

Potencial e custos Georreferenciados da produção do biogás e biometano no Brasil a partir de diferentes resíduos orgânicos

Andreza Nascimento Vaz¹, Electo Eduardo Silva Lora², Ana Paula Mattos³

¹PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/PPG-EME - Itajubá, Universidade Federal de Itajubá, Brasil.
Email: andrezanascimentovaz@gmail.com

²Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída -NEST, Itajubá, Universidade Federal de Itajubá, Brasil.
Email: electo@unifei.edu.br

³EBMA, FEM, Universidade Federal do Pará, Brasil. Email: anapmattos@ufpa.br

⁴Grupo de pesquisa, Unidade acadêmica, Universidade ou Instituição, País. Email: correio eletrônico

Resumo

Um dos desafios da produção do biometano no Brasil, bem como do seu uso, está relacionado a logística de transporte, devido à falta de estudos detalhados de toda a cadeia de abastecimento a nível nacional, que inclui a coleta dos resíduos até o transporte para a aplicação final. Em vista disso, este artigo tem como objetivo apresentar um estudo de georreferenciamento do potencial de produção de biogás e biometano proveniente de excretas de animais da pecuária, esgoto e vinhaça, considerando a sua aplicabilidade e custos. O software Arcgis® foi utilizado no estudo da logística e criação de mapas. O biogás foi oriundo da vinhaça apresentou um potencial de 1.100 milhões de m³/ano concentrados no sudeste e centro-oeste do país. A lavagem com água apresentou menor investimento e maior eficiência, 5820 R\$ por m³/h e 97%, respectivamente. Por fim, a produção de 1.100 milhões de m³/ano de biometano a partir do total de resíduos foi estimado no Brasil. Mostrando que o Brasil possui um elevado potencial de biometano.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos; Biogás; Biometano; Georreferenciamento.

Abstract

One of the challenges for biomethane production in Brazil, as well as its use, is related to transportation logistics, due to the lack of detailed studies of the entire supply chain at a national level, which includes waste collection through to transportation for final application. In view of this, this article aims to present a georeferencing study of the potential for producing biogas and biomethane from livestock excreta, sewage and vinasse, considering its applicability and costs. Arcgis® software was used to study logistics and create maps. Biogas from vinasse had a potential of 1.1 billion m³/year, concentrated in the southeast and central-west of the country. Water scrubbing showed the lowest investment and the highest efficiency, 5820 R\$ per m³/h and 97%, respectively. Finally, the production of 1.1 billion m³/year of biomethane from total waste was estimated in Brazil. This shows that Brazil has a high biomethane potential.

Keywords: Organic waste; Biogas; Biomethane; Georeferencing.

1. Introdução

O biometano (biogás refinado) é um dos substitutos renováveis mais viáveis para o gás natural, devido ser uma fonte de energia bem gerenciável que pode ser armazenada, distribuída e utilizada a mesma infraestrutura que o gás natural [1]. Comparado ao biogás, o seu transporte e armazenamento são mais competitivos devido seu poder calorífico ser maior que do biogás [2].

O biometano pode ser facilmente produzido a partir da digestão anaeróbica de resíduos de matéria orgânica e renovável, resultando na produção do biogás, seguido da sua purificação (biometano). O biogás produzido com resíduos da pecuária pode trazer benefícios para as empresas rurais, tais como a recuperação do valor dos resíduos agrícolas, redução do consumo de eletricidade, reduzindo os custos e ajudando a desenvolver a prática da economia circular [3] e oferecendo uma nova perspectiva para o tratamento dos resíduos e geração de energia. Além disso, o uso

do biogás e biometano resulta em menores emissões de gases de efeito estufa (GEE), comparado às emissões oriundas de produtos de combustíveis fósseis [4].

O biogás é uma mistura bruta de gases, produzido através do processo de digestão anaeróbica, cuja composição consiste em 50 – 75% de metano (CH_4), 25 – 50% de dióxido de carbono e 2 – 8 % de outros gases como nitrogênio, oxigênio e gases residuais (sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e hidrogênio) [5].

Resultados de um estudo de aproveitamento energético do biogás no Brasil, mostraram que a produção do biometano tem melhor desempenho econômico se comparada à produção de eletricidade [6]. Em adição a isso, a utilização do biometano como substituto do diesel na logística (agrícola e industrial) é a sua forma de utilização mais atrativa do ponto de vista econômico [7]. Ademais, a sua elevada concentração de CH_4 confere um valor calorífico mais alto, tornando-o mais competitivo e atrativo para aplicações energéticas, como transporte, indústria, e uso doméstico [8].

Atualmente, no Brasil estão instaladas seis plantas de biometano em operação, autorizadas pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), cuja capacidade se aproxima de 450 mil m^3/dia . Em adição a isso, a Abiogás (Associação Brasileira do Biogás) identificou um volume entre 800 mil e 1 milhão de m^3/dia para entrar em operação até o final de 2024 [9].

Embora novos incentivos estejam sendo implementados para estimular a produção do uso do biometano, a capacidade atual instalada representa menos de 2% do potencial do país [9]. E um dos maiores desafios da produção do biometano bem como do seu uso no Brasil, está relacionado a logística de transporte, devido à falta de estudos detalhados de toda a cadeia de abastecimento a nível nacional, que inclui a coleta dos resíduos até o transporte para a aplicação final.

As ferramentas do sistema de informações geográficas (GIS), estão sendo muito utilizadas para realizar análises aprofundadas do fornecimento de matéria-prima e da logística para a produção de biogás e biometano em nível local, regional e nacional em diferentes países [10]–[17]. Neste sentido, a utilização da ferramenta GIS pode auxiliar no processo da implementação do biometano no Brasil, por meio de um modelo geo-espacial é possível avaliar a logística de transporte, distâncias, limites de espalhamento e possíveis aplicações, bem como seus custos.

O objetivo deste artigo é apresentar um estudo de georreferenciamento do potencial de produção de biogás e biometano proveniente de excretas de animais (bovinos, suínos e galinhas), esgoto e vinhaça. Apresentando um estudo da melhor aplicabilidade deste combustível, bem como um estudo do custo nivelado da produção do biometano no país, com elaboração de mapas dos potenciais de resíduos e plantas de biogás e biometano.

2. Metodologia

O modelo adotado neste estudo é um modelo tecnoeconômico geograficamente explícito, que consiste no reorreferenciamento do potencial de biometano no Brasil, bem como localização de usinas existentes de biogás e possíveis novas usinas de bioenergia, minimizando os custos e as emissões de toda a cadeia de suprimentos.

Neste estudo, foi implementado a tecnologia de digestão anaeróbica para a produção do biogás, tendo como efluente resíduos orgânicos, que são as excretas de animais (bovinos de corte, vacas de ordenha, suínos e galinhas), esgoto e vinhaça. O objetivo é identificar locais ideais de refino do biogás, bem como infraestruturas para a aplicação do biometano. A cadeia de suprimento de biogás é apresentada na **Figura 1**.

2.1. Cálculo do potencial de biogás a partir de excretas de animais da pecuária

Neste estudo usou-se dados de animais confinados, devido a sua maior facilidade na coleta das excretas. Portanto, considerou-se excretas de gados de corte e vacas de ordenhas.

Os dados da quantidade de bovinos de corte foram obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), com a última atualização desses dados no site realizadas no ano de 2012 [18]. Os dados das vacas ordenhadas, suínos efetivos e galinhas efetivas do ano de 2022 foram obtidos também no SIDRA [19], [20]. Nos dados obtidos considerou a quantidade de cabeças de animais por microrregião geográfica do Brasil, cujo total de microrregiões são de cerca de 560. No total no Brasil tem-se cerca de 92,7 milhões de bovinos de corte, 15,7 milhões de vacas de ordenha, 44,4 milhões de suínos efetivos e 259,5 milhões de galinhas efetivas. No intuito de estimar o potencial teórico de geração de biogás a partir de excretas de animais considerou-se a média dos valores de produção de esterco por tipo de animal e sua respectiva conversão biogás/esterco, descritos na **Tabela 1**.

Tabela 1. Potencial de geração de biogás a partir de diferentes resíduos animais.

Animal (peso)	Esterco/animal (kg/dia)	Biogás/esterco (m^3/kg)
Bovino (500 kg)	10 - 15	0,038
Suíno (90 kg)	2,3 – 2,8	0,079
Aves (2,5 kg)	0,12 – 0,18	0,050

Fonte: Adaptado de [21].

A equação utilizada para calcular o potencial teórico de biogás a partir das excretas de animais é apresentado pela (. Tendo como base os valores médios da Tabela 1.

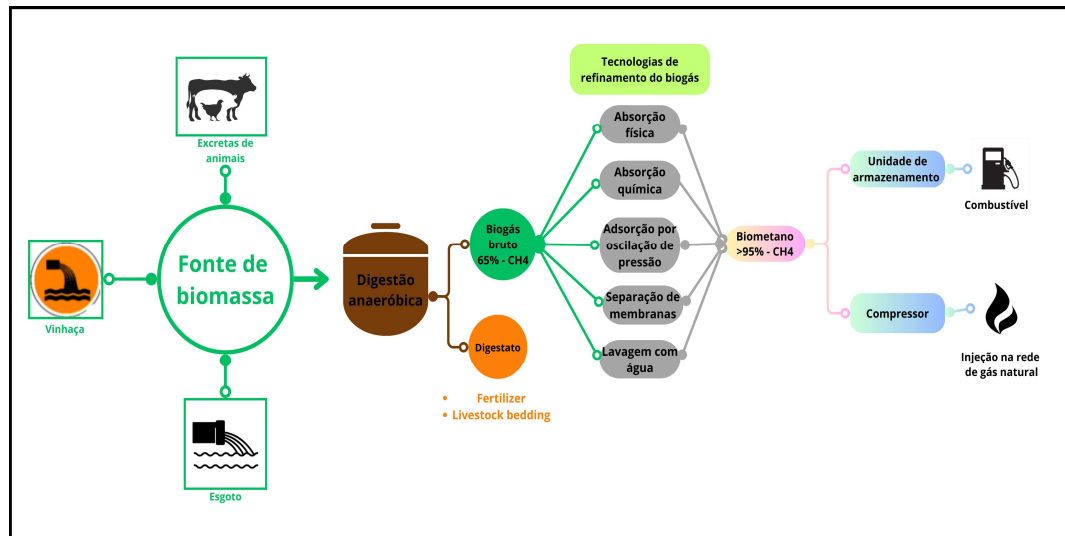


Figura 1. Cadeia de suprimento de biogás. Fonte: elaboração própria.

$$PB_{EX} = Q_i \cdot EX_i \cdot B_{EX} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: PB_{EX} é o potencial teórico de biogás a partir de excretas de animais em m^3/dia , Q_i é a quantidade de animais, EX_i é quantidade de esterco produzida por animal em kg/dia e B_{EX} é a quantidade de biogás gerada a partir de esterco em m^3/kg . O resultado final foi estimado considerando a produção de biogás em m^3/ano .

2.2. Cálculo do potencial de biogás a partir vinhaça

Ao estimar o potencial teórico de geração de biogás proveniente da vinhaça, considerou-se a média dos valores encontrados na literatura tanto para a vinhaça a partir do etanol de cana-de-açúcar quanto para a vinhaça do etanol de milho. Os valores das utilizados para o cálculo de produção de biogás a partir da vinhaça oriunda do etanol de cana-de-açúcar e de milho são apresentados respectivamente na

Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. Média dos valores utilizados para obter a estimativa de produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar.

Parâmetros	Valores médios	Referências
Fator de produtividade ($m^3_{\text{vinhaça}}/m^3_{\text{etanol}}$)	12,5	[22]
DQO _{vinhaça} ($kgDQO/m^3_{\text{etanol}}$)	37,5	[22]

Remoção de DQO, temp. mesofílica (%)	74	[22], [23]
Eficiência da geração de biogás ($Nm^3_{CH4}/kgDQO_{rem}$)	0,33	[22]
Concentração de metano (%)	60	[22], [24], [25]

Fonte: elaboração própria.

Tabela 3. Média dos valores utilizados para obter a estimativa de produção de biogás a partir da vinhaça de milho.

Parâmetros	Valores médios
Fator de produtividade ($m^3_{\text{vinhaça}}/m^3_{\text{etanol}}$)	20,69
DQO _{vinhaça} ($kgDQO/m^3_{\text{etanol}}$)	67,5
Remoção de DQO, temp. mesofílica (%)	87
Eficiência da geração de biogás ($Nm^3_{CH4}/kgDQO_{rem}$)	0,295
Concentração de metano (%)	71,25

Fonte: adaptado de [26].

Para calcular o potencial teórico de produção de biogás a partir da vinhaça, utiliza-se os dados da

Tabela 2 e Tabela 3 e a (Equação 2 apresentada a baixo.

$$PB_{Vin} = \frac{Q_e \cdot F_{ve} \cdot DQO_v \cdot R_{DQO} \cdot E_{biog}}{\%CH_{4biog}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: PB_{Vin} é o potencial teórico de biogás oriundo da vinhaça em m^3/dia , Q_e é a quantidade de etanol em m^3 , F_{ve} é o fator de produtividade em $m^3_{vinhaça}/m^3_{etanol}$, DQO_v é a DQO da vinhaça em kg_{DQO}/m^3_{etanol} , R_{DQO} é a remoção de DQO em %, E_{biog} é a eficiência da geração de biogás em kg_{DQO}/m^3_{etanol} e $\%CH_{4biog}$ é a concentração de metano em %.

2.3. Cálculo do potencial de biogás a partir do esgoto

O potencial de biogás a partir de esgoto foi estimado por meio da multiplicação da quantidade de carga gerada de esgoto em kg_{DQO}/dia pelo fator de conversão que relaciona a carga de DBO com a produção de biogás, cujo valor adotado foi de $0,12 m^3 \text{ biogás}/kg_{DQO}$ [27]. O cálculo é apresentado pela equação 3.

$$PB_{ESG} = Q_{esg} \cdot F_{esg} \quad (\text{eq.3})$$

Onde: PB_{ESG} é o potencial teórico de biogás em m^3/dia , Q_{esg} é a quantidade de carga total gerada de esgoto em kg_{DQO}/dia e F_{esg} é o fator de conversão em $m^3 \text{ biogás}/kg_{DQO}$.

2.4. Análise baseada em GIS

O software Arcgis® (versão 10.5) foi utilizado para realizar a análise baseada em GIS. Foi adotada a modelagem cartográfica para definir a localização das usinas de biogás e de etanol existentes no Brasil, dos gasodutos de transmissão de gás natural e os locais com potencial de quantidade de excretas de animais.

Os mapas foram criados com base nos dados de cabeças de animais relatados no SIDRA [18]–[20] (bovinos de corte, vaca de ordenha, suínos e galinhas). A distribuição foi dividida por microrregiões brasileiras, para isso foi necessário também utilizar shapefiles com os dados dos gasodutos de transmissão de gás natural, das usinas de etanol e biogás, das estradas, de dados de esgoto e da malha territorial do Brasil obtidas na literatura [28], [29], [30]. O mapa resultado é apresentado na Figura 2. A produção de cada matéria-prima foi detalhada no Arcgis®, nas camadas correspondentes dos limites territoriais e usinas de processamento. Onde diferentes combinações dessas camadas foram feitas e utilizadas para gerar as informações-alvo de localização, tamanho e área de coleta para usinas de biogás.

Ferramentas de análises e conversões do software (Grid Index Features, Clip, Intersect e Dissolve) e cálculos foram aplicados para determinar o potencial de volume de biogás produzido por uma área de $10^4 km^2$ (Figura 2).

2.5. Tecnologias de refinamento do biogás

Diferentes tecnologias para o refinamento de biogás estão comercialmente disponíveis no mercado. Neste trabalho foram adotados 5 dos mais comumente utilizados, começando pela absorção física, absorção química (amina), adsorção por oscilação de pressão, lavagem com água e separação de membranas. Antes do refinamento, os resíduos são tratados anaerobicamente, onde o custo de construção de planta de biogás e de sua respectiva purificação são incluídos. Para cada tecnologia, cinco diferentes capacidades de volume de biogás são considerados [12]. Suas características técnicas e custo de investimento são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4. Média de eficiência e o investimento específico das tecnologias de purificação de biogás.

Parâmetros		Vazão de entrada do biogás (m^3/h)				
Método	Eficiência média (%)	250	500	700	1000	1400
Absorção física R\$/ (m^3/h)	95,6	29100	11640	5820	5820	5820
Absorção química (amina) R\$/ (m^3/h)	97,03	31428	17460	13717,74	11640	9352,74
Adsorção por oscilação de pressão R\$/ (m^3/h)	95,4	31428	17460	12804	10185	8730
Lavagem com água R\$/ (m^3/h)	97	29100	11640	5820	5820	5820
Separação de membranas R\$/ (m^3/h)	94,84	25608	16878	13304,52	11640	10394,52

Fonte: adaptado de [12].

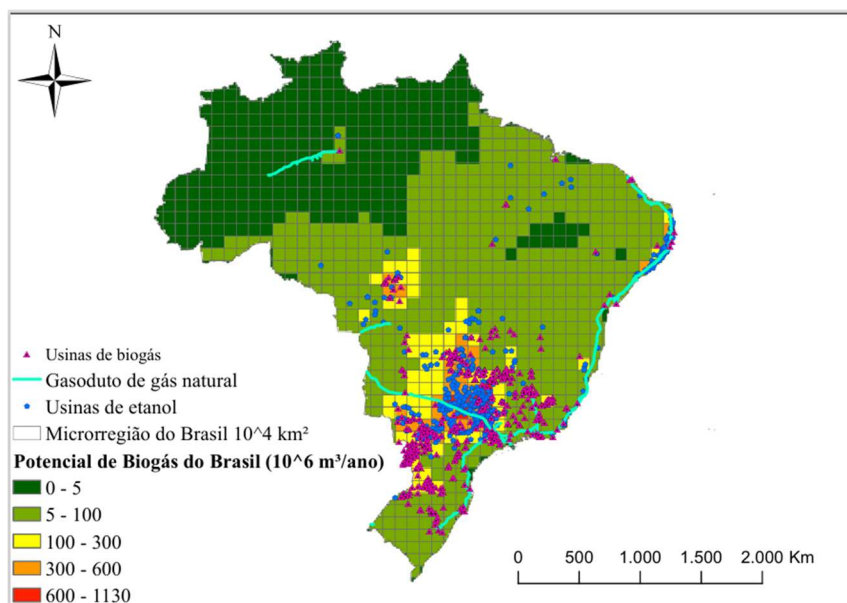


Figura 2. Potencial teórico total de produção de biogás em m³/ano a partir de excretas oriundo da pecuária, vinhaça e esgoto, incluindo a localização das usinas de biogás, usinas de etanol e a rede de gás natural existentes no Brasil. Fonte: elaboração própria.

A eficiência média das tecnologias foi obtido por meio da média de diferentes referências ([11], [31]–[33]). Para fins de melhor análise, o custo foi convertido do euro para o real, adotando um valor de conversão de 1 € para 5,82 R\$.

2.6. Logística de transporte

Na logística de transporte foi levado em consideração a produção de resíduos que encontram-se nas mesmas microrregiões do Brasil, assim facilita a coleta dos resíduos que encontram-se em regiões próximas.

A fim obter o custo mais efetivo para o método de produção do biometano, considerou-se o critério adotado por [12]. Segundo este autor, para o caso de plantas de biogás já existentes o custo de investimento para a produção de biometano é menor considerando o seguinte critério:

- O biogás de cada planta é entregue para uma grande planta de purificação para a produção de biometano e em sequência injetado direto na rede de gás natural.

Outros critérios para a logística de transporte são

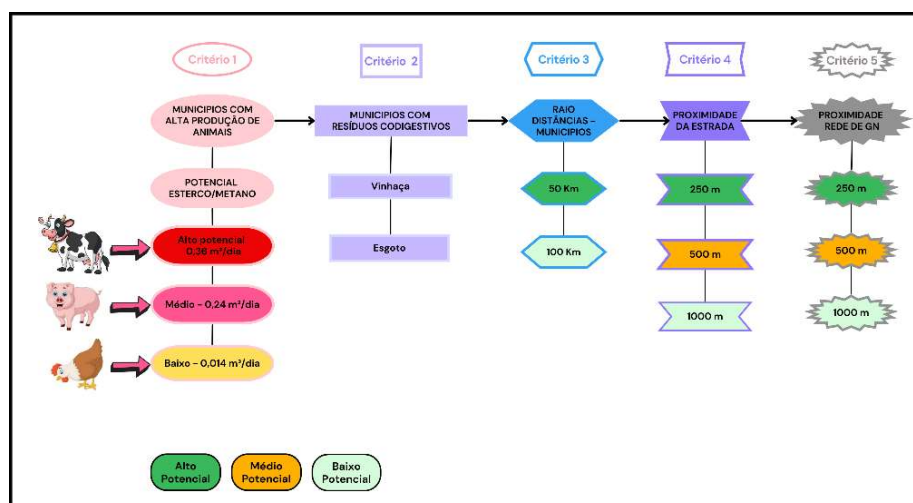


Figura 3: Fluxograma da logística de transporte dos resíduos para as plantas de biogás. Fonte: elaboração própria.

resumidos na Figura 3. Onde no critério 1 é levado em

consideração os municípios com alta produção de excretas de animais. As excretas de animais foram escolhidas como resíduos principais do estudo, devido sua alta produção e por conter um significativo fator de conversão de esterco para biogás, sendo o maior proveniente de excretas de bovinos, seguido de suínos e galinhas, com cerca de 0,36 m³/dia, 0,24 m³/dia e 0,014 m³/dia, respectivamente. Esse valor é referente ao volume médio de biogás produzido a partir da excreta de um animal por dia. O critério 2 envolve os municípios que possuem outros resíduos que podem ser usado para a produção do biogás também. Por fim, os critérios 3, 4 e 5 são referentes às distâncias dos municípios produtores dos resíduos para as plantas de biogás, às proximidades com as estradas e com a rede de gás natural. Esses critérios foram aplicados no mapa apresentado na Figura 2.

3. Resultados

Todos os três tipos de resíduos foram analisados para a produção de biogás. Neste estudo foi levado em consideração o potencial teórico.

O substrato que destacou-se com maior potencial teórico de produção de biogás foi a vinhaça oriundo das refinarias de cana-de-açúcar e milho, apresentando cerca de um total de 1.100 milhões de m³/ano de biogás no Brasil. Este substrato foi escolhido para este estudo, devido seu grande elevado potencial de conversão vinhaça/biogás e pela disponibilidade de dados. Seu maior potencial de produção está situada nas regiões sudeste e centro-oeste do país, devido serem as regiões onde se concentram maior parte das indústrias sucroalcooleiras do Brasil, como apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.(a)**, a qual apresenta o resumo dos mapas resultados da estimativa do potencial de biogás a partir da vinhaça e dos resíduos da pecuária.

O potencial de biogás a partir das excretas de animais é ilustrado também pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde apresenta a excreta de suínos com maior potencial de biogás comparada às excretas dos bovinos e galinhas, com um total de produção por volta de 200 milhões de m³/ano de biogás (**Erro! Fonte de referência não encontrada.(b)**). Seguida das excretas dos bois de corte e vacas de ordenhas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.(c)**) e das galináceas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.(d)**), com um total aproximado de 127 milhões de m³/ano e 50 milhões de m³/ano de biogás, respectivamente. Entretanto, é importante destacar que o potencial das regiões estão distribuídos por uma área de 10 mil km². O que significa que, ao analisar a quantidade distribuída por área, o biogás originário das excretas de bovinos possui uma maior área contendo um intervalo de 80 a 127 milhões de m³/ano (**Erro! Fonte de referência não encontrada.(c)**), comparada ao biogás oriundo de excretas de suínos, que possui um maior potencial de 100 a 200 milhões de m³/ano (cor

vermelha), porém concentrados em uma pequena área na região sul do Brasil (**Erro! Fonte de referência não encontrada. (b)**).

Ao analisar o potencial de produção de biogás oriundo de logo de esgoto, foi possível perceber que no atual cenário o seu potencial não é relevante quando comparado aos demais resíduos, apresentando um maior intervalo de potencial de biogás de cerca de 20 à 30 milhões de m³/ano em uma pequena área do país, com um pouco a mais de 10 mil km² como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Isso é devido ao dados utilizados para o cálculo do potencial, que são referentes aos dados de esgoto tratado por microrregiões do Brasil. Sendo assim, não foi considerado o volume total de esgoto do Brasil, devido a falta de dados específicos por microrregiões. Outra problemática é referente à disposição final do esgoto sem tratamento e a falta de sistemas de tratamento em algumas regiões. A média brasileira de atendimento da população urbana com sistemas coletivos de coleta e tratamento de esgotos é de 46,5%[34]. Em 2017, foi destacado que maior parte dos municípios do Brasil (2.364) não possuem serviço em funcionamento de esgotamento sanitário. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o mapa de potencial de biogás a partir do logo de esgoto e resume parte da problemática relacionada ao baixo potencial de biogás apresentado pelo lodo de esgoto.

De acordo com o mapa que mostra a porcentagem da população atendida com sistema coletivo de tratamento de esgotos, o Distrito Federal, Paraná e São Paulo são as Unidades da Federação que possuem melhores índices, superiores a 70%. Os estados com menores índices, abaixo de 15%, são Acre, Amazonas, Amapá, Maranhão, Rondônia e Pará (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

A Figura 5 apresenta o potencial de biogás com a soma total dos resíduos de animais, vinhaça e lodo de esgoto. A qual destaca duas regiões com maiores potenciais, as regiões centro-oeste e sudeste do Brasil.

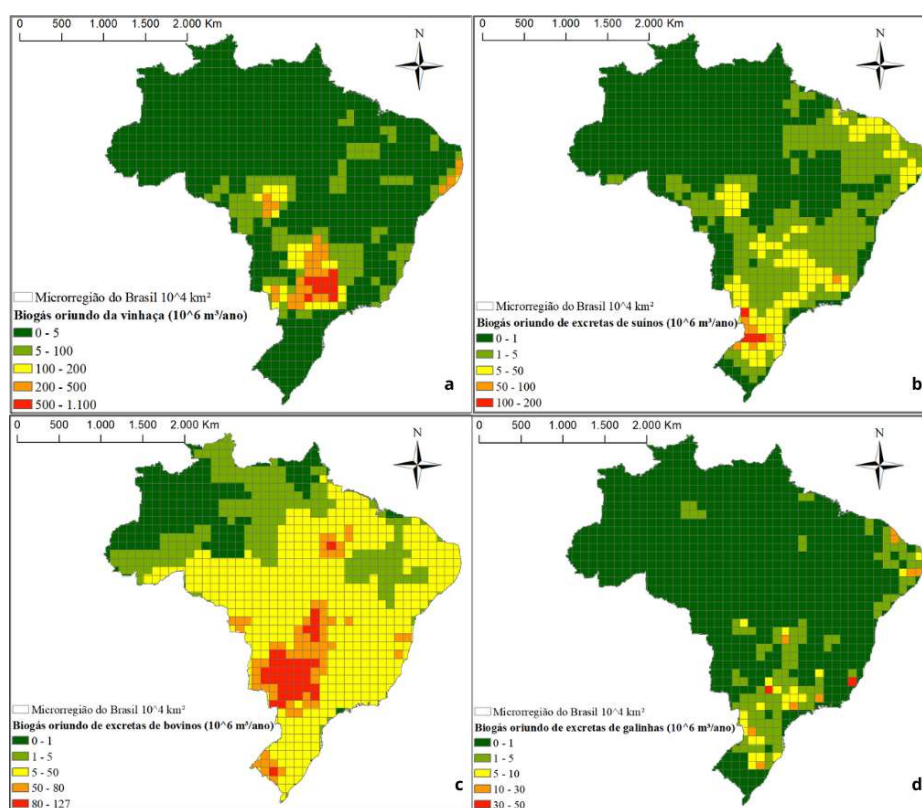


Figura 4. (a) Potencial de biogás oriundo da vinhaça de cana-de-açúcar e milho do Brasil. (b) Potencial de biogás oriundo de excretas de suínos do Brasil. (c) Potencial de biogás oriundo de excretas de bois de corte e vacas de ordenhas. (d) Potencial de biogás oriundo de excretas de galinhas do Brasil. Fonte: elaboração própria.

3.1.1. Análise de custo

Para de obter o custo da produção de biogás em uma planta de biogás, é necessário calcular o CapEX e o OpEX, que são referentes ao investimento para a construção da planta e ao custo operacional. Para o cálculo destes, alguns pontos são levados em consideração, como o CapEX e o OpEX para a digestão anaeróbica, expresso em função da vazão do biogás; o CapEX para o CHP, que considera o tamanho do motor e está relacionado à saída de energia elétrica do motor; e uma remoção biológica de H_2S adotada para limpar o biogás, calculado com base na taxa de fluxo do biogás. O CapEX para a limpeza do biogás também foi calculado baseado na taxa de fluxo de biogás, onde a equação foi obtida usando a regressão de potência para ajustar os dados da literatura para a produção de biogás na faixa de $200 \text{ m}^3/\text{h}$ a $2.000 \text{ m}^3/\text{h}$ [10]. As devidas equações que foram aplicadas neste trabalho para a análise de custo da produção do biogás são detalhadas em [10].

Foi analisado primeiramente o custo do biogás, e depois analisado o custo de purificação do biogás separadamente, pois o custo da produção do biometano depende do tipo de tecnologia.

O potencial de biogás do Brasil, considerando a soma de produção a partir dos três tipos de substratos é de 1130 milhões de m^3/ano de biogás, com um CapEX de aproximadamente 899 milhões de reais por planta de biogás, e um OpEX de 62,9 milhões de reais. Para plantas de biogás de médio porte ($1.10^6 - 5.10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$), o CapEX e o OpEX são respectivamente de 10,9 milhões por planta de biogás e 762 mil reais, o resumo para todas as faixas consideradas na Figura 5 são resumidos na Tabela 5. **CapEX e OpEX da média do potencial de biogás do Brasil a partir dos três resíduos considerados.**

Biogás ($10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$)	Média biogás (m^3/ano)	CapEx Total (R\$/Planta biogás)	OpEX total (R\$/ano)
0 - 5	2,50E+06	1,09E+07	7,62E+05
5 - 100	5,25E+07	1,06E+08	7,42E+06
100 - 300	2,00E+08	2,93E+08	2,05E+07
300 - 600	4,50E+08	5,45E+08	3,81E+07
600 - 1130	8,65E+08	8,99E+08	6,29E+07

Fonte: elaboração própria.

. As informações ilustradas na Figura 5 descrevem o custo da implementação de uma planta de biogás em

cada intervalo de potencial de produção de biogás mostrado no mapa.

que cerca de 3% da quantidade total de biogás produzida em cada estação é necessária para a

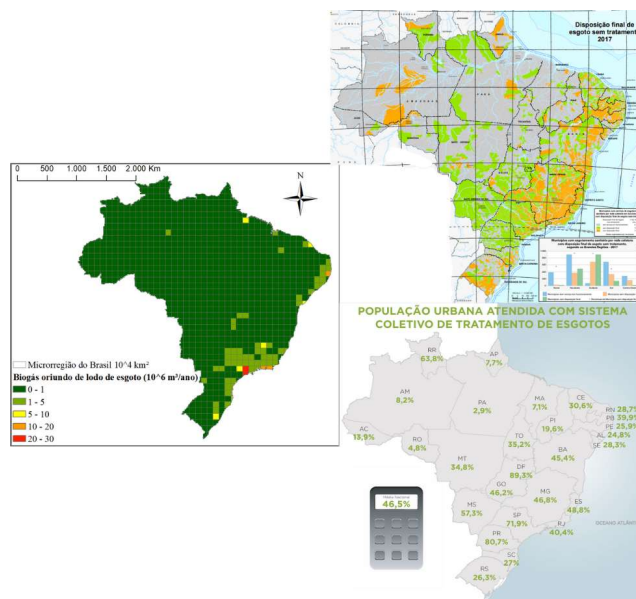


Figura 6. Potencial de biogás a partir do esgoto e o resumo do cenário de tratamento residual de esgoto. Fonte: elaboração própria (mapa de biogás), [35], [36].

Considerando a análise de [12] para o custo das tecnologias no cenário apresentado nesse trabalho, a entrada total do fluxo de biogás na instalação de

produção de calor. Os custos considerados neste trabalho foram apenas para o investimento nas usinas de purificação, não foram analisados os custos

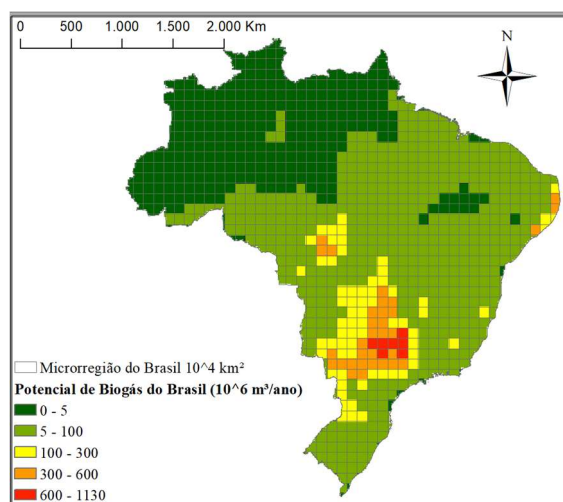


Figura 5. Potencial de biogás considerando o total de biogás a partir dos resíduos de animais, vinhaça e lodo de esgoto distribuído por microregiões de 10 mil km². Fonte: elaboração própria.

extração de metano é de 1280m³/h para o método de depuração com amina e 1345 m³/h para os outros métodos. Para calcular o custo de investimento para todos os métodos de purificação de biogás, foram utilizados dados sobre o investimento específico em função do fluxo de entrada de biogás em m³/h (figura7), com base nos dados [12]. Onde foi calculado

operacionais. De acordo com a **Figura 7**, os métodos com menores custos são a absorção física e a lavagem com água, as quais apresentam o mesmo valor para o investimento específico. O valor de investimento passa a ser menor a partir da vazão de 500 m³/h de biogás, comparado às outras tecnologias, apresentando um

valor de até 5820 reais por m³/h com uma vazão de 1400 m³/h de biogás, como apresentado pela **Figura 7**. Como as duas tecnologias mais baixas possuem o mesmo valor, uma das maneiras de decidir qual tecnologia utilizar é analisar a eficiência de purificação. A tecnologia com maior porcentagem de eficiência apresentada pela Tabela 4, foi a lavagem com água, com uma média de 97% de purificação, enquanto a absorção física apresentou uma média de 95,6%. Portanto, a tecnologia escolhida para este estudo foi a lavagem com água. É importante destacar também, que quanto maior o fluxo de biometano menor será o custo do investimento da tecnologia (Figura 7). O mapa resultado do potencial de biometano utilizando o método de lavagem com água é apresentado na Figura 8. Cujas maior produção de biometano a partir dos resíduos orgânicos considerado nesse trabalho, pode chegar até um volume de 1.100 milhões de m³/ano de biometano (Figura 8).

Tabela 5. CapEX e OpEX da média do potencial de biogás do Brasil a partir dos três resíduos considerados.

Biogás (10 ⁶ m ³ /ano)	Média biogás (m ³ /ano)	CapEx Total (R\$/Planta biogás)	OpEX total (R\$/ano)
0 - 5	2,50E+06	1,09E+07	7,62E+05
5 - 100	5,25E+07	1,06E+08	7,42E+06
100 - 300	2,00E+08	2,93E+08	2,05E+07
300 - 600	4,50E+08	5,45E+08	3,81E+07
600 - 1130	8,65E+08	8,99E+08	6,29E+07

Fonte: elaboração própria.

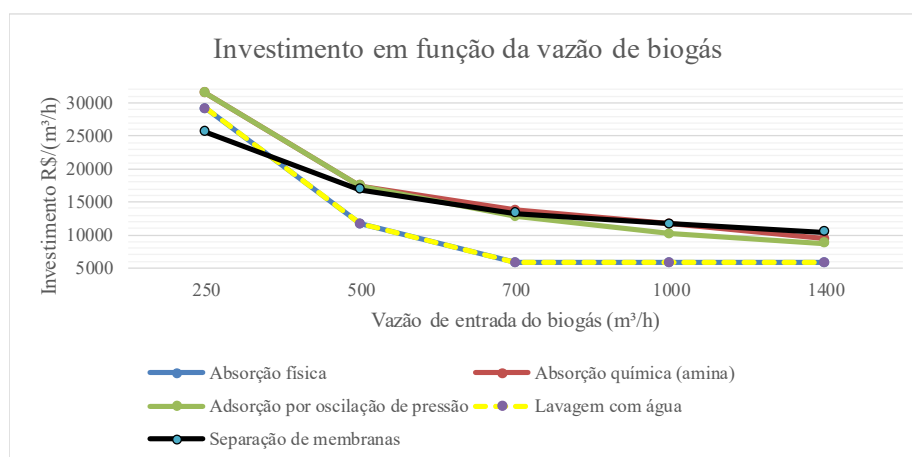


Figura 7. Investimento específico para diferentes métodos de refinamento de biogás em função da vazão de biogás em m³/h. Fonte: elaboração própria.

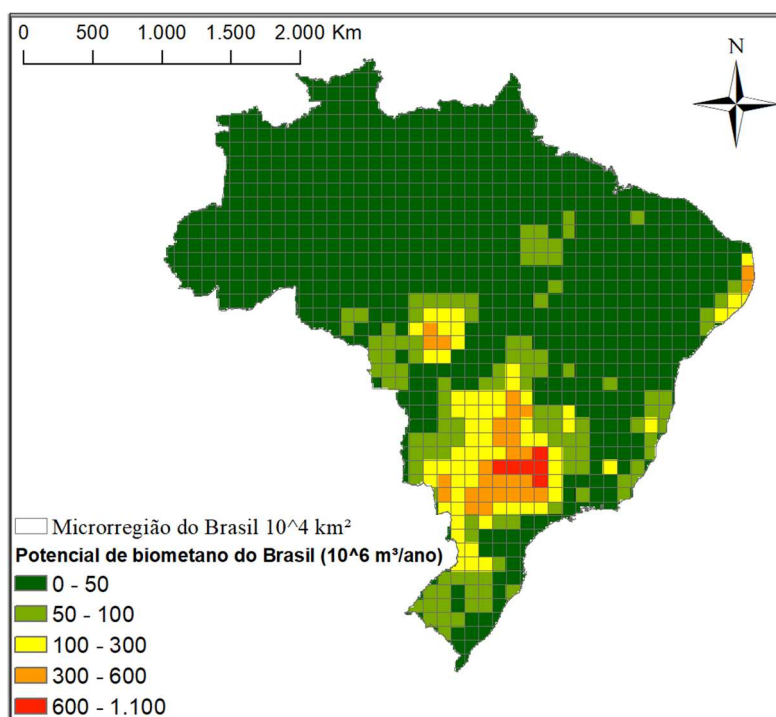


Figura 8: Total potencial de biometano do Brasil a partir de excretas de animais da pecuária, vinhaça e lodo de esgoto, considerando a tecnologia de lavagem com água com 97% de eficiência. Fonte: elaboração própria.

3.2. Conclusões

A aplicação do método GIS no estudo da logística e aplicação do biometano no Brasil, mostrou-se eficiente, uma vez que foi possível localizar as regiões com maiores potenciais de biogás, cerca de um total de até 1.130 milhões de m^3/ano , e consequentemente de biometano, com um total por volta de 1.100 milhões de m^3/ano , concentrados principalmente nas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil a partir dos diferentes resíduos orgânicos como excretas de animais (bois de corte, vacas de ordenha, suínos, e galinhas), vinhaça e esgoto, além de ser possível identificar problemáticas relacionadas ao baixo potencial de biometano no país, como no caso do esgoto. A codigestão com resíduos ligno-celulosicos não foi considerada, assim como o custo do transporte de excretas e biogás. Sendo assim, entende-se que é necessário melhorar as políticas públicas de saneamento, e assim poderá existir um estudo mais preciso do biogás a partir do lodo de esgoto e de excretas de animais. Ademais, foi possível localizar as plantas de biogás e etanol existentes no Brasil e a rede de gás natural, o que facilita a identificação das distâncias entre eles e auxilia na tomada de decisão da logística de transporte. De acordo com o critério utilizado nesse estudo, a injeção do biometano diretamente na rede de gás natural é possível quando considerado as regiões de elevada produção de resíduos próximas dos gasodutos de gás natural, como a região do nordeste e uma parte da região sudeste e centro-oeste. Este estudo mostrou que

o Brasil possui um elevado potencial de produção de biogás e biometano, além disso, provou a viabilidade da aplicação do método GIS para o estudo da logística de transporte.

4. Referências

- [1] M. Adelt, D. Wolf, and A. Vogel, "LCA of biomethane," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 646–650, 2011, doi: 10.1016/j.jngse.2011.07.003.
- [2] V. P. Garcilasso, A. D. N. F. Junior, M. M. dos Santos, and C. L. Joppert, *BIOGAS AND BIOMETHANE PRODUCTION AND USE*. 2022.
- [3] R. H. G. de Jesus, M. V. Barros, R. Salvador, J. T. de Souza, C. M. Piekarski, and A. C. de Francisco, "Forming clusters based on strategic partnerships and circular economy for biogas production: A GIS analysis for optimal location," *Biomass and Bioenergy*, vol. 150, no. December 2020, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106097.
- [4] P. Börjesson and M. Berglund, "Environmental systems analysis of biogas systems-Part II: The environmental impact of replacing various reference systems," *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 5, pp. 326–344, 2007, doi: 10.1016/j.biombioe.2007.01.004.
- [5] D. B. A. Wellinger, J.D. Murphy, *The biogas Handbook: Science, Production and*

- Applications*, Elsevier. 2013. [Online]. Available: https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=NFxEAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=KF4pWrK6a4&sig=2I8aQc4-BklkeyDgE94eZjPRI0Q&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true
- [6] A. Bonomi, O. Cavalett, M. P. da Cunha, and M. A. Lima, *Virtual Biorefinery*. 2016. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26045-7>
- [7] M. Penteado, "CENÁRIOS PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO PARANAENSE," 2022.
- [8] I. Angelidaki *et al.*, "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnol. Adv.*, vol. 36, no. 2, pp. 452–466, 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
- [9] epbr, "Produção de biometano pode chegar a 30 milhões de m³/dia no Brasil até 2030, projeta Abiogás," 2023. <https://epbr.com.br/producao-de-biometano-pode-chegar-a-30-milhoes-de-m3-dia-no-brasil-ate-2030-projeta-abiogas/#:~:text=Produção de biometano pode chegar,Brasil até 2030%2C projeta Abiogás>
- [10] F. Valenti, S. M. C. Porto, B. E. Dale, and W. Liao, "Spatial analysis of feedstock supply and logistics to establish regional biogas power generation: A case study in the region of Sicily," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 97, no. August, pp. 50–63, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.022.
- [11] P. Y. Hoo *et al.*, "Optimal Biomethane Injection into Natural Gas Grid - Biogas from Palm Oil Mill Effluent (POME) in Malaysia," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 562–569, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.357.
- [12] A. Paturska, M. Repele, and G. Bazbauers, "Economic Assessment of Biomethane Supply System based on Natural Gas Infrastructure," *Energy Procedia*, vol. 72, pp. 71–78, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.011.
- [13] R. O'Shea, D. M. Wall, I. Kilgallon, J. D. Browne, and J. D. Murphy, "Assessing the total theoretical, and financially viable, resource of biomethane for injection to a natural gas network in a region," *Appl. Energy*, vol. 188, no. 2017, pp. 237–256, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.11.121.
- [14] A. Singlitico *et al.*, "Can thermal energy recovery from digestate make renewable gas from household waste more cost effective? A case study for the Republic of Ireland," *J. Clean. Prod.*, vol. 261, no. 2020, p. 121198, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121198.
- [15] D. Ó Céileachair *et al.*, "Logistical considerations and challenges in deploying virtual biomethane pipelines to serve on-farm biogas plants," *J. Clean. Prod.*, vol. 407, no. April, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137075.
- [16] A. Lovrak, T. Pukšec, M. Grozdek, and N. Duić, "An integrated Geographical Information System (GIS) approach for assessing seasonal variation and spatial distribution of biogas potential from industrial residues and by-products," *Energy*, vol. 239, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122016.
- [17] S. Rahmouni, N. Settou, B. Negrou, and A. Gouareh, "GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 2128–2143, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.156.
- [18] SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática, "Censo agropecuário - Pecuária de corte nos estabelecimentos agropecuários, segundo indicadores da agricultura familiar e não familiar -,," 2006. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1262>
- [19] SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática, "Censo agropecuário - Vacas ordenhadas," 2022. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/94>
- [20] SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática, "Censo agropecuário - Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho," 2022. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>
- [21] P. A. V. de Oliveira, "Manual de manejo e utilização dos dejetos suínos," *Doc. / Embrapa*, no. 27, p. 188, 1993.
- [22] A. P. Bernal, F. S. dos S., Ivan, P. Moni, S., Ana, M. B., Regina, and M. R., and Eruin, "Vínasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO₂ emissions," *J. Clean. Prod.*, vol. 151, pp. 260–271, 2017.
- [23] L. T. Fuess and Marcelo, Z., "Economics of anaerobic digestion for processing sugarcane vinasse: Applying sensitivity analysis to increase process profitability in diversified biogas applications," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 115, pp. 27–37, 2018.
- [24] A. Elia Neto, "Estado da Arte da Vinhaça," *Unica*, pp. 1–31, 2016.
- [25] Parsaee, "A review of biogas production from sugarcane vinasse," *Biomass and Bioenergy*, vol. 122, no. May 2018, pp. 117–125, 2019.
- [26] A. N. Vaz and A. P. Mattos, "ENERGY AND CARBON CREDITS GENERATION FROM THE PRODUCTION OF BIOGAS FROM THE ETHANOL STILLAGE OF CORN AND SUGAR CANE," *encit*, 2020. Belém, 2020.
- [27] P. GAMAS, "Arranjos técnicos e comerciais

- para inserção de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos / efluentes líquidos dentro de um modelo com biodigestores,” 2015.
- [28] MapBiomass, “MapBiomass Brasil.” <https://brasil.mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura/>
 - [29] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, “Malha municipal,” 2022. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html%0A>
 - [30] ANA- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, “Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas.” <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1d8cea87-3d7b-49ff-86b8-966d96c9eb01>
 - [31] F. Ardolino, G. F. Cardamone, F. Parrillo, and U. Arena, “Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 139, p. 110588, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110588.
 - [32] M. A. Qyyum *et al.*, “Biogas to liquefied biomethane: Assessment of 3P’s—Production, processing, and prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 119, no. November 2019, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109561.
 - [33] I. Angelidaki *et al.*, *Biogas upgrading: Current and emerging technologies*, 2nd ed. Elsevier Inc., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-816856-1.00033-6.
 - [34] Agência Nacional de Águas, “Atlas Esgotos,” *Online*, 2019. <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>
 - [35] Atlas, “Atlas Esgotos,” *Online*. 2019.
 - [36] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, “Atlas de Saneamento,” 2017. https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_saneamento/#/home