

COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO DE PORTE MÉDIO: ANÁLISE TEMPORAL

COMPOSITION OF BIOGAS IN A MEDIUM-SIZED LANDFILL: TEMPORAL ANALYSIS

Sandra Rodrigues Sarro BOARATI¹, Marcus Cesar Avezum Alves de CASTRO²

¹Doutora em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Avenida 24-A, 1.515, Rio Claro – SP. Brasil. E-mail: sandra.sarro@unesp.br

²Professor Doutor em Hidráulica e Saneamento, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita. Filho”. Avenida 24-A, 1.515, Rio Claro – SP. Brasil. E-mail: marcus.castro@unesp.br

Introdução
Fundamentação teórica
 Geração e disposição final dos resíduos sólidos
 Geração de lixiviado
 Processos biológicos anaeróbios
Metodologia
 Aplicação no Aterro Sanitário de Rio Claro/SP
Resultados e discussão
 Análise comparativa entre drenos com e sem recirculação de lixiviado
 Comportamento da vazão e temperatura do biogás
 Comportamento da vazão do biogás, porcentagem de metano e análise da influência da precipitação
 Comportamento da vazão do metano e temperatura do biogás
 Comportamento da vazão do dióxido de carbono e temperatura do biogás
Conclusões
Referências

RESUMO - O biogás gerado em aterros sanitários é uma fonte renovável e pode ser utilizado para gerar calor ou eletricidade, apresentando um alto percentual energético e trazendo benefícios econômicos aliados ao saneamento ambiental. 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. Realizou-se a análise comparativa da temperatura, influência da precipitação pluviométrica na vazão e na concentração de metano (CH₄) e de dióxido de carbono (CO₂) do biogás no período de 18 meses. Concluiu-se que a produção de biogás foi menor em áreas mais antigas. A influência da precipitação na geração de biogás foi mais acentuada em células com menor tempo de disposição no aterro. Os valores crescentes de vazão de biogás sinalizam para o aumento da atividade biológica anaeróbia.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Biogás. Sustentabilidade.

ABSTRACT - Biogas generated in landfills is a renewable source and can be used to generate heat or electricity with a high energy percentage bringing economic benefits combined with environmental sanitation. The objective of this work was to analyze the composition of the generated biogas, relating it to the grounding time of the solid residues disposed in the sanitary landfill of Rio Claro/SP. A comparative analysis of temperature, influence of rainfall on the flow and concentration of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) of the biogas in the period of 18 months was carried out. It is concluded that biogas production was lower in older areas. The influence of precipitation on biogas generation was more pronounced in cells with less disposal time in the landfill. The increasing values of biogas flow indicate an increase in anaerobic biological activity.

Keywords: Municipal Solid Waste. Biogas. Sustainability.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o desenvolvimento da tecnologia contribuíram para a geração de resíduos sólidos que, quando dispostos em aterros sanitários, possibilitam à fração orgânica gerar o biogás, via degradação anaeróbia (Jain et al., 2014).

O aumento do volume de resíduos sólidos urbanos ocasiona muitos problemas ambientais relacionados aos métodos de sua disposição e estocagem, que se inadequados, provocam a contaminação do solo e das águas subterrâneas (Cavalcanti et al., 2014; Moreira et al., 2016; Carvalho et al., 2019; Lopes & Silva, 2022).

O biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono, produzido em aterros

sanitários é utilizado como forma de energia a partir de resíduos, tornando uma estratégia para a substituição de combustíveis fósseis (Caicedo-Concha et al., 2019).

As instituições do setor energético continuam trabalhando para o provimento da segurança energética, visto que 65% da produção de eletricidade do parque gerador brasileiro é composta por hidroelétricas. Logo, 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 (CNN, 2021).

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).

É necessário considerar vários fatores na geração de metano em aterros sanitários, tais como: a composição dos resíduos e suas variações com o decorrer do tempo, bem como as condições climáticas do ambiente, a gestão operacional, que é um fator impactante na geração, e a captura do gás no aterro sanitário (Caicedo-Concha et al., 2019).

Os aterros sanitários vêm liderando o crescimento do setor de biogás do Brasil. 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 & Mariani, 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 (2016), é necessário desenvolver um modelo de estimativa de geração de biogás mais 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.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Geração e disposição final dos resíduos sólidos

A composição gravimétrica e as taxas de geração de resíduos sólidos urbanos são parâmetros que podem variar de acordo com cada região (Dehghanifard & Dehghani, 2018). A caracterização deve ser feita localmente, possibilitando a maior representatividade e confiabilidade das informações (Bragagnolo et al., 2020; Firmo, 2008).

O Brasil tem uma grande quantidade de materiais orgânicos (65%) dispostos em aterros sanitários com grande potencial de geração do biogás, superando os outros países tais como a Alemanha (61,20%), Holanda (50,30%) e EUA (35,60) (IBAM, 2001).

De acordo com EPE (2020), as composições de resíduos sólidos urbanos brasileiros são de massa heterogênea, com umidade que se aproxima de 50% da massa. A composição média de Resíduo Sólido Urbano (RSU) é de: 51,4% matéria orgânica, 2,9 metais, 2,4% vidro, 16,7% outros, 13,5% plástico (IBGE, 2012).

A estimativa global é de 4 bilhões de toneladas ao ano e, desse montante, 1,6 a 2 bilhões correspondem aos RSU (Alkmin & Uberto Jr,

Essa energia mal reaproveitada poderia estar sendo melhor administrada a favor do desempenho ambiental através de sua exploração nos aterros sanitários. Devido às composições dos resíduos sólidos com elevada matéria orgânica e condições climáticas do Brasil, este processo possui um potencial elevado de geração de biogás em aterros.

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 (CH₄) e de dióxido de carbono (CO₂) 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 o aproveitamento do mesmo, em células do aterro sanitário formadas por resíduos com diversos tempos de aterramento. A relevância desse artigo está nos dados sobre estimativa de geração para o reaproveitamento do biogás.

2017; ABRELPE, 2022; Bragagnolo et al., 2020).

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, de 33 milhões para 43 milhões de toneladas.

Já as destinações inadequadas, como lixões e aterros controlados, registrou aumento de 25 milhões para 29 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2022).

A proibição de disposição de resíduos sólidos de forma inadequada é amparada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 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, 2010a, 2010b, 2012).

Existe a necessidade de uma gestão eficiente na disposição final dos RSU reduzindo impactos ambientais, utilizando novas áreas com mudanças climáticas e reciclando recursos (Pereira & Curi, 2017; Wang et al., 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 coloração forte.

Possui grande variabilidade em sua composição química, pois depende da natureza dos resíduos depositados, a disposição, manejo e a idade do aterro. Recebe influência dos fatores climáticos, tais como a temperatura e a quantidade de chuva (Salles & Souza, 2020).

De acordo com IBAM (2001) e CETESB (2020), o sistema de drenagem de águas pluviais 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 CH₄, CO₂ e NH₃, 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, ácida e metanogênese, sendo esta última a principal fonte de CH₄ que é o biogás. O biogás de aterro é produzido por degradação anaeróbia microbiana da fração orgânica dos resíduos, e o material orgânico biodegradável presente nestes 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).

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 mesmo à diversidade de materiais utilizados para preenchê-lo, interferindo também na composição do biogás de outras propriedades desses resíduos.

Essas propriedades podem compreender o tipo de resíduo (composição), idade, umidade, pH, temperatura e densidade (Schirmer et al., 2014; Simões, 2017).

O biogás é constituído de gás metano (CH₄ - 45% - 75%), dióxido de carbono (CO₂ - 25% - 50%), água (H₂O - 2% - 7%), sulfeto de hidrogênio (H₂S - 0,05% - 1%) e outros componentes (Fricke et al. 2015, p. 17).

O biogás pode contribuir para uma diversificação das fontes de energia na matriz elétrica, sendo necessário diversificá-la (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 Brasil gera um volume expressivo de RSU em torno de 219 mil t/dia e alta porcentagem de matéria orgânica (52%) e por esse motivo é considerado um país com grande potencial de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica ou biometano (Maciel & Jucá, 2011; Nascimento et al., 2019).

É importante a obtenção de dados sobre a atual situação da geração e da disposição final dos RSU, da matriz energética brasileira e sobre o potencial energético dos aterros sanitários no país, bem como projetos em Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Cruz et al. 2015; Nascimento et al., 2019).

METODOLOGIA

O aterro de Rio Claro localiza-se em um terreno com cerca de 14 ha de área total, situado no município de Rio Claro, estado de São Paulo. O Aterro de Rio Claro está em situação adequada (IQR 8,0) de acordo com o IQR (Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos) de 2022.

Na avaliação da estrutura e a operacionalidade o aterro local obteve a nota 9,6. O aterro sanitário do município iniciou suas atividades em 2001 em uma área total de 141.637,68 m². Destes, aproximadamente 98.000 m² 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 (CETESB, 2022).

No aterro, a geração média (últimos 12 meses)

de lixiviado foi de 2.000 m³/mês. O lixiviado é pré-tratado em uma estação localizada dentro do aterro, pelo método de filtragem por micromembranas e digestor biológico e, posteriormente, o lixiviado é encaminhado através de caminhão tanque para as estações de tratamento de esgoto (ETE) do município. Rio Claro encontra-se na região de clima tropical, com verões quentes e úmidos, invernos frios e secos, onde a temperatura média anual do município é de 21,6

°C e a precipitação anual média é de 1366,8 mm.

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 sub-superficial, sistema de tratamento de líquidos percolados, entre outros. É possível observar o detalhamento das áreas do aterro (Figura 1).

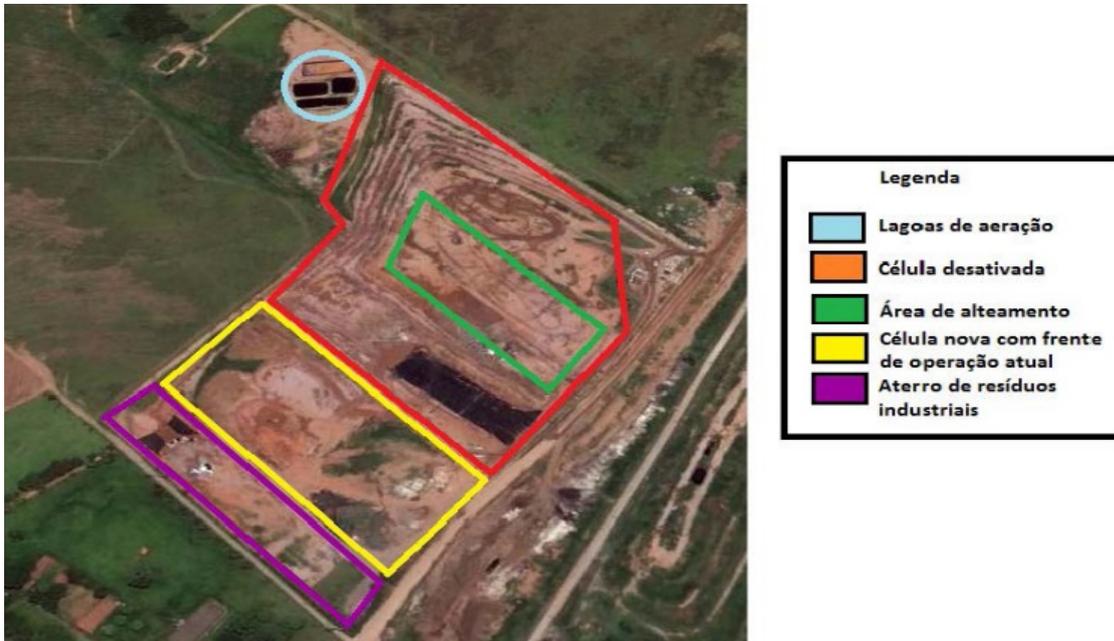


Figura 1 -Vista aérea das áreas do aterro sanitário de Rio Claro – SP (Fonte: Castro, 2016, p. 68).

Aplicação no Aterro Sanitário de Rio Claro

Os 42 drenos existentes no aterro sanitário de Rio Claro foram numerados e georreferenciados utilizando a ferramenta Google Earth. Para este

trabalho, os drenos estudados foram demarcados em vermelho (Figura 2). O conjunto de drenos de gás monitorados estão disponíveis (Tabela 1).



Figura 2 - Aterro sanitário de Rio Claro com a disposição dos drenos de biogás (Adaptado Google Earth - 2014).

Tabela 1 - Conjunto de drenos de gás monitorados

| Drenos | Localização | Características da área do aterro |
|--------|--------------------------------|---|
| 1 | Célula antiga | Resíduos entre 7 e 9 anos de aterramento Área sem recirculação de lixiviado |
| 5 | Célula antiga | Resíduos entre 7 e 9 anos de aterramento Área com recirculação de lixiviado |
| 19 | Adjacente à área de alteamento | Resíduo entre 3 e 5 anos de aterramento Área com recirculação de lixiviado |
| 28 | Adjacente à área de alteamento | Resíduo entre 3 a 5 anos de aterramento Área sem recirculação de lixiviado |

Fonte: Adaptado Castro (2016)

Análise da vazão e da composição do biogás

Para a medição da composição do biogás foi escolhido o instrumento de medição portátil LANTEC, Modelo GEM-2000, precisão de 3%. O modelo foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (USEPA), conhecido como Landfill Gas Emission Model (LandGEM), para comparar as estimativas de produção de biogás em um aterro com e sem recirculação. O aparelho fornece as porcentagens (v/v) de metano, dióxido de carbono e oxigênio, a pressão barométrica absoluta e relativa e a temperatura do biogás (Castro, 2016).

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.

O ponto de inserção do anemômetro no adaptador seguiu a orientação da norma E-

15011/1997 da CETESB para amostragem de gás em dutos, que determina uma distância mínima de duas vezes e meia o diâmetro do tubo (2,5. d) de qualquer variação de seção.

Para o início da coleta de dados, os drenos foram selados com filme plástico. A vedação ocorreu sempre com 1 hora antes da medição do biogás, para que não ocorresse interferência do ar atmosférico e maior intensidade de vento. As sondas de gás e de temperatura eram inseridas no plástico filme utilizado para vedar o dreno.

A inserção da sonda no dreno de gás foi padronizada em 10 cm. Alguns passos foram seguidos para a 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, aferir as concentrações de CH₄, CO₂ e O₂ e de temperatura com a inserção das sondas no plástico filme (10 cm) (Figura 3).



Figura 3 - Procedimento para aferição da composição do biogás (Adaptado de Castro, 2016, p. 73).

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.

Este trabalho abrangeu, no período de 18 meses, a análise comparativa da influência da precipitação pluviométrica; temperatura na vazão do biogás; concentração de metano (CH₄); concentração de dióxido de carbono (CO₂) 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**) e do dreno 5 (**com recirculação de lixiviado**) com idade de 7 a 9 anos;

- Conjunto de dados do dreno 28 (**sem recirculação de lixiviado**) e do dreno 19 (**com recirculação de lixiviado**) com idade de 3 a 5 anos;

Os critérios de seleção dos drenos foram: distintos tempos de aterramento dos resíduos; sem e com recirculação de lixiviado; 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 (CH₄), de dióxido de carbono (CO₂) 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.

O estudo do Coeficiente de Correlação de Pearson, criado por Karl Pearson que desenvolveu uma estatística dando origem ao coeficiente (r) que assume apenas valores entre -1 e 1 (Stanton, 2001; Moore, 2007; Garson, 2009), foi utilizado 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 drenos com e sem recirculação de lixiviado

Comportamento da vazão e temperatura do biogás

Para a análise comparativa do comportamento

da vazão e da temperatura entre drenos 1 e 5 com mesma idade de aterramento (7 a 9 anos) e drenos 19 e 28 com mesma idade de aterramento (3 a 5 anos), porém com perfil diferente em relação a recirculação de lixiviado (Figura 4).

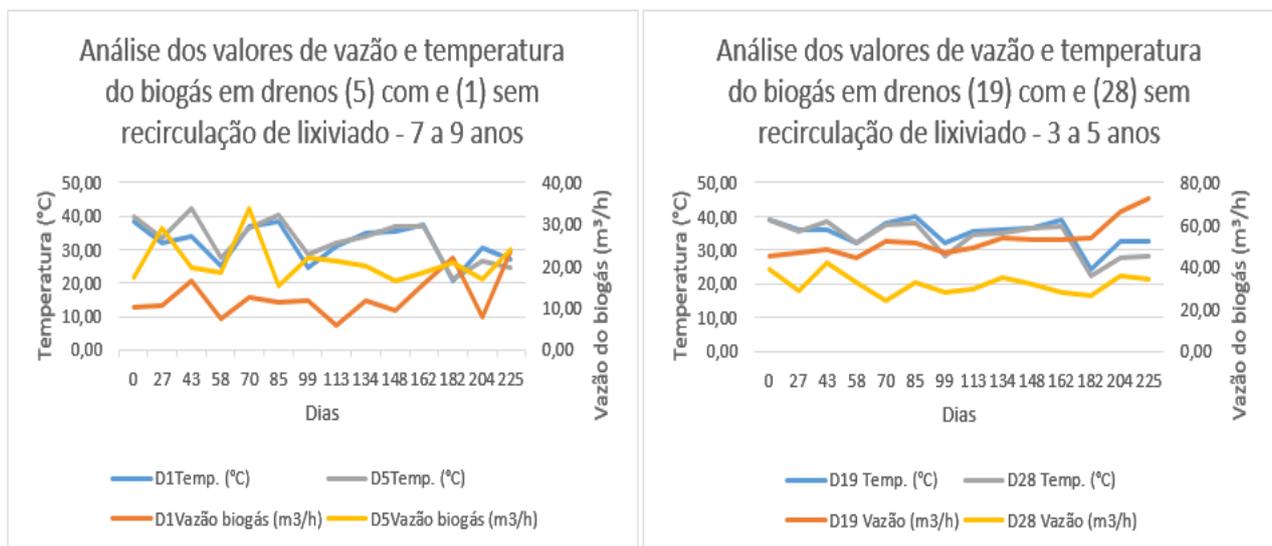


Figura 4 - Análise dos valores de vazão e temperatura do biogás nos drenos 1-5 e 19-28

Conforme apresenta a Figura 4, é possível observar que o dreno 5 (com recirculação de lixiviado) obteve produção maior de vazão de biogás, e a temperatura média do biogás também se manteve mais alta que o dreno 1 (sem recirculação de lixiviado). Foi observado aumento de temperatura em alguns dias de coleta no dreno 5.

No dia 43, o pico mais alto de temperatura chegou a 42,10 °C, com vazão de biogás a 19,83 m³/h no dreno 5, enquanto no dreno 1 a temperatura chegou a 34 °C, com vazão do biogás a 16,39 m³/h. No dia 85, o pico mais alto de temperatura chegou a 39,70 °C, com vazão

do biogás a 51,19 m³/h no dreno 19 (com recirculação de lixiviado), enquanto no dreno 28 (sem recirculação de lixiviado) a temperatura chegou a 38,20 °C, com vazão do biogás a 32,66 m³/h.

Dessa forma, pode-se observar que a temperatura do gás tende a diminuir de acordo com o aumento da idade de disposição dos resíduos sólidos, devido a redução da atividade biológica.

A recirculação do lixiviado nos drenos 5 e 19 manteve a atividade biológica e, conseqüentemente, manteve a vazão de biogás. O dreno 19 obteve vazão maior do biogás em

relação ao dreno 5 por possuir maior atividade biológica, que está relacionado a menor idade de aterramento dos resíduos, pois camadas de resíduos mais novos possuem maior quantidade de matéria orgânica biodegradável e, consecutivamente, maior vazão dos gases. Essa atividade biológica é uma reação exotérmica gerando calor que interfere na temperatura do gás.

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 com e sem recirculação de lixiviado nos drenos 1-5 e 19-28 pode ser observada conforme a Figura 5.

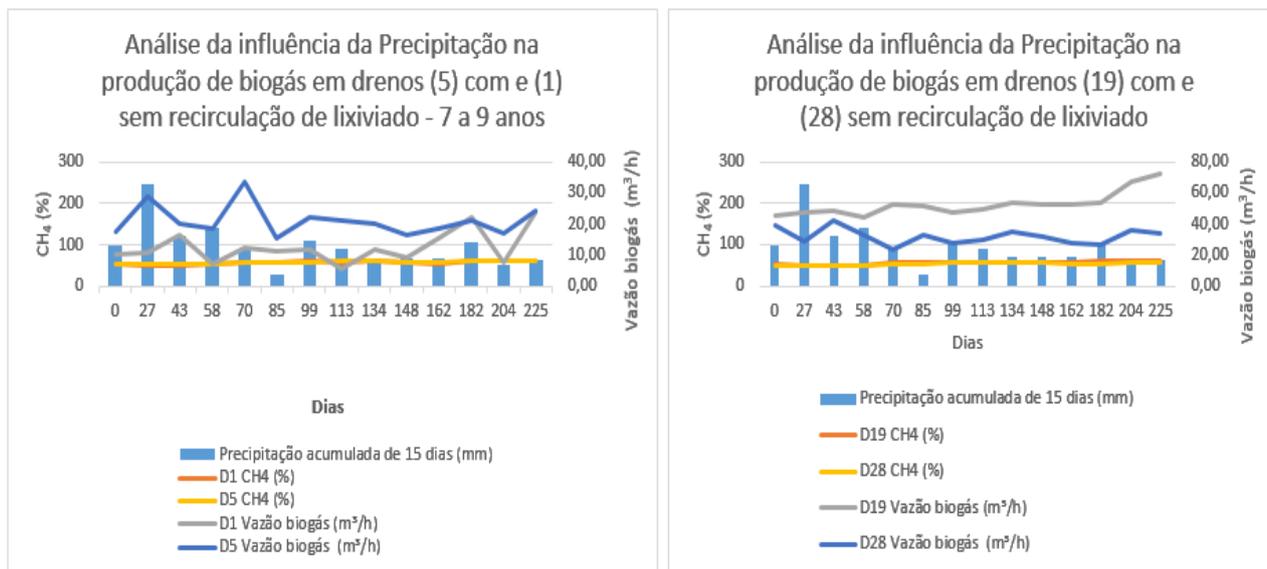


Figura 5 - Análise da influência da precipitação na produção de biogás em drenos com e sem recirculação de lixiviado

Na Figura 5 é observado que os valores da 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 para o dreno 5 (com recirculação de lixiviado) mostram elevada variação, entre 15,42 m³/h e 33,78 m³/h, com média de 21 m³/h, e para a concentração de metano chegou na média de 57,52 % CH₄. Já no dreno 1 (sem recirculação de lixiviado), houve variação entre 5,63 m³/h e 23,59 m³/h, com média de 12,58 m³/h da vazão do biogás, e para a concentração de metano, o valor foi de 56,80 % CH₄.

Para o dreno 19 (com recirculação de lixiviado) mostram elevada variação, entre 44,32 m³/h e 72,66 m³/h, com média de 52,60 m³/h, e para a concentração de metano chegou na média de 55,70 % CH₄. Já no dreno 28 (sem recirculação de lixiviado), houve variação entre 26,3 m³/h e 41,76 m³/h, com média de 31,8 m³/h da vazão do biogás, e para a concentração de metano, o valor foi de 53,80 % CH₄.

No caso da vazão do biogás, observou-se que nos drenos 5 e 19 a vazão foi mais elevada devido a recirculação do lixiviado que mantém a umidade no período de estiagem/diminuição da

chuva. A média da vazão foi crescente, de acordo com a idade dos resíduos. Observou-se que os drenos mais antigos produziram mais CH₄ em relação a vazão do biogás (m³/h).

O dreno 28 possui grande sensibilidade em relação à precipitação, apresentando quedas acentuadas na produção de metano em períodos de estiagem. Quando é registrada redução intensa de chuva, isso pode causar a intrusão de ar nos poços de monitoramento e reduzir as concentrações de CH₄ (Nagamori et al., 2016; Borba et al., 2018; Dimiskovska & Berisha, 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.

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 menor e, conseqüentemente, necessita de menor quantidade para a degradação.

A temperatura ambiente e a precipitação apresentam fortes correlações com os componentes do gás de aterro (Delkash et al. 2016). A precipitação influencia a mobilidade do gás metano através do solo, à medida que os espaços vazios do solo ficam saturados com água (Teclé

et al., 2009).

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 1-5 e 19-28 (Figura 6).

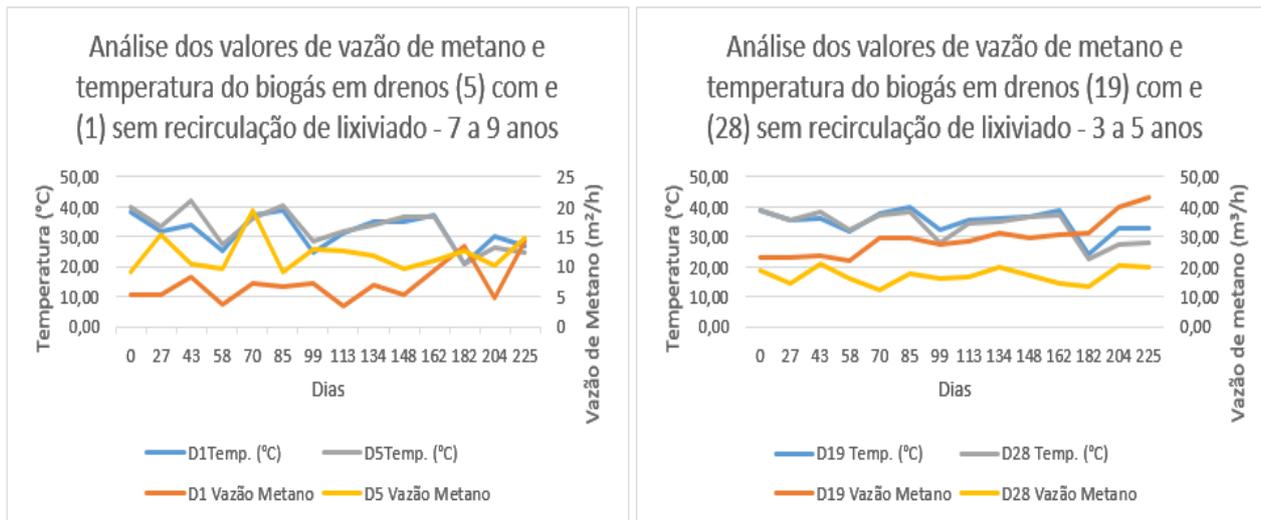


Figura 6 - Análise dos valores de vazão de metano e temperatura do biogás nos drenos com e sem recirculação de lixiviado.

Através da Figura 6 é possível observar que nos drenos 5 e 19 (com recirculação de lixiviado) obteve-se produção maior de vazão de metano e temperatura elevada em relação aos drenos 1 e 28 (sem recirculação de lixiviado).

No dia 43, o pico mais alto de temperatura chegou a 42,10 °C, com vazão de metano a 10,57 m³/h no dreno 5, enquanto no dreno 1, a temperatura chegou a 34 °C, com vazão de metano a 8,44 m³/h.

No dia 85, o pico mais alto de temperatura chegou a 39,70 °C, com vazão de metano a 29,43 m³/h no dreno 5, enquanto no dreno 1, a temperatura chegou a 38,20 °C, com vazão de metano a 17,83 m³/h.

Dessa forma, pôde-se observar que a recirculação do lixiviado no dreno 5 e 19 causou influência no aumento da atividade biológica e, conseqüentemente, no aumento da vazão de metano.

Algumas hipóteses podem ser levantadas em relação a redução do metano de acordo com Babilotte et al. (2010), pois dependem dos fatores relacionados ao ambiente interno do aterro, tais como: existência de captação de gases, recirculação de lixiviados, idade dos resíduos, tipo de solo, vegetação e variações do clima local (temperatura, precipitação, pressão atmosférica).

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 1-5 e 19-28 pode ser visto conforme a análise na Figura 7.

Através da Figura 7 são percebidos picos de vazão do dióxido de carbono nos drenos 5 e 19 em relação aos drenos 1 e 28. O pico mais alto da vazão do dióxido de carbono no dreno 1 foi de 9,08 m³/h com temperatura de 27,10 °C, enquanto no dreno 5 foi encontrado picos de 14,26 m³/h com temperatura de 36,40 °C. O pico mais alto da vazão do dióxido de carbono no dreno 19 foi de 29,35 m³/h com temperatura de 39,70 °C, enquanto no dreno 28 foi encontrado picos de 20,92 m³/h com temperatura de 38,90 °C.

É possível observar que os drenos 5 e 19 (com recirculação de lixiviado) obtiveram maior produção de CO₂ e sua temperatura também se manteve mais alta que os drenos 1 e 28. Dessa forma, pôde-se observar que a recirculação causou influência no aumento de atividade biológica e conseqüentemente aumentou a vazão do biogás.

O método estatístico denominado Correlação de Pearson consiste em avaliar uma possível associação linear entre duas variáveis contínuas (Mukaka, 2012).

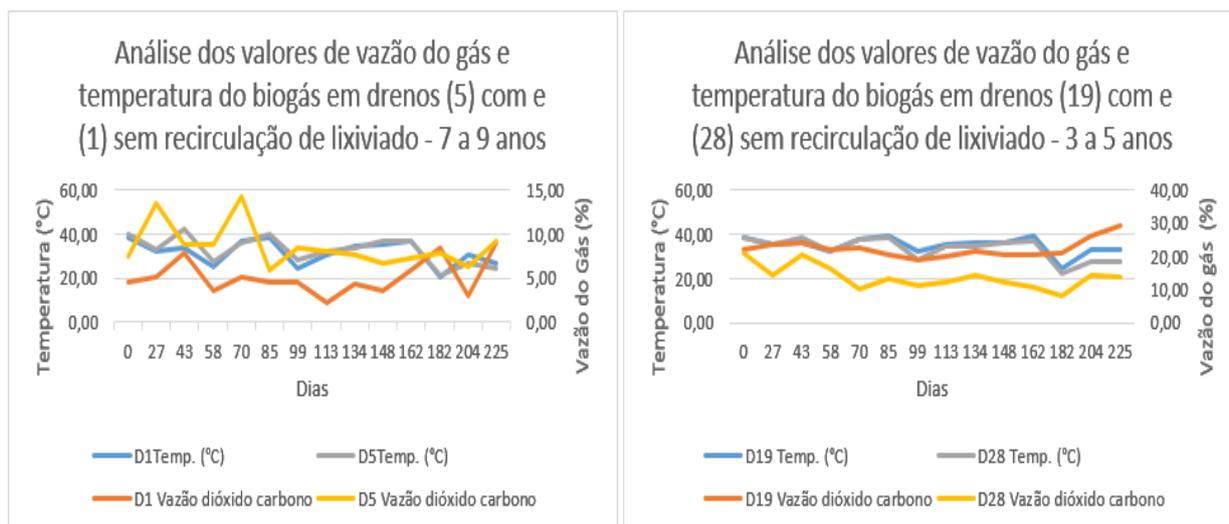


Figura 7 - Análise dos valores de vazão de dióxido de carbono e temperatura do biogás nos drenos com e sem recirculação de lixiviado

Gomes et al. (2022) analisou as variáveis CH₄, CO₂ e de O₂ e precipitação pluviométrica em aterro sanitário no município de Juazeiro do Norte/CE e obteve uma correlação positiva muito forte (0,903) entre o CH₄ e o CO₂, por outro lado obteve uma correlação negativa forte e negativa moderada, respectivamente, entre O₂ - CO₂ (-0,858) e O₂ - CH₄ (-0,670), já em relação a precipitação obteve uma correlação moderada

positiva no que se refere a geração de CH₄ (0,615) e de CO₂ (0,650).

Neste trabalho, o Coeficiente de Correlação de Pearson foi aplicado sobre os valores de vazão e temperatura do biogás, vazão de metano e vazão de dióxido de carbono para fins de observação e validação dos dados obtidos durante o experimento nos drenos 1-5 e 19-28 (Tabela 2).

Tabela 2 - Aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson na vazão e temperatura do biogás

| Pearson | D1 | D5 | D19 | D28 |
|--|----------------|-----------------|-------------------|----------------|
| Vazão e temperatura do biogás | | | | |
| Coeficiente de Correlação R | 0,301595 | 0,121603 | 0,224671 | 0,354534 |
| Resultado | Fraca positiva | Fraca positiva | Fraca positiva | Fraca positiva |
| Vazão de metano e temperatura do biogás | | | | |
| Coeficiente de Correlação R | 0,332351 | 0,23042 | 0,224429 | 0,268096 |
| Resultado | Fraca positiva | Fraca positiva | Fraca positiva | Fraca positiva |
| Vazão de dióxido de carbono e temperatura do biogás | | | | |
| Coeficiente de Correlação R | 0,261227 | 0,0047095 | 0,524774 | 0,449761 |
| Resultado | Fraca positiva | Ínfima positiva | Moderada positiva | Fraca positiva |

Na análise do Coeficiente de Correlação de Pearson, os dados obtidos em relação aos drenos 1-5 e 19-28 mostraram uma correlação Fraca positiva para temperatura (°C) e vazão do biogás (m³/h), vazão de metano e já para o dióxido de carbono Fraca positiva para os drenos 1 e 28,

porém para o dreno 5 foi ínfima positiva e moderada positiva para o dreno 19, isto é, positiva porque, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta esboçando o mesmo comportamento. No experimento não foi encontrada correlação negativa.

CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, pode-se concluir que, em relação à influência da precipitação na vazão do biogás, foi observada a redução nos períodos de estiagem. Em períodos de baixa ou ausência de pluviosidade (estiagem), ocorre a redução da vazão de biogás.

Dessa forma, a prática de recirculação de lixiviado 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.

Os períodos de maior precipitação aumentam a umidade na massa dos resíduos, aumentando a vazão do 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 o aumento da atividade biológica anaeróbia.

A recirculação de lixiviado manteve o processo de degradação do material orgânico dos resíduos através da atividade biológica, e com isso 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.

Na 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, aumentando 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 ajudar nas soluções para problemas relacionados a produção de biogás proveniente da decomposição de resíduos nos aterros e impacto social, proporcionando contribuições ao bem-estar social, ambiental e sanitárias.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Abrelpe, 2022.
- ALKMIN, D.V.; UBERTO JR, 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: 10.14393/RCG186105.
- BABILOTTE, A.; LAGIER, T.; FIANI, E.; TARMINI, V. Fugitive methane emissions from landfills: Field comparison of five methods on a landfill. **Journal of Environmental Engineering – ASCE**, agosto, p. 777-784, 2010. DOI: 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**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, UnB – Brasília, 2009.
- 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, jan/fev p. 101-111, 2018. DOI: 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: 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, 2010a.
- BRASIL. Presidência da República. **Lei 14.026, 15 de julho 2020**. Brasília: Planalto, 2010b.
- CAICEDO-CONCHA, D.M.; SANDOVAL-COBO, J.J.; FERNANDO, C-Q.R.; MARMOLEJO-REBELLÓN, L.F.; TORRES-LOZADA, P.; SONIA, H. The potential of methane production using aged landfill waste in developing countries: A case of study in Colombia. **Cogent Engineering**, v. 6, f. 1664862, 2019. DOI: 10.1080/23311916.2019.1664862.
- CARVALHO, M.B.; GIOVANNI JUNIOR, N.; LOLLO, J.A.; LIMA, C.G.R. Uso de Geotecnologias na seleção de áreas para Implantação de Aterros Sanitários: Abordagem Composta Aplicada ao Município de Mirandópolis, SP. **Geociências**, v. 38, n. 3, p. 717-729, 2019. doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13315
- CASTRO, M.C.A.A. DE. **Estudo do comportamento da temperatura da massa de resíduos, da vazão e da composição do biogás em um aterro sanitário de médio porte**. 135 p. 2016. Rio Claro Tese (Livre-Docência em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista de Rio Claro, 2016.
- CAVALCANTI, M.M.; BORGES, W.R.; STOLLBERG, R.; ROCHA, M.P.; CUNHA, L.S. DA; SEIMETZ, E.X.; NOGUEIRA, P.V.; OLIVERA E SOUSA, F.R.F.R. DE. Levantamento geofísico (eletroresistividade) nos limites do aterro controlado do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília-DF. São Paulo, UNESP. **Geociências**, v. 33, n. 2, p. 298-313, 2014.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Aterro Sanitário**. 2020.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos - 2021**. 2022.
- CNN – CABLE NEWS NETWORK. **Governo quer criar órgão para regular consumo de energia e evitar apagão no país**. 2021.
- 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:10.18472/SustDeb.v6n2.2015.15495.
- DEGHANIFARD, E.; DEGHANI, M. H. Evaluation and analysis of municipal solid wastes in Tehran, Iran. **MethodsX**, v. 5, p. 312-321, 2018. DOI: 10.1016/j.mex.2018.04.003.
- DELKASH, M., ZHOU, B., FOTINI, CH., RELL, W., IMNOF, M. Short-term landfill methane emissions dependency on wind. **Waste Management**, v. 55; 288–298, 2016. DOI: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: 628.312.5.033:547.211(497.115).
- DORNELA, N.M.O.; FARIA, B.P. ZSCHABER, K.; HEE, V.J.; PAULA, E.C. Comparação de modelos de previsão de geração de metano em aterros sanitários brasileiros para o seu aproveitamento energético. In: 4º CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE. Atas... Gramado: 2021.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007.
- EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Modelos de negócios para a geração de eletricidade a partir de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2020.
- FERNANDES, G. & MARIANI, L. O alto potencial de produção e uso do biogás a próxima fronteira da energia renovável no

- Brasil? **Caderno Opinião**, mar., 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**. Belo Horizonte, 2018. 163 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia/ Universidade Federal de Minas Gerais.
- FIRMO, A. L. B. **Análise numérica de aterros de resíduos sólidos urbanos: calibração de experimentos em diferentes escalas**. Recife. 156 p. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.
- FRICKE, K; PEREIRA, C; LEITE, A; BAGNATI, M. (Coords.). **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.
- GOMES, E.R.; ALCÂNTARA, P.B.; MOREIRA, F.G.S.; SALES, J.C.F. Influência de condições climáticas na composição do biogás gerado no lixão municipal de Juazeiro do Norte – CE. **Revista DAE**, São Paulo, v. 70, n. 237, p. 210-228, Jul-Set, 2022. Disp. em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_237_n_2065.pdf>. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.062>.
- 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: 10.18472/SustDeb.v13n2.2022.41266.
- GOOGLE. **Google Earth**. Website. 2014.
- 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.
- 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: 10.1021/es404382s.
- LOPES, R.C. & SILVA, R.N.F. Aplicação das lógicas booleana e fuzzy na determinação de áreas aptas para a implantação de aterro sanitário. **Geociências**, v.41, n. 1, p. 377-396, 2022. Disp. em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/16277>>. Acesso em: 05 ago. 2023.
- 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:10.1016/j.wasman.2011.01.030.
- MATOS, J.C.S. **Influência do eletromagnetismo na biodigestão anaeróbia**. 105 p., 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 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.
- MOREIRA, L.L.; SCHWAMBACK, D.; CORRÊA, N.R.; COELHO, A.L.N. Sig aplicado à seleção de áreas potenciais para instalação de aterro sanitário no município de Serra – ES. **Geociências**, v. 35, n. 4, p. 531-541, 2016. Disp. em: <<https://papegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9969/9257>>. Acesso em: 05 ago. 2023.
- MUKAKA, M.M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**. v. 24, n. 3, 2012, p. 69-71. Disp. em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23638278/>>. Acesso em: 03 fev. 2024.
- NAGAMORI, M; MOWJOOD, M.I.M; WATANABE, Y.; ISOBE, Y.; ISHIGAKI, T.; 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:10.1080/10962247.2016.1212746.
- NASCIMENTO, M.C.B.; FREIRE, E.P.; DANTAS, F.A.S.; GIANANTE, 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: 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)**. Fortaleza, 84 p. 2011. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará.
- PEREIRA, S.S. & CURI, 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: 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:10.3390/su7010482.
- 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, Mar-Apr, 2020. DOI: 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 diferent ages. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, nº. 02, pp. 373-384, April-June, 2014. DOI: 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, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104053>.
- SIMÕES, A.N. **Processamento do glicerol bruto em reatores anaeróbios de leite fluidificado, acidogênico e metanogênico, em temperatura mesofílica**. 147f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.
- 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: 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:10.1007/s00254-008-1214-3.
- 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: 10.1016/j.wasman.2019.11.009.

*Submetido em 22 de agosto de 2023
Aceito para publicação em 4 de março de 2024*