e na concentração de metano (CH<sub>4</sub>), de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do biogás e do Coeficiente de Correlação de Pearson foram utilizados como método de análise nos drenos no aterro sanitário de Rio Claro/SP sendo aplicados sobre os valores de vazão e temperatura do biogás; de vazão de metano e temperatura do biogás; de vazão de dióxido de carbono e de temperatura do biogás.

### Coeficiente de correlação de Pearson

Karl Pearson desenvolveu uma estatística dando origem ao coeficiente (r) que assume apenas valores entre -1 e 1 (STANTON, 2001; MOORE, 2007; GARSON, 2009).

A correlação foi utilizada para medir a associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis, pois mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise comparativa entre dreno 1 (sem RL) e dreno 5 (com RL) com mesma idade de aterramento

#### Comportamento da vazão e temperatura do biogás

Para a análise comparativa do comportamento da vazão e da temperatura entre drenos da mesma idade de aterramento, foram selecionados os drenos 1 e 5 (Figura 4). Conforme apresenta a Figura 4, é possível observar que o dreno 5 obteve produção maior de vazão de biogás, e a temperatura média também se manteve mais elevada em relação ao dreno 1. Foi observado aumento de temperatura em alguns dias de coleta no dreno 5. No dia 43, o pico mais alto de temperatura atingiu 42,10 °C, com vazão de biogás a 19,83 m<sup>3</sup>/h; enquanto no dreno 1, a temperatura atingiu a 34 °C, com vazão do biogás a 16,39 m<sup>3</sup>/h. Dessa forma, pôde-se observar que a recirculação do lixiviado no dreno 5 manteve a atividade biológica e, conseqüentemente, manteve a vazão de biogás.

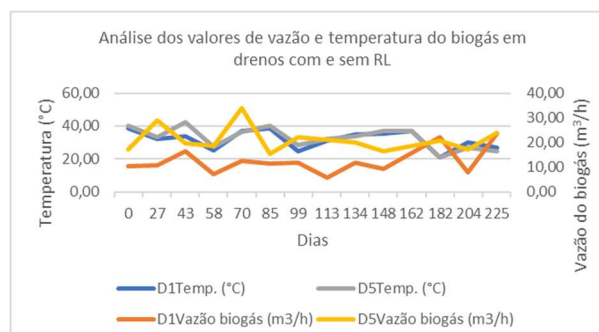


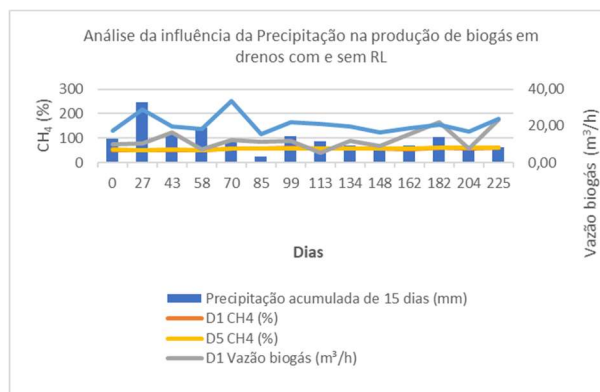
Figura 4: Análise dos valores de vazão e temperatura do biogás nos drenos 1 e 5.

#### Comportamento da vazão do biogás, porcentagem de metano e análise da influência da precipitação

A análise da influência da precipitação acumulada em 15 dias (mm) na produção de biogás em drenos



sem e com RL (drenos 1 e 5, respectivamente) pode ser observada conforme a Figura 5.



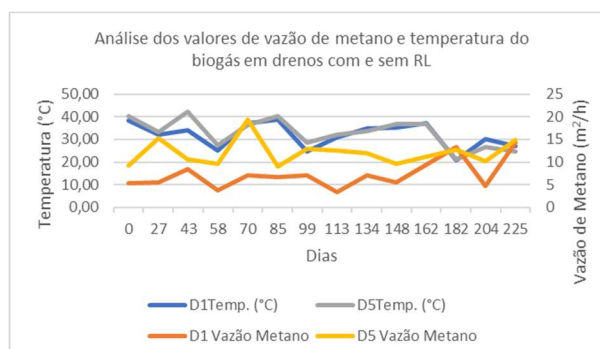
**Figura 5:** Análise da influência da precipitação na produção de biogás em drenos com e sem RL.

Na Figura 5 observa-se que os valores de concentração de metano no biogás mantiveram-se constantes durante todo o período de monitoramento, sem aparente influência das águas das chuvas que infiltram na massa de resíduos, porém os valores de vazão do biogás encontrados no dreno 5 mostram uma elevada variação: Entre 15,42 m<sup>3</sup>/h e 33,78 m<sup>3</sup>/h, com média de 21 m<sup>3</sup>/h, e para a concentração de metano chegou na média de 57,52 %CH<sub>4</sub>. Já no dreno 1, houve variação entre 5,63 m<sup>3</sup>/h e 23,59 m<sup>3</sup>/h, com média de 12,58 m<sup>3</sup>/h da vazão do biogás, e para a concentração de metano, o valor foi de 56,80 %CH<sub>4</sub>.

No caso da vazão do biogás, observou-se que no dreno 5 a vazão foi mais elevada devido à recirculação do lixiviado que mantém a umidade no período de estiagem/diminuição da chuva.

### Comportamento da vazão do metano e temperatura do biogás

Foi realizada a análise dos valores de vazão de metano e temperatura do biogás nos drenos 1 e 5 (Figura 6). Na Figura 6 é possível observar que o dreno 5 obteve produção maior de vazão de metano e temperatura elevada em relação ao dreno 1. No dia 43, o pico mais alto de temperatura chegou a 42,10 °C, com vazão de metano a 10,57 m<sup>3</sup>/h no dreno 5, enquanto no dreno 1, a temperatura chegou a 34 °C, com vazão de metano a 8,44 m<sup>3</sup>/h.

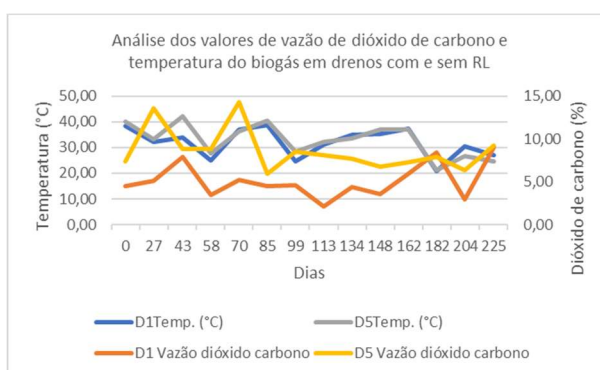


**Figura 6:** Análise dos valores de vazão de metano e temperatura do biogás nos drenos com e sem RL.

Dessa forma, pôde-se observar que a recirculação do lixiviado no dreno 5 causou influência no aumento da atividade biológica e, conseqüentemente, no aumento da vazão de metano.

## Comportamento da vazão do dióxido de carbono e temperatura do biogás

A análise dos valores de vazão de dióxido de carbono e temperatura do biogás nos drenos 1 e 5, conforme a análise na Figura 7. Através da Figura 7 são percebidos picos de vazão do dióxido de carbono no dreno 5 em relação ao dreno 1. O pico mais alto da vazão do dióxido de carbono no dreno 1 foi de 9,08 m<sup>3</sup>/h com temperatura de 27,10 °C, enquanto no dreno 5 foi encontrado picos de 14,26 m<sup>3</sup>/h com temperatura de 36,40 °C. É possível observar que o dreno 5 obteve maior produção de CO<sub>2</sub> e sua temperatura também se manteve mais alta que o dreno 1. Dessa forma, pôde-se observar que a RL presente no dreno 5 causou influência no aumento de atividade biológica e, conseqüentemente, aumentou a vazão do biogás. O Coeficiente de Correlação de Pearson foi aplicado sobre os valores de vazão e temperatura do biogás, vazão de metano e dióxido de carbono nos drenos 1 e 5 (Tabela 4).



**Figura 7:** Análise da vazão de dióxido de carbono e temperatura do biogás nos drenos com e sem RL.

**Tabela 4:** Aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson na vazão e temperatura do biogás.

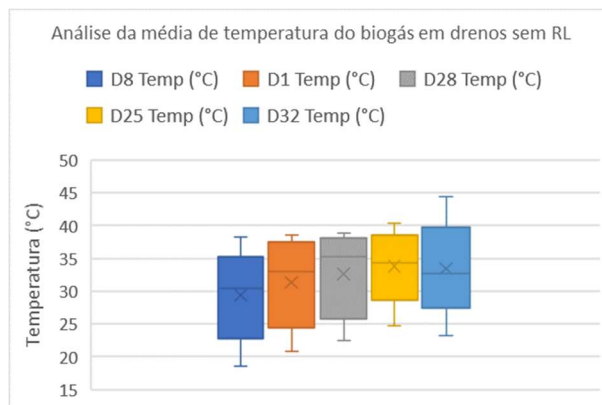
Pearson	D1	D5
<b>Vazão e temperatura do biogás</b>		
Coeficiente de Correlação R	0,442938	0,197826
Resultado	Fraca positiva	Fraca positiva
<b>Vazão de metano e temperatura do biogás</b>		
Coeficiente de Correlação R	0,475476	0,274985
Resultado	Fraca positiva	Fraca positiva
<b>Vazão de dióxido de carbono e temperatura do biogás</b>		
Coeficiente de Correlação R	0,395451	0,274985
Resultado	Fraca positiva	Fraca positiva

Na análise do Coeficiente de Correlação de Pearson, os dados obtidos em relação aos drenos 1 e 5 mostraram uma correlação Fraca positiva para temperatura (°C) e vazão do biogás (m<sup>3</sup>/h), vazão de metano e dióxido de carbono, isto é, positiva porque, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta, e as duas variáveis estão diretamente correlacionadas e covariam.

## Análise comparativa entre drenos 8, 1, 28, 25 e 32 sem RL com diferentes idades de aterramento

### Comportamento na vazão e temperatura de biogás

Para a análise a seguir, foram separados drenos que fazem parte de áreas com diferentes idades da disposição dos resíduos no aterro sanitário. Os valores da média da temperatura em drenos com idade diferente de resíduos podem ser observados conforme Figura 8.

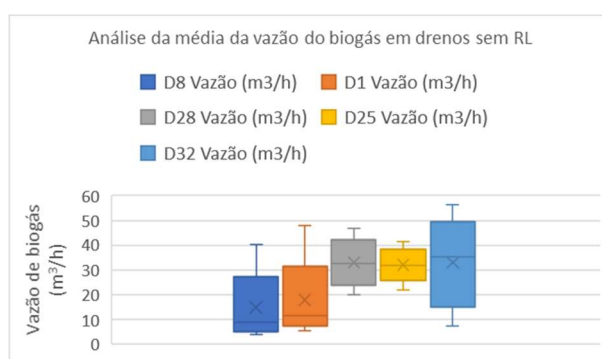


**Figura 8:** Análise da média da temperatura do biogás em drenos sem RL.

Conforme apresenta a Figura 8, a temperatura do gás tende a diminuir de acordo com o aumento da idade de disposição dos resíduos sólidos, em razão da redução da atividade biológica. Quando recebe nova camada de disposição de resíduos sobre a camada de resíduos mais antigo, faz com que a temperatura aumente, e isso ocorre devido ao aumento da atividade biológica. Isso demonstra o aumento da atividade em relação a área que não recebeu novas camadas. Camadas de resíduos mais novos possuem maior quantidade de matéria orgânica biodegradável e, consecutivamente, maior vazão dos gases.

A comparação dos dados do dreno 25, que possui resíduos com a mesma idade dos dispostos no dreno 28, apresentou aumento de temperatura devido ao recebimento de resíduos novos em alteamento da última camada, o que resultou no aumento da atividade na massa de resíduo. Dessa forma, houve aumento da atividade biológica e que pôde ser confirmado observando o dreno 32, que é mais novo e que produziu maior vazão com alta temperatura.

Os valores da média da vazão do biogás ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) nos drenos sem RL podem ser conferidos conforme a Figura 9. É perceptível que os drenos com idade de resíduos mais novos produziram maior vazão de biogás devido a atividade biológica atuante nos drenos 28, 25 e 32.



**Figura 9:** Análise da média da vazão do biogás em drenos sem RL.

Completando o ciclo das análises, pode-se perceber que, de acordo com a idade dos resíduos dispostos no aterro sanitário, a temperatura e a vazão de biogás vêm aumentando de forma gradual (dreno mais antigo para o mais novo) em razão da atividade biológica. Este aumento de vazão e temperatura do biogás acontece até atingir um certo ponto, e depois começa a diminuir devido à exaustão da matéria orgânica e diminuição da atividade.

## Comportamento na vazão do metano e temperatura de biogás

Os valores da média da vazão do metano nos drenos sem RL podem ser conferidos conforme a Figura 10. Quando comparados os valores dos drenos estudados, percebe-se que, de acordo com a idade de disposição do resíduo, ocorre o aumento na produção da vazão de metano nos drenos 8, 1, 28 e 25, sendo que, no dreno 28 e 25, ocorreu um aumento dobrado em relação ao dreno 1. Em seguida, é percebida uma queda na vazão de metano no dreno 32, dada a atividade biológica, visto que o dreno tem pouca idade e, com isso, a produção de metano é reduzida. Algumas hipóteses levantadas em relação a redução do metano, de acordo com Babilotte et al. (2010), dependem dos fatores relacionados ao ambiente interno do aterro, tais como: existência de captação de gases, recirculação de lixiviados (RLs), idade dos resíduos, tipo de solo, vegetação e variações do clima local (temperatura, precipitação, pressão atmosférica), já mencionados anteriormente.

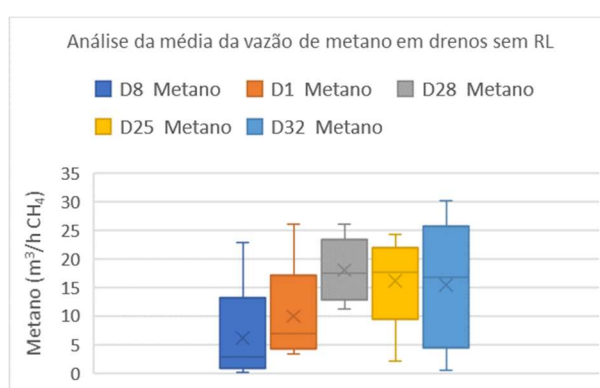


Figura 10: Análise da média da vazão de metano em drenos sem RL.

## Comportamento na vazão do dióxido de carbono e temperatura de biogás

Os valores da média da vazão do dióxido de carbono nos drenos sem RL podem ser conferidos conforme a Figura 11. Na Figura 11, é possível observar que a incidência na vazão de dióxido de carbono é maior nos drenos 28, 25 e 32 em relação aos drenos 8 e 1, que são mais antigos, porém uma atividade biológica superior é observada no dreno 32, com resíduos mais novos e temperatura alta.

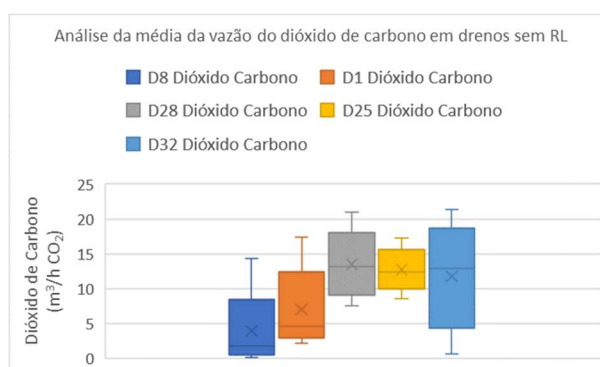


Figura 11: Análise da média da vazão do dióxido de carbono em drenos sem RL.

## Coefficiente de Correlação de Pearson

O Coeficiente de Correlação de Pearson foi aplicado sobre os valores de vazão e temperatura do

biogás nos drenos 8, 1, 28, 25 e 32. Na análise do Coeficiente de Correlação de Pearson, os dados obtidos em relação aos drenos 8, 1, 28, 25 e 32 mostraram uma correlação positiva em relação a temperatura (°C) e vazão do biogás (m<sup>3</sup>/h), pois quando uma variável aumenta, a outra também aumenta, pois estão diretamente correlacionadas (Tabela 5).

**Tabela 5:** Aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson nos valores de Temperatura e Vazão do Biogás.

Pearson	D8	D1	D28	D25	D32
<b>Valores de vazão do biogás e temperatura</b>					
Coef. de Correlação R	0,104744	0,0699707	0,0964	0,385025	0,515151
Resultado	Fraca positiva	Ínfima positiva	Ínfima positiva	Fraca positiva	Moderada positiva
<b>Valores de vazão de metano e temperatura do biogás</b>					
Coef. de Correlação R	0,095322	0,0216158	0,051939	0,421699	0,435501
Resultado	Ínfima positiva	Nula	Nula	Fraca positiva	Fraca positiva
<b>Valores de vazão de dióxido de carbono e temperatura do biogás</b>					
Coef. de Correlação R	0,060894	0,0752386	0,241689	0,394259	0,431242
Resultado	Nula	Nula	Fraca positiva	Fraca positiva	Fraca positiva

Nos resultados, observa-se fraca positiva em relação aos drenos 8 e 25. No caso do dreno 25, com idade mais nova que o dreno 8, recebeu uma camada de alteamento, sendo possível observar atividade biológica com produção de biogás e temperatura mais alta. O resultado Ínfima positiva para os drenos 1 e 28 mostrou que existe correlação entre as variáveis, porém os valores são insignificantes. Já o resultado Moderado positivo para o dreno 32 mostra uma relação adequada entre as duas variáveis, que se justifica por possuir pouca idade e intensa atividade biológica, fazendo com que ocorra o aumento da temperatura e a vazão do biogás.

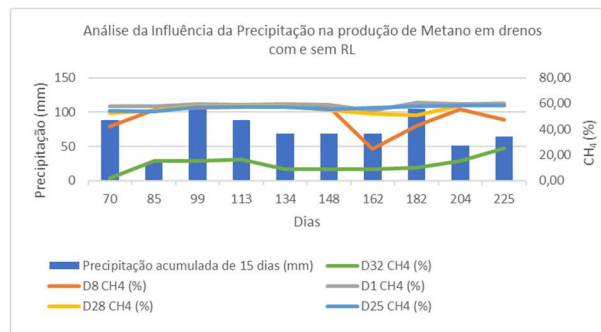
Nos valores de vazão de metano e temperatura do biogás, os dados obtidos mostraram uma correlação Fraca positiva para temperatura e de vazão de metano em relação aos drenos 25 e 32, Ínfima (insignificante) positiva para o dreno 8, e nula para os drenos 1 e 28. Quando o Coeficiente de Correlação de Pearson for positivo, significa que as variáveis se correlacionam e andam juntas, na mesma direção (ascendente). Nos drenos 1 e 28, o Coeficiente de Correlação de Pearson foi nulo, porque a partir dos pontos medidos houve uma grande dispersão, não seguindo uma tendência positiva e nem negativa.

Para os valores de vazão de dióxido de carbono e temperatura, os dados obtidos mostraram uma correlação Fraca positiva em relação aos drenos 28, 25 e 32, e nula para os drenos 8 e 1. Nos drenos 28, 25 e 32, vemos um Coeficiente de Correlação de Pearson Positivo, significando que as variáveis se correlacionam, porém, fraca positiva. Nos drenos 1 e 8, o Coeficiente de Correlação de Pearson foi nulo, porque através dos pontos medidos houve uma grande dispersão, não seguindo uma tendência positiva e nem negativa.

### **Comportamento na vazão do biogás, porcentagem de metano e análise da influência da precipitação**

A média da vazão foi crescente, de acordo com a idade dos resíduos. Os dados da porcentagem de metano relacionado a precipitação nos drenos sem RL podem ser conferidos conforme a Figura 12. A temperatura ambiente e a precipitação apresentam fortes correlações com os componentes do gás de aterro (YANG et al., 2015; DELKASH et al., 2015), pois influenciam a mobilidade do gás metano através do solo, à

medida que os espaços vazios do solo ficam saturados com água (TECLE et al., 2009).



**Figura 12:** Análise da influência da precipitação na produção de porcentagem de metano em drenos com e sem RL.

Observou-se que os drenos mais antigos produziram mais CH<sub>4</sub> em relação a vazão do biogás (m<sup>3</sup>/h), que é o caso do dreno 1, 25, 28, 8 e 32, respectivamente.

No dreno 8, classificado como antigo, apresentou o seguinte comportamento ao longo do tempo: em períodos de estiagem ou em que ocorre a diminuição da precipitação, a produção de metano tende a diminuir. A porcentagem de metano no dreno 8, com média de 49,63%, obteve valor menor se comparado ao dreno 1, com média de 58,86%. Isso acontece dada a presença de resíduos com menor tempo de disposição nesta área do aterro.

O dreno 28 possui grande sensibilidade em relação à precipitação, apresentando quedas acentuadas na produção de metano em períodos de estiagem. O menor valor de concentração de metano alcançado pelo dreno 28 foi de 50,9%, e o maior valor de concentração foi de 58,30%, sendo percebido o crescimento da curva de metano do dreno 28, com a presença de precipitação e, também, o decréscimo da curva, com a diminuição da precipitação.

Observou-se uma redução da porcentagem de metano em todos os drenos nos períodos de estiagem. As porcentagens médias de metano nos drenos 1, 25 e 28 (58,86%, 56,69%, 55,47%, respectivamente) foram maiores quando comparadas com as médias apresentadas no dreno mais antigo. Neste caso, a produção de biogás não reduziu nestes drenos, devido à atividade biológica mantendo a umidade em períodos de seca.

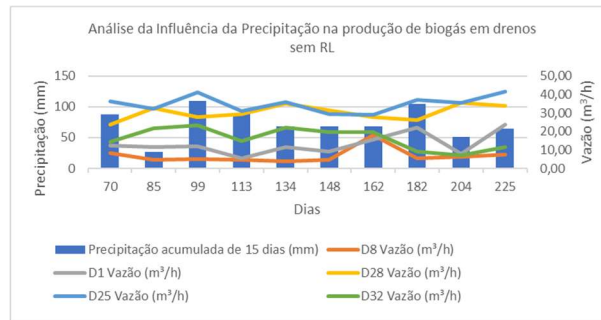
Com a atenuação das chuvas, há a intrusão de ar nos poços de monitoramento e redução das concentrações de CH<sub>4</sub> (NAGAMORI, 2016; BORBA et al., 2018; DIMISKOVSKA et al., 2021).

Observou-se uma maior variação da concentração de metano em relação à precipitação para os drenos localizados em áreas com resíduos mais novos, quando comparados com as áreas mais antigas, possivelmente pela maior atividade biológica que demanda maiores quantidades de água, e, portanto, mais suscetível a variação da precipitação. Os valores da vazão do biogás relacionado a precipitação nos drenos sem RL podem ser conferidos conforme a Figura 13.

Dentre os drenos 8, 1, 28, 25 e 32, o dreno 8 apresentou a menor média de vazão de biogás, com 6,89 m<sup>3</sup>/h. A quantidade de resíduos nesta área mais antiga apresenta menor atividade biológica, utilizando baixo volume de água precipitada. Já os drenos mais novos possuem maior atividade biológica e requerem mais água.

O dreno 1 obteve a média de vazão do biogás em torno de 16,39, com picos entre 5,63 e 48 m<sup>3</sup>/h. O

comportamento do dreno 32 foi semelhante ao dreno 1, com média de 16,39, variando entre 7,29 e 42,19 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 13:** Análise da influência da precipitação na produção de biogás em drenos sem RL.

Já comparando os drenos 28 e 25, que possuem a mesma idade de disposição de resíduos, observou-se uma semelhança nos dados: O dreno 25 mostrou baixa variação nas taxas de produção de metano e vazão em relação à precipitação – a média foi de 34,86 m<sup>3</sup>/h. Os valores de vazão de biogás no dreno 25 permaneceram altos, com uma redução nos intervalos dos períodos sem precipitação. Já no dreno 28, houve oscilação elevada e constante (com vazão média de 30,34 m<sup>3</sup>/h), não se mostrando perceptível a influência da precipitação.

Observou-se que a influência da precipitação na concentração de metano e na vazão do biogás, em áreas com resíduos mais antigos, foi pouco expressiva, devido à baixa quantidade de resíduos. Dessa forma, a atividade biológica é inferior e, conseqüentemente, necessita de menor quantidade para a degradação.

## CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, pôde-se concluir que, em relação a influência da precipitação, foi observada a redução na vazão do biogás nos períodos de estiagem. Dessa forma, a prática de RL do aterro contribuiu para a manutenção dos teores de umidade necessários para a manutenção da atividade biológica, e contribuiu para acelerar o processo de degradação do material orgânico dos resíduos, otimizando a produção de biogás.

A influência da precipitação na geração de biogás foi mais acentuada em células nas áreas com resíduos com menor tempo de disposição no aterro, ou seja, com maior disponibilidade de substrato. A produção de biogás foi menor em áreas mais antigas: Os valores crescentes de vazão de biogás sinalizam para a ampliação da atividade biológica anaeróbia.

A recirculação de lixiviado (RL) manteve o processo de degradação do material orgânico dos resíduos através da atividade biológica e manteve a produção de biogás mais estável. Por outro lado, não foi observada a influência da prática de recirculação na porcentagem de metano do biogás.

Em relação à análise do comportamento da temperatura em relação a vazão do biogás: Foi percebida uma relação direta entre temperatura e vazão do biogás, com baixo Coeficiente de Correlação. Dessa forma, quando ocorre maior precipitação, há o aumento da umidade na massa dos resíduos, expandindo a vazão dos gases. Já a porcentagem de metano pode-se associar ao processamento da degradação anaeróbia.

Este trabalho trouxe contribuições relacionadas ao impacto científico na geração de novas hipóteses



e conhecimentos que possam promover soluções aos problemas relacionados a produção de biogás proveniente da decomposição de resíduos nos aterros, proporcionando contribuições sanitárias e ao bem-estar social e ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Abrelpe, 2020.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Abrelpe, 2022.
- AGBOZU, I.; OGHAMA, O.; ODHAKORI, J.. Physico-chemical characterization and pollution index determination of leachates from Warri Waste Dumpsite, Southern Nigeria. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v.19, p.361-372, 2015. DOI: <http://doi.org/10.4314/jasem.v19i3.4>
- AHMADIAN, M.; RESHADAT, S.; YOUSEFI, N.; MIRHOSSIENI, S.H.; ZARE, M.R.; GHASEMI, S. R.; GILAN, N. R.; KHAMUTIAN, R.; FATEHIZADEH, A.. Municipal leachate treatment by Fenton process: effect of some variable and kinetics. **J. Environ. Public. Health**, 169682, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1155/2013/169682>
- ALKMIN, D. V.; UBERTO JUNIOR, L. U.. Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do lixão do município de Maria da Fé, Estado de Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, v.18, p.65-82, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG186105>
- ASGARI, A.; GHORBANIAN, T.; YOUSEFI, N.; DADASHZADEH, D.; KHALILI, F.; BAGHERI, A.; RAEI, M.; MAHVI, A. H.. Quality and quantity of construction and demolition waste in Tehran. **J. Environ. Health Sci. Eng.**, v.15, n.1, f. 14, p.1- 18, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1186/s40201-017-0276-0>
- BABILOTTE, A.; LAGIER, T. FIANI, E.; TARAMINI, V.. Fugitive methane emissions from landfills: Field comparison of five methods on a landfill. **Journal of Environmental Engineering – ASCE**, August, p.777-784, 2010. DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000260](http://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000260)
- BARCELO, B. R. S.. **Avaliação de diferentes inócuos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- BILGILI, M. S.; DEMIR, A.; VARANK, G.. Evaluation and modeling of biochemical methane potential (BMP) of landfilled solid waste: A pilot scale study. **Bioresource Technology**, v.100, n.21, p.4976-4980, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.012>
- BORBA, P. F. S.; MARTINS, E. M.; CORREA, S. M.; RITTER, E.. Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. **Eng Sanit Ambient**, v.23, n.1, 2018, p.101-111. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522018167438>
- BRAGAGNOLO, L.; FERRAZZO, S. T.; BRUM, F. M.; KORF, E. P.; MOSSI, A. J.. Composição gravimétrica e estimativa de geração per capita municipal de resíduos sólidos urbanos destinados ao Aterro Sanitário de Palmeira das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil. **Rev. Bras. Gest. Amb. Sustent.**, v.7, n.16, p.953-970, 2020. DOI: [http://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071631](http://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071631)
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília: MMA, 2012.
- BRASIL. Presidência da República. **Lei 12.305, 2 de agosto 2010**. Brasília: Planalto, 2010.
- BRASIL. Presidência da República. **Lei 14.026, 15 de julho 2020**. Brasília: Planalto, 2010.
- CONCHA, D. M. C.; COBO, J. J. S.; FERNANDO, C.-Q. R.; REBELLÓN, L. F. M.; LOZADA, P. T.; SONIA, H.. The potential of methane production using aged landfill waste in developing countries: A case of study in Colombia. Caicedo-Concha et al. **Cogent Engineering**, v.6, f.1664862, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1080/23311916.2019.1664862>
- CASTRO, M. C. A. A.. **Avaliação da eficiência das operações unitárias de uma usina de triagem e compostagem na recuperação de materiais recicláveis e na transformação da matéria orgânica em composto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 1996.
- CASTRO, M. C. A. A.. **Estudo do comportamento da temperatura da massa de resíduos, da vazão e da composição do biogás em um aterro sanitário de médio porte**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista de Rio Claro, Rio Claro, 2016.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Aterro Sanitário**. CETESB, 2020.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018.2021**. CETESB, 2022.
- CRUZ, S. S.; PAULINO, S. R.; PAIVA, D. T.. Participação nos Projetos de MDL em Aterros Sanitários na Região Metropolitana de São Paulo. **Sustainability in Debate**, v.6, n.2, p.51–72, 2015. DOI: <http://doi.org/10.18472/SustDeb.v6n2.2015.15495>
- DEHGHANIFARD, E.; DEHGHANI, M. H.. Evaluation and analysis of municipal solid wastes in Tehran, Iran. **MethodsX**, v.5, p.312-321, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.mex.2018.04.003>
- DELKASH, M.; ZHOU, B.; FOTINI, C. H.; RELL, W.; IMNOF, M..



Short-term landfill methane emissions dependency on wind.

**Waste Management**, v.55, p.288–298, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.009>

DIMISKOVSKA, B.; BERISHA, A.. Calculation of methane emissions from municipal solid waste landfill Germova using IPCC method. **Geo-SEE Institute**, n.16, 2021. DOI: [http://doi.org/10.628.312.5.033:547.211\(497.115\)](http://doi.org/10.628.312.5.033:547.211(497.115))

DORNELA, N. M. O.; FARIA, B. P. Z.; KIM, V. J. H.; PAULA, E. C.. Comparação de modelos de previsão de geração de metano em aterros sanitários brasileiros para o seu aproveitamento energético. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 4. **Anais**. Gramado, 2021.

EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K.. **IPCC 2008**. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit % Institute for Global Environmental Strategies 2108-11, Kamiyamaguchi Hayama, Kanagawa JAPAN, 2008.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Modelos de negócios para a geração de eletricidade a partir de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: EPE, 2007.

FERNANDES, G.; MARIANI, L.. O alto potencial de produção e uso do biogás a próxima fronteira da energia renovável no Brasil? **Caderno Opinião**, 2019.

FERREIRA, W. R. **Análise do potencial energético territorial do biogás proveniente de aterros sanitários para inserção na matriz elétrica do estado de minas gerais no horizonte de 2050**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

FIRMO, A. L. B.. **Análise numérica de aterros de resíduos sólidos urbanos: calibração de experimentos em diferentes escalas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

FRICKE, K.; PEREIRA, C.; LEITE, A.; BAGNATI, M.. **Gestão sustentável de Resíduos sólidos Urbanos: Transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.

GARSON, G. D.. **Statnotes: Topics in Multivariate Analysis**. 2009.

GONZÁLEZ, A. B. P.; VIGLIO, J. E.; FERREIRA, L. C.. Comunidades energéticas na transição para a sustentabilidade: o caso da América do Sul. **Sustainability in Debate**, v.13, n.2, p.156–174, 2022. DOI: <http://doi.org/10.18472/SustDeb.v13n2.2022.41266>

GUTBERLET, J.. Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. **Waste Management**, v.45, p.22–31, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.023>

IBAM. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IM, J. H.; WOO, H. J.; CHOI, M. W.; HAN, K. B.; KIM, C. W.. Integrating landfill bioreactors, partial nitrification and anammox process for methane recovery and nitrogen removal from leachate. **Water Res**, v.35, p.2403, 2001. DOI: <http://doi.org/10.1038/srep27744>

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit % Institute for Global Environmental Strategies. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABC, K.. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Waste IGES**, v.5, p.3, 2006.

JAIN, P.; POWELL, J.T.; SMITH, J.L.; TOWNSEND, T.G.; TOLAYMAT, T.. Life-cycle inventory and impact evaluation of mining municipal solid waste landfills. **Environ. Sci. Technol.**, v.48, n.5, p.2920-2927, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1021/es404382s>

KJELDESEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H.. Current and long-term composition of MSW landfill leachate. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol**, v.32, n.4, p.297-336, 2002. DOI: <http://doi.org/10.1038/srep27744>

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, p.966-977, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.030>

MARSHALL, R. E.; FARAHBAKHS, K.. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. **Waste Management**, v.33, p.988-1003, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.023>

MATOS, J. C. S.. **Influência do eletromagnetismo na biodigestão anaeróbia**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Reportagem: Potencial energético do biogás é estratégico para o Brasil**, 2017.

MOORE, D. S.. **The Basic Practice of Statistics**. New York: Freeman, 2007.

NAGAMORI, M. I. M. M.; MOWJOOD, Y.; WATANABE, Y. I.; TOMONORI, I.; KAWAMOTO, K.. Characterization of temporal variations in landfill gas components inside an open solid waste dump site in Sri Lanka. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v.66, n.12, p.1257-1267, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1080/10962247.2016.1212746>

NASCIMENTO, M. C. B.; FREIRE, E. P.; DANTAS, F. A. S.; GIANSANTE, M. B.. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.24, n.1, 2019, p.143-155. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522019171125>

OLIVEIRA, C. A. A.. **Análise do Fluxo de Gases na Camada de Cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia**

(Asmoc). Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

OZTURK, I.; ALTINBAS, M.; KOYUNCU, I.; ARIKAN, O.; GOMEZ-YANGIN, C.. Treatment of landfill leachates by heterogeneous photocatalysis integrated to a conventional biological process. *Waste Management*, v.29, n.1, p.441, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-40422006000100005>

PEREIRA, S. S.; CURTI, R. C.. Aplicação do índice de qualidade de aterros de resíduos sólidos urbanos no Aterro. *Sustainability in Debate*, v.8, n.1, p.108–124, 2017. DOI: <http://doi.org/10.18472/SustDeb.v8n1.2017.41266>

RADA, E. C.; RAGAZZI, M.; STEFANI, P.; SCHIAVON, M.; TORRETTA, V.. Modelling the Potential Biogas Productivity Range from a MSW Landfill for Its Sustainable Exploitation. *Sustainability*, v.7, 2015, p.482-495. DOI: <http://doi.org/10.3390/su7010482>

ROODBARI, A.; NODEHI, R. N.; MAHVI, A.; NASSERI, S.; DEGHANI, M.; ALIMOHAMMADI, M.. Use of a sonocatalytic process to improve the biodegradability of landfill leachate. *Braz. J. Chem. Eng.*, v.29, n.2, p.221-230, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0104-66322012000200003>

SALLES, N. A.; SOUZA, T. S. O.. Aplicabilidade do Activated Sludge Model No. 1 (ASM 1) para simulação do cotratamento de esgoto sanitário e lixiviado de aterro sanitário em lagoas aeradas. *Eng. Sanit. Ambient*, v.25, n.2, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522020188723>

SCHIRMER, W. N.; JUCÁ, J. F. T.; SCHULER, A. R. P.; HOLANDA, S.; JESUS, L. L.. Methane production in anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) landfill: evaluation in refuse of different ages. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.31, n.2, p.373-384, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1590/0104-6632.20140312s00002468>

SILVA, N. F.; SCHOELER, G. P.; LOURENÇO, V. A.; SOUZA, P.

L.; CABALLERO, C. B.; SALAMONI, R. H.; ROMANI, R. F.. First order models to estimate methane generation in landfill: a case study in south Brazil. Elsevier BV. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.8, n.4, p.104-053, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104053>

SIMÕES, A. N.. **Processamento do glicerol bruto em reatores anaeróbios de leito fluidificado, acidogênico e metanogênico, em temperatura mesofílica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SPONZA, D. T.; AĞDAĞ, O. N.. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry*, v.39, n.12, p.2157–2165, 2004. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.11.012>

STANTON, J. M.. Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors. *Journal of Statistical Education*, v.9, n.3, 2001. DOI: <http://doi.org/10.1080/10691898.2001.11910537>

TECLE, D.; LEE, J.; HASAN, S.. Quantitative analysis of physical and geotechnical factors affecting methane emission in municipal solid waste landfill. *Environ Geol.*, v.56, p.1135–1143, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00254-008-1214-3>

WANG, Z.; DONG, X.; YIN, J.. Antecedents of urban residents' separate collection intentions for household solid waste and their willingness to pay: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, v.173, p.256-264, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.223>

WANG, D.; TANG, Y.; LONG, G.; HIGGITT, D.; HE, J.; ROBINSON, D.. Future improvements on performance of an EU landfill directive driven municipal solid waste management for a city in England. *Waste Management*, v.102, p.452-463, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.009>

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.