

Composição do Biogás em Aterro Sanitário de Porte Médio: Análise Temporal

Composition of Biogas in a Medium-Sized Landfill: Temporal Analysis

Sandra R. S. Boarati,^{a,*}  Marcus C. A. A. de Castro^a 

^aUniversidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, Departamento de Engenharia Ambiental, Av. 24-A 1515, Bela Vista, CEP 13506900, Rio Claro-SP, Brasil

*E-mail: srsarro@gmail.com

Recebido: 10 de Outubro de 2023

Aceito: 7 de Junho de 2024

Publicado online: 18 de Junho de 2024

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; sanitary landfill; sustainability.

1. Introdução

O crescimento populacional eleva significativamente o volume de resíduos sólidos urbanos, gerando diversos problemas ambientais, especialmente relacionados à disposição e estocagem inadequadas, que contaminam o solo e as águas subterrâneas.¹⁻⁴ A fração orgânica desses resíduos, por meio da degradação anaeróbia, gera biogás,⁵⁻⁷ composto majoritariamente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Com o desenvolvimento tecnológico, este biogás, produzido em aterros sanitários, é utilizado como fonte de energia alternativa, representando uma potencial estratégia para a substituição de combustíveis fósseis.⁸⁻⁹

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.¹⁰

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 2015.¹¹

É necessário considerar vários fatores na geração de CH₄ 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.^{9,12-14}

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.¹⁵

Existem diversos modelos de estimativa de produção de biogás em aterros sanitários.¹⁶ De acordo com Dornela¹⁷ e Castro,¹⁸ 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. Essa energia mal reaproveitada poderia estar sendo melhor administrada a favor do desempenho ambiental através de sua exploração nos aterros sanitários. Devido as composições dos resíduos sólidos com elevada matéria orgânica e condições climáticas do Brasil, este 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, São Paulo, Brasil realizando a análise comparativa da temperatura, influência da precipitação pluviométrica na vazão e na concentração de CH₄ e CO₂ do biogás no período de 18 meses.

Neste contexto, é necessário que 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 permitindo a construção de um plano de negócio com maior confiabilidade.

1.1. Produção do biogás

1.1.1. 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.¹⁹⁻²⁰ A caracterização deve ser feita localmente, possibilitando a maior representatividade e confiabilidade das informações.^{12,21-22}

Uma grande quantidade de materiais orgânicos (65%) é encontrada no Brasil e estão dispostos no aterro sanitário com grande potencial de geração do biogás, superando os outros países tais como a Alemanha (61,20%), Holanda (50,30%) e EUA (35,60).²³ As composições de resíduos sólidos urbanos (RSU) brasileiros são de massa heterogênea, com umidade que se aproxima de 50% da massa. A composição média de RSU é de matéria orgânica (51,4%), metais (2,9), vidro (2,4%), outros (16,7%) e plástico (13,5%).²⁴⁻²⁵ A estimativa global de RSU é de 4 bilhões de toneladas ao ano e, desse montante, 1,6 a 2 bilhões correspondem aos RSU.^{21,26-29}

No Brasil, ocorreu um aumento de 67 para 79 milhões de toneladas por ano de RSU e a geração per capita de 348 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 para 43 milhões de toneladas. Já as destinações inadequadas, como lixões e aterros controlados, registraram de 25 para 29 milhões de toneladas por ano.²⁹⁻³⁰

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.³¹⁻³³

Existe a necessidade de uma gestão eficiente na disposição final dos RSU reduzindo impactos ambientais, utilizando novas áreas com mudanças climáticas e reciclando recursos.³⁴⁻³⁶

1.1.2. 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, a disposição, manejo e a idade do aterro. Recebe influência dos fatores climáticos, tais como a temperatura e a quantidade de chuva.^{12,37-40}

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.^{12,41}

1.1.3. 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 CH_4 , CO_2 e NH_3 , traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular.⁴²⁻⁴³

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 CH_4 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 CH_4 .⁴⁴⁻⁴⁵

A produção e a composição do biogás gerado podem variar temporal e espacialmente no aterro, devido as diferentes formas como o aterro é preenchido ou mesmo a 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.^{42,46-47}

A constituição do biogás é de CH_4 (45-75%), CO_2 (25-50%), H_2O (2-7%), H_2S (0,05-1%) e outros componentes.⁴⁸

O biogás pode contribuir para uma diversificação das fontes de energia na matriz elétrica, sendo necessário diversificá-la. 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.⁴⁹⁻⁵³

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.⁵⁴⁻⁵⁵ 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).⁵⁵⁻⁵⁷

2. 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 e 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 do 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 98.000m² 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.⁵⁷⁻⁵⁸

No aterro, a geração média (últimos 12 meses) de lixiviado foi de 2000 m³/mês. O lixiviado é pré-tratado em uma estação localizada dentro do aterro, pelo método de filtragem por micro membranas 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 subsuperficial, sistema de tratamento de líquidos percolados, entre outros. É possível observar o detalhamento das áreas do aterro (Figura 1).

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). O conjunto de drenos de gás monitorados estão apresentados na Tabela 1.

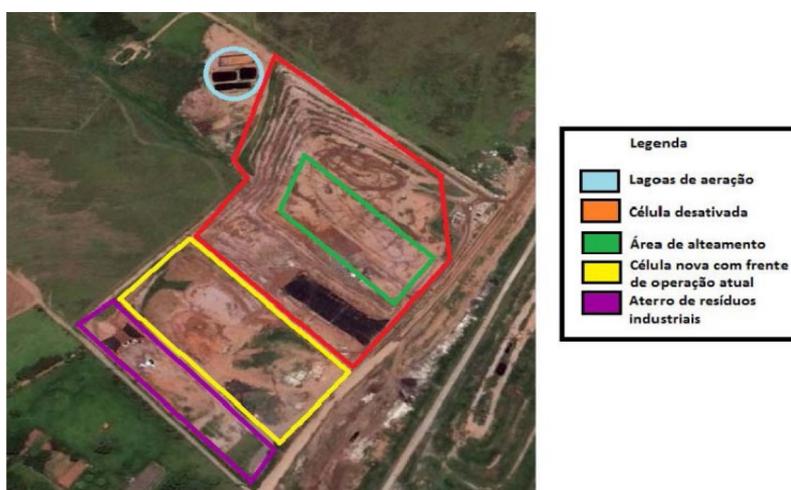


Figura 1. Vista aérea das áreas do aterro sanitário de Rio Claro-SP



Figura 2. Aterro sanitário de Rio Claro com a disposição dos drenos de biogás

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

Para a medição da composição do biogás foi escolhido o instrumento de medição portátil LANTEC, Modelo GEM-2000, 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.

Para o início da coleta de dados, os drenos foram selados com plástico filme. 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.

Como pode ser observado na Figura 3, a medição da composição do biogás nos drenos foi realizada através das etapas: (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).

Neste ensaio foram coletados dados de vazão e porcentagem de CH₄ do biogás liberados nos drenos, sempre em diferentes períodos. Os dados são comparados a partir da proposição de três cenários, observando o potencial de geração (L0) e a constante de geração (k), sendo um otimista (L0 = 200; k = 0,09), um moderado (L0 = 170; k = 0,06) e outro conservador (L0 = 90; k = 0,04) em relação à taxa de geração de CH₄.

Na obtenção dos dados de cada dreno, foi utilizado a ficha para análise do biogás do Aterro Sanitário de Rio Claro contendo com as informações: data e horário da coleta, número do dreno, pressão relativa e barométrico

mb (milibares), composição de CH₄, CO₂ e O₂ em (%), Temperatura (°C), velocidade (m/s) em 10, 20, 30, 40, 50, 60 segundos, velocidade média (m/s), vazão (m³/h), vazão de CH₄, temperatura ambiente (°C), condições meteorológicas e área da chaminé. Dentre todos esses dados coletados, pode-se selecionar o dreno escolhido, selecionar o período da coleta para obtenção da média dos dados coletados, o desvio padrão, o erro padrão e o cruzamento dos dados para a construção de gráficos.

No caso particular estudado sobre o lixiviado, os valores de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), DQO (Demanda Química de Oxigênio), AVT, NTK e N amoniacal das amostras de lixiviado indicaram que os resíduos aterrados se encontram na fase metanogênica estável. Já os índices de biodegradabilidade DBO/DQO do lixiviado indicaram uma baixa biodegradabilidade dos resíduos aterrados. Apesar da geração de biogás ser elevada, uma pequena parcela de material passível de degradação biológica foi encontrada. A média das relações DBO/DQO e SVT/ST do solubilizado obtido nas amostras de resíduos coletados em área com recirculação foram 0,44 e 0,20, respectivamente. Já a média da obtida em áreas sem recirculação foram 0,50 para DBO/DQO e 0,44 para SVT/ST (Sólidos Voláteis Totais/Sólidos Totais). Os menores valores das relações obtidos na área com recirculação demonstram resíduos em uma fase mais avançada de degradação, com menor biodegradabilidade e mais estabilizado (menor quantidade de material orgânico). Portanto, os resultados demonstram que a prática de recirculação em aterros acelera o processo de degradação dos resíduos aterrados.



Figura 3. Procedimento para aferição da composição do biogás

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 recirculação de lixiviado (RL) com idade de 7 a 9 anos;
- Conjunto de dados do dreno 28, sem recirculação de lixiviado (RL) e do dreno 19, com recirculação de lixiviado (RL) 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.

A análise comparativa da influência da precipitação pluviométrica, da temperatura na vazão e na concentração de CH_4 e CO_2 do biogás e do coeficiente de correlação de Pearson foram utilizados como método de análise nos drenos no aterro sanitário de Rio Claro, São Paulo sendo aplicados sobre os valores de vazão e temperatura do biogás; de vazão de CH_4 e temperatura do biogás; de vazão de CO_2 e de temperatura do biogás. O estudo do coeficiente de correlação de Pearson, criada por Karl Pearson que desenvolveu uma estatística dando origem ao coeficiente (r) que assume apenas valores entre -1 e 1.⁵⁹⁻⁶² Dessa forma, a medição aplicada a associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis, mensurando a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas.

3. Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta 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 RL.

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 $42,10\text{ }^\circ\text{C}$, com vazão de biogás a $19,83\text{ m}^3/\text{h}$ no dreno 5, enquanto no dreno 1 a temperatura chegou a $34\text{ }^\circ\text{C}$, com vazão do biogás a $16,39\text{ m}^3/\text{h}$. No dia 85, o pico mais alto de temperatura chegou a $39,70\text{ }^\circ\text{C}$, com vazão do biogás a $51,19\text{ m}^3/\text{h}$ no dreno 19 (com recirculação de lixiviado), enquanto no dreno 28 (sem recirculação de lixiviado) a temperatura chegou a $38,20\text{ }^\circ\text{C}$, com vazão do biogás a $32,66\text{ m}^3/\text{h}$. Dessa forma, pôde-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 no dreno 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.

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 podem ser observadas na Figura 5.

Na Figura 5 pode ser observado que os valores da concentração de CH_4 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 variações, entre $15,42$ e $33,78\text{ m}^3/\text{h}$, com média de $21\text{ m}^3/\text{h}$, e para a concentração de CH_4 chegou na média de $57,52\%$ CH_4 . Já no dreno 1 (sem recirculação de lixiviado), houve variação entre $5,63$ e $23,59\text{ m}^3/\text{h}$, com média de

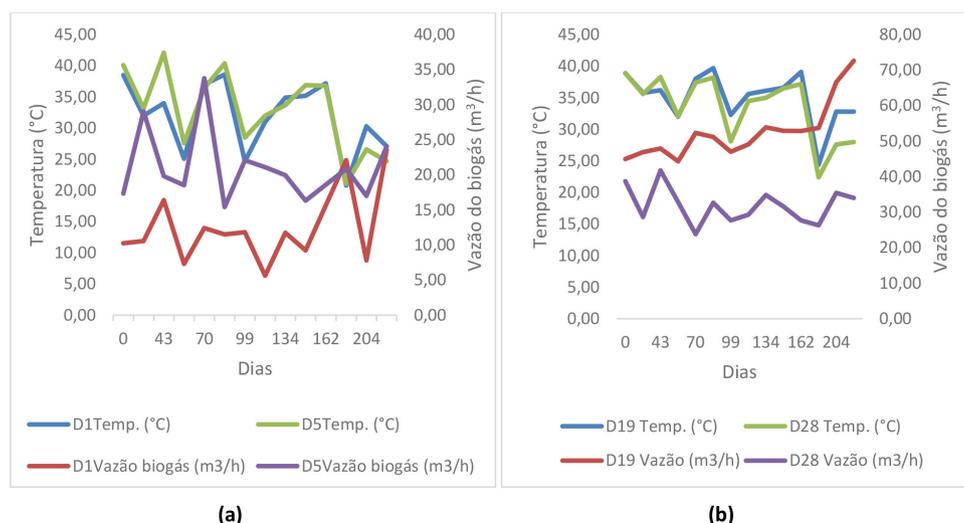


Figura 4. Análise dos valores de vazão e temperatura do biogás nos drenos 1-5 (a) e 19-28 (b)

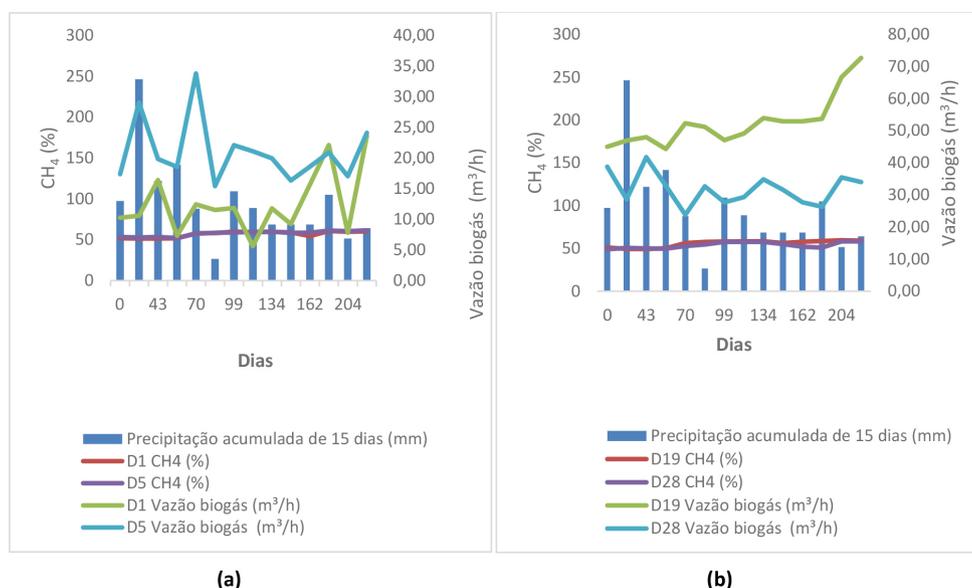


Figura 5. Análise da influência da precipitação na produção de biogás em drenos com e sem recirculação de lixiviado nos drenos 1-5 (a) e 19-28 (b)

12,58 m³/h da vazão do biogás, e para a concentração de CH₄, o valor foi de 56,80%.

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

No caso da vazão do biogás, observou-se que no dreno 5 e 19 as vazões foram mais elevadas 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 CH₄ 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 CH₄.⁶³⁻⁶⁵

Observou-se uma maior variação da concentração de CH₄ 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 CH₄ 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.⁶⁶ A precipitação influencia a mobilidade do CH₄ através do

solo, à medida que os espaços vazios do solo ficam saturados com água.⁶⁷

Foi realizado a análise dos valores de vazão de CH₄ e temperatura do biogás nos drenos 1-5 e 19-28 (Figura 6).

Através da Figura 6 é possível observar que os drenos 5 e 19 (com recirculação de lixiviado) obtiveram produção maior de vazão de CH₄ e temperatura elevada em relação aos drenos 1 e 28 (sem recirculação de lixiviado).

O pico mais alto de temperatura foi observado no dia 43, chegando a 42,10 °C, com vazão de CH₄ a 10,57 m³/h no dreno 5, enquanto no dreno 1, a temperatura chegou a 34 °C, com vazão de CH₄ a 8,44 m³/h. No dia 85, o pico mais alto de temperatura chegou a 39,70 °C, com vazão de CH₄ a 29,43 m³/h no dreno 5, enquanto no dreno 1, a temperatura chegou a 38,20 °C, com vazão de CH₄ a 17,83 m³/h. Dessa forma, pôde-se observar que a recirculação do lixiviado nos drenos 5 e 19 causou influência no aumento da atividade biológica e, conseqüentemente, no aumento da vazão de CH₄.

Algumas hipóteses podem ser levantadas em relação a redução do CH₄, 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).⁶⁸

A análise dos valores de vazão de CO₂ e temperatura do biogás nos drenos 1-5 e 19-28 pode ser visto conforme a análise (Figura 7).

Através da Figura 7 são percebidos picos de vazão do CO₂ nos drenos 5 e 19 em relação aos drenos 1 e 28. O pico mais alto da vazão do CO₂ 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 CO₂ no dreno 19 foi de 29,35 m³/h com temperatura de 39,70 °C, enquanto

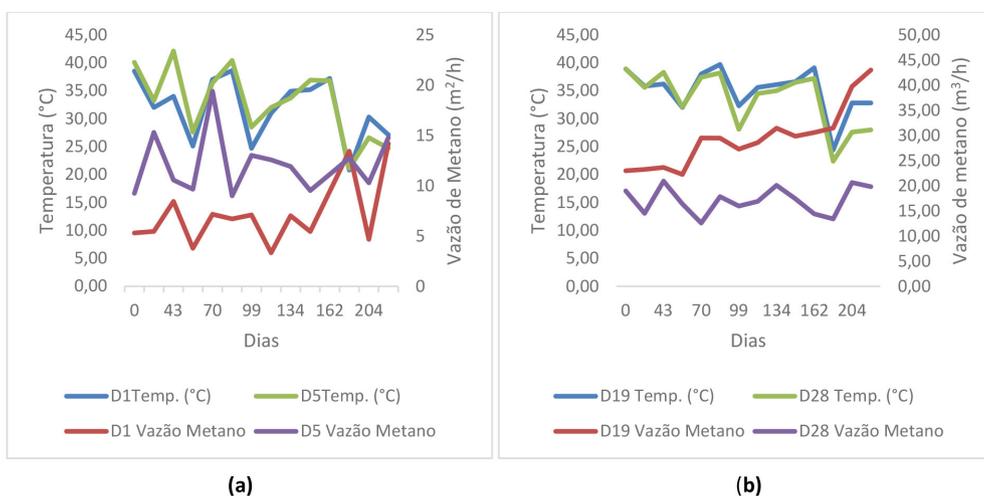


Figura 6. Análise dos valores de vazão de CH₄ e temperatura do biogás nos drenos com e sem recirculação de lixiviado nos drenos 1-5 (a) e 19-28 (b)

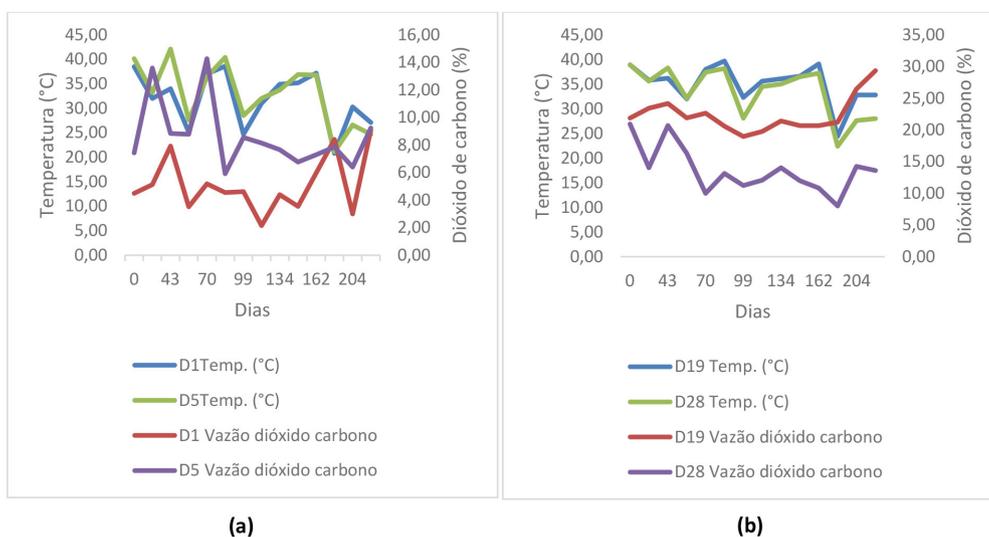


Figura 7. Análise dos valores de vazão de CO₂ e temperatura do biogás nos drenos com e sem recirculação de lixiviado nos drenos 1-5 (a) e 19-28 (b)

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 coeficiente de correlação de Pearson foi aplicado sobre os valores de vazão e temperatura do biogás, vazão de CH₄ e CO₂ nos drenos 1-5 e 19-28 (Tabela 2).

Na análise do Coeficiente de Correlação de Pearson

Tabela 2. 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 CH ₄ 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 CO ₂ 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

entre variáveis no estudo relacionado a biogás foi realizado a comparação entre os drenos 1-5 e 19-28:

- Temperatura (°C) e Vazão do biogás (m³/h): a correlação fraca positiva sugere que, quando a temperatura aumenta, a vazão do biogás também tende a aumentar, mas essa relação não é muito forte;
- Vazão de CH₄ e CO₂: a correlação fraca positiva entre essas duas variáveis indica que, à medida que a vazão de metano (CH₄) aumenta, a vazão de dióxido de carbono (CO₂) também aumenta, embora não de forma significativa.
- Drenos específicos: os coeficientes variam para diferentes drenos, tais como:
 - Dreno 1 e 28: correlação fraca positiva para CO₂;
 - Dreno 5: correlação ínfima positiva para CO₂;
 - Dreno 19: correlação moderada positiva para CO₂.

4. Conclusões

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, pode-se concluir que, em relação a influência da precipitação na vazão do biogás, foi observado 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 CH₄ 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.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), (Código de Financiamento 001).

Referências Bibliográficas

1. Cavalcanti, M. M.; Borges, W. R.; Stollberg, R.; Rocha, M. P.; Cunha, L. S.; Seimetz, E. X.; Nogueira, P. V.; Sousa, F. R. F. R. O.; Levantamento geofísico (eletrorresistividade) nos limites do aterro controlado do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília-DF. São Paulo, UNESP. *Geociências* **2014**, *33*, 298. [[Link](#)]
2. Moreira, L. L.; Schwaback, 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. São Paulo, UNESP. *Geociências* **2016**, *35*, 531. [[Link](#)]
3. Carvalho, M. B.; Giovanini 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. São Paulo, UNESP. *Geociências* **2019**, *38*, 717. [[Link](#)]
4. Lopes, R. C.; Silva, R. N. F.; Aplicação das lógicas booleana e fuzzy na determinação de áreas aptas para a implantação de aterro sanitário. São Paulo, UNESP. *Geociências* **2022**, *41*, 377. [[Link](#)]
5. Piñas, J. A. V.; Venturini, O. J.; Lora, E. E. S.; Oliveira, M. A.; Roalcaba, O. D. C.; Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). *Revista Brasileira de Estudos de População* **2016**, *33*, 175. [[Crossref](#)]
6. Ahmadian, M.; Reshadat, S.; Yousefi, N.; Mirhossieni, S. H.; Zare, M. R.; Ghasemi, S. R.; Gilan, R. N.; Khamutian, R.; Fatehizadeh, A.; Municipal leachate treatment by Fenton process: effect of some variable and kinetics. *Journal of Environmental and Public Health* **2013**, 169682. [[Crossref](#)]
7. 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. *Environmental Science & Technology* **2014**, *48*, 2920. [[Crossref](#)]
8. Gupta, P.; Kurien, C.; Mittal, M.; Biogas (a promising bioenergy source): A critical review on the potential of biogas as a sustainable energy source for gaseous fuelled spark ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy* **2023**, *48*, 7747. [[Crossref](#)]
9. 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* **2019**, *6*, 1664862. [[Crossref](#)]
10. Cable News Network – CNN. Governo quer criar órgão para regular consumo de energia e evitar apagão no país. 2021.
11. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC. Reportagem: Potencial energético do biogás é estratégico para o Brasil, 2017.
12. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

13. 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* **2004**, *39*, 2157. [Crossref]
14. 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* **2009**, *100*, 4976. [Crossref]
15. Fernandes, G.; Mariani, L.; O alto potencial de produção e uso do biogás a próxima fronteira da energia renovável no Brasil? Caderno Opinião, 2019.
16. 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. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2020**, *8*, 104. [Crossref]
17. Dornela, N. M. O.; Faria, B. P.; Zschaber, K. V. J. H.; Paula, E. C.; Comparação de modelos de previsão de geração de metano em aterros sanitários brasileiros para o seu aproveitamento energético. 4º Congresso Sul-americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Gramado, RS, Brasil, 2021.
18. 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 Livre-Docência em Geociências e Meio Ambiente – Universidade Estadual Paulista de Rio Claro (UNESP). Rio Claro: Unesp, 2016.
19. Marshall, R. E.; Farahbakhsh, K.; Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management* **2013**, *33*, 988. [Crossref]
20. Dehghanifard, E.; Dehghani, M. H.; Evaluation and analysis of municipal solid wastes in Tehran, Iran. *MethodsX* **2018**, *5*, 312. [Crossref]
21. 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. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental Sustentável* **2020**, *7*, 953. [Crossref]
22. Firmo, A. L. B.; Análise numérica de aterros de resíduos sólidos urbanos: calibração de experimentos em diferentes escalas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.
23. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
24. Empresa de Pesquisa Energética. Modelos de negócios para a geração de eletricidade a partir de Resíduos Sólidos Urbanos. EPE, 2020.
25. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004 - Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
26. Gutberlet, J.; Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. *Waste Management* **2015**, *45*, 22. [Crossref]
27. Alkmin, D. V.; Uberto Jr, L.; Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do lixão do município de Maria da Fé, Estado de Minas Gerais. *Caminhos de Geografia* **2017**, *18*, 65. [Crossref]
28. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: Abrelpe, 2017.
29. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: Abrelpe, 2020.
30. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: Abrelpe, 2022.
31. Brasil. Presidência da República. Lei 12.305, 2 de agosto 2010. Brasília: Planalto, 2010a.
32. Brasil. Presidência da República. Lei 14.026, 15 de julho 2020. Brasília: Planalto, 2010b.
33. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Plano nacional de resíduos sólidos. Brasília: MMA, 2012.
34. Agbozu, I.; Oghama, O.; Odhikori, J.; Physico-chemical characterization and pollution index determination of leachates from Warri Waste Dumpsite, Southern Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* **2015**, *19*, 361. [Crossref]
35. 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* **2018**, *173*, 256. [Crossref]
36. 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* **2020**, *102*, 452. [Crossref]
37. Im, J. H.; Woo, H. J.; Choi, M. W.; Han, K. B.; Kim, C. W.; Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anerobic-aerobic system Integrating landfill bioreactors, partial nitrification and anammox process for methane recovery and nitrogen removal from leachate. *Water Resources* **2001**, *35*, 2403. [Crossref]
38. Kjeldesen, P.; Barlaz, M. A.; Rooker, A. P.; Baun, A.; Ledin, A.; Christensen, T. H.; Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **2002**, *32*, 297. [Crossref]
39. Ozturk, I.; Altinbas, M.; Koyuncu, I.; Arikan, O.; Gomec-Yangin, C.; Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Waste Management* **2003**, *23*, 441. [Crossref]
40. 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. *Engenharia Sanitária Ambiental* **2020**, *25*. [Crossref]
41. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Aterro Sanitário. CETESB, 2020.
42. 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* **2014**, *31*, 373. [Crossref]

43. Barcelo, B. R. S.; Avaliação de diferentes inócuos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Faculdade de Tecnologia, UnB – Brasília, 2009.
44. 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* **2015**, *7*, 482. [[Crossref](#)]
45. Oliveira, C. A. A.; Análise do Fluxo de Gases na Camada de Cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (Asmoc). Dissertação de Mestrado em Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.
46. 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) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.
47. 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 de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos - USP, 1996.
48. 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.
49. 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 de Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.
50. 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* **2022**, *13*, 156. [[Crossref](#)]
51. Matos, J. C. S.; Influência do eletromagnetismo na biodigestão anaeróbia. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2017.
52. Krenzinger, A.; Para evitar crise, Brasil precisa diversificar matriz energética, 2014. [[Link](#)]
53. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. EPE. Brasília, 2007.
54. 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* **2011**, *31*, 966. [[Crossref](#)]
55. 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. *Engenharia Sanitária Ambiental* **2019**, *24*, 143. [[Crossref](#)]
56. 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* **2015**, *6*, 51. [[Crossref](#)]
57. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos. CETESB, 2018.
58. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos - 2021. CETESB 2022.
59. Stanton, J. M.; Galton, Pearson, and the Peas: A Brief History of Linear Regression for Statistics Instructors. *Journal of Statistical Education* **2001**, *9*, 3. [[Crossref](#)]
60. Moore, D. S.; The Basic Practice of Statistics. New York, Freeman, 2007.
61. Garson, G. D.; Statnotes: Topics in Multivariate Analysis, 2009.
62. 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* **2016**, *66*, 1257. [[Crossref](#)]
63. 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. *Engenharia Sanitária Ambiental* **2018**, *23*, 101. [[Crossref](#)]
64. Dimiskovska, B.; Berisha, A.; Calculation of methane emissions from municipal solid waste landfill Germova using ipcc method. *South-East European Research Institute on Geo Sciences* **2021**, *16*, 26. [[Crossref](#)]
65. Delkash, M.; Zhou, B.; Fotini, Ch.; Rell, W.; Imnof, M.; Short-term landfill methane emissions dependency on wind. *Waste Management* **2016**, *55*, 288. [[Crossref](#)]
66. Teclé, D.; Lee, J.; Hasan S.; Quantitative analysis of physical and geotechnical factors affecting methane emission in municipal solid waste landfill. *Environmental Geology* **2009**, *56*, 1135. [[Crossref](#)]
67. 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* **2010**, *136*, 777. [[Crossref](#)]
68. 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. *Journal of Environmental Health Science & Engineering* **2017**, *15*, 1. [[Crossref](#)]