

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS – UFPEL
Centro de Engenharias
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Mestrado em Ciências Ambientais



**LEVANTAMENTO SOBRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS
NO BRASIL ENTRE OS ANOS DE 2012 E 2022 A PARTIR DE PESQUISA
BIBLIOMÉTRICA E ESTIMATIVA DE POTENCIAL ENERGÉTICO DO SETOR NO
RIO GRANDE DO SUL**

Carolina da Silva Silva

Pelotas, 2023

Carolina da Silva Silva

**LEVANTAMENTO SOBRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS
NO BRASIL ENTRE OS ANOS DE 2012 E 2022 A PARTIR DE PESQUISA
BIBLIOMÉTRICA E ESTIMATIVA DE POTENCIAL ENERGÉTICO DO SETOR NO
RIO GRANDE DO SUL**

Projeto de Dissertação ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas – UFPEL, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Willian César Nadaleti

Pelotas, 2023

CAROLINA DA SILVA SILVA

**LEVANTAMENTO SOBRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS
NO BRASIL ENTRE OS ANOS DE 2012 E 2022 A PARTIR DE PESQUISA
BIBLIOMÉTRICA E ESTIMATIVA DE POTENCIAL ENERGÉTICO DO SETOR NO
RIO GRANDE DO SUL**

Projeto de Dissertação/Dissertação Aprovada como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Willian Cézar Nadaleti (Orientador)

Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos pela Universidade Estadual de Campinas

Prof^a. Dr^a. Diuliana Leandro

Doutora em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná

FICHA CATALOGRÁFICA

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas Catalogação na Publicação

S586l Silva, Carolina da Silva

Levantamento da produção de biogás em aterros sanitários no estado do Rio Grande do Sul entre os anos 2012 e 2022 e análise da economia circular no setor / Carolina da Silva Silva ; Willian César Nadaleti, orientador. — Pelotas, 2023.

78 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Bioenergia. 3. Biometano.
4. Economia circular. I. Nadaleti, Willian César, orient. II. Título.

CDD : 363.7

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figas Machado CRB: 10/1612

**Dedico este trabalho a minha
mãe, meu marido e filha.**

Na vida, não há nada a temer, mas a entender.

Marie Curie

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família que foi minha base em todos os momentos desse processo. Em especial, agradeço meu marido, Junior, que foi meu suporte, me apoiando em tudo, sempre acreditando e incentivando para que eu pudesse estar forte para tomar as melhores decisões.

Agradeço, acima de tudo, as grandes mulheres que fazem parte da minha vida: minha mãe, mulher forte e batalhadora que sempre me incentivou a correr atrás dos meus sonhos, minhas irmãs, mulheres fortes e emponderadas, e por fim, minha filha, que é minha coragem para nunca desistir e sempre buscar ser um bom exemplo e uma inspiração, cada uma de vocês é minha força e minha motivação diária.

Ao meu orientador, professor Willian, por ter acreditado em mim quando nem eu mesma acreditava, a banca examinadora, que gentilmente se dispôs a participar deste trabalho, e a todos os colegas e professores do laboratório 201, que foram parte importante dessa jornada.

Agradeço a Liciane, minha colega desde a graduação, que me ajudou e incentivou a entrar no programa, e em especial, a Maele, minha querida colega do mestrado, por toda a sua ajuda e incentivo para realização deste trabalho.

A todos os professores do PPGCAmb, por seus ensinamentos, que são a base para que todos os alunos possam obter êxito nesta jornada acadêmica, tão árdua e desafiadora. Também agradeço a UFPEL, universidade pública, gratuita e de qualidade, que acredita e dá suporte para seus alunos realizarem seus sonhos através da educação.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigada!

RESUMO

SILVA, Carolina da Silva. **Levantamento sobre Produção de Biogás em Aterros Sanitários no Brasil entre os anos de 2012 e 2022 a partir de Pesquisa Bibliométrica e Estimativa de Potencial Energético do setor no Rio Grande do Sul.** 2023. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas 2023.

Os resíduos sólidos urbanos, são hoje um dos principais problemas a serem enfrentados, principalmente nos grandes centros urbanos. A economia circular consiste num ciclo de desenvolvimento positivo e contínuo que preserva e valoriza o capital natural, otimizando a produção de recursos e minimizando os riscos, através da gestão de inventários finitos e fluxos renováveis. A maior parte dos aterros sanitários tem sido utilizada para destinação final de resíduos sólidos urbanos, porém, estes tem sido cada vez fonte de geração de energia, uma vez que os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos contribuem de maneira significativa para a emissão de gás metano (CH_4). O objetivo deste trabalho foi analisar a partir de revisão bibliométrica, utilizando mapas mentais gerados pelo software *VOSviewer*, os dados utilizados foram coletados da base de dados da *Scopus*, sobre produção de biogás em aterros sanitários no Brasil durante a última década, além disso, foi estimado o potencial de produção de energia elétrica, bem como, a venda de créditos de carbono, a partir da geração de biogás dos RSU de aterros sanitários da região, visando impulsionar a transição energética e a economia circular no setor. Os potenciais energéticos foram calculados a partir de dados do SNIS, das cinco cidades mais populosas do estado do Rio Grande do Sul, das quais, Porto Alegre apresentou o maior potencial de geração de metano, igual a 22.700 t CH_4 /ano, representando 57% da geração dos municípios, seguido por Caxias do Sul com a geração de 5.230 t CH_4 /ano, representando 13% da geração total dos municípios. Canoas apresentou o terceiro maior potencial de 4.700 t CH_4 /ano, representando 12% da produção estadual, seguido de Pelotas e Gravataí com a geração de 3.830 e 3.500 t CH_4 /ano, respectivamente. Quanto a geração de energia elétrica, o estado apresentou um potencial t de 5,03 E+08 kWh/ano, enquanto o potencial dos municípios em conjunto foi estimado em 1,49E+08 kWh/ano, correspondendo a 30% do potencial total do RS. Por fim, o valor estimado que poderia ser obtido das vendas dos créditos de carbono foi de 53,7 milhões de euros ao ano, em média 4,48 milhões ao mês para Porto Alegre, sendo equivalente a 292,66 milhões de reais ao ano. O município de Caxias do Sul poderia receber aproximadamente 68,67 milhões de reais ao ano (12,6 mi EUR/ano), seguido de Canoas, arrecadando cerca de 11,1 mi EUR/ano (60,5 mi R\$/ano), enquanto os municípios de Pelotas e Gravataí poderiam obter cerca de 9,05 e 8,27 milhões de euros ao ano, respectivamente.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Bioenergia, Biometano; Economia Circular.

ABSTRACT

SILVA, Carolina da Silva. **Survey of biogas production in landfills in the state of Rio Grande do Sul between 2012 and 2022 and analysis of the circular economy in the sector.** 2023. 76f. Dissertation (Master in Environmental Sciences) – Graduate Program in Environmental Sciences, Engineering Center, Federal University of Pelotas, Pelotas 2023.

Urban solid waste is today one of the main problems to be faced, especially in large urban centers. The circular economy consists of a positive and continuous development cycle that preserves and values natural capital, optimizing the production of resources and minimizing risks, through the management of finite inventories and renewable flows. Most sanitary landfills have been used for the final disposal of urban solid waste, but these have increasingly been a source of energy generation since urban solid waste sanitary landfills contribute significantly to the emission of methane gas (CH₄). The objective of this work was to analyze, from a bibliometric review, using mental maps generated by the VOSviewer software, the data used were collected from the Scopus database, on biogas production in landfills in Brazil during the last decade, in addition, it was estimating the potential for production of electricity, as well as the sale of carbon credits, from the generation of biogas from MSW from landfills in the region, aiming to boost the energy transition and circular economy in the sector. The energy potentials were calculated from SNIS data, from the five most populous cities in the state of Rio Grande do Sul, of which Porto Alegre had the highest methane generation potential, equal to 22,700 tCH₄/year, representing 57% of the generation of the municipalities, followed by Caxias do Sul with the generation of 5,230 tCH₄/year, representing 13% of the total generation of the municipalities. Canoas had the third highest potential of 4,700 tCH₄/year, representing 12% of state production, followed by Pelotas and Gravataí with a generation of 3,830 and 3,500 tCH₄/year, respectively. As for electricity generation, the state had a potential of 5.03 E+08 kWh/year, while the potential of the municipalities together was estimated at 1.49E+08 kWh/year, corresponding to 30% of the total potential from RS. Finally, the estimated value that could be obtained from the sales of carbon credits was 53.7 million euros per year, approximately 4.48 million euros per month for Porto Alegre, equivalent to 292.66 million Real per year. The municipality of Caxias do Sul could receive approximately BRL 68.67 million per year (EUR 12.6 million/year), followed by Canoas, collecting around EUR 11.1 million/year (R\$60.5 million/year), while the municipalities of Pelotas and Gravataí could obtain around 9.05 and 8.27 million euros per year, respectively.

Keywords: : Landfill; bibliometric review; energy potential; bioenergy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Comparação da participação de renováveis na matriz elétrica.....	17
Figura 2- Quadro de classificação dos resíduos sólidos de acordo com sua periculosidade.....	18
Figura 3- Classificação dos resíduos sólidos urbanos de acordo com sua origem.....	19
Figura 4- Coleta Seletiva.....	21
Figura 5- Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	22
Figura 6- Total em (t/ano e %) de disposição adequada x disposição inadequada no Brasil.....	24
Figura 7- Disposição final de RSU nas regiões, por tipo de destinação (t/ano).....	27
Figura 8- Interações físicas, químicas e biológicas em aterro RSU.....	27
Figura 9- Processo simplificado de digestão anaeróbia.....	31
Figura 10- Modelos Econômicos Linear versus Circular.....	34
Figura 11– Etapas de desenvolvimento metodológico.....	35
Figura 12- Mapa de localização da área de estudo.....	37
Figura 13- Cocitações.....	44
Figura 14- Rede de cocitações em periódicos com pesquisas relacionadas a produção de biogás a partir de RSU de aterros sanitários, com base nos dados da <i>Scopus</i>	45
Figura 15- Mapa de co-ocorrência de palavras-chave entre os anos de 2012 à 2022.....	47
Figura 16- Rede de interações entre países e publicações com o tema sobre bioenergia proveniente de aterros sanitários.....	49
Figura 17- Potencial de geração de metano nos municípios do RS.....	52
Figura 18- Proporção de geração dos resíduos.....	53
Figura 19 - Potencial elétrico (Ee) dos municípios em kWh/ano.....	57
Figura 20- Potencial energético do RS, contabilizando toda a geração de resíduos do estado.....	57
Figura 21- Modelos econômicos, circular e linear.....	59
Figura 22- Modelo de EC no aterro sanitário.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados sobre a disposição de resíduos no Brasil.....	23
Tabela 2- Caracterização dos municípios.....	39
Tabela 3- Teor de Carbono Orgânico Degradável nos resíduos	40
Tabela 4- Análise de citações e maior incidência de publicações sobre a produção de biogás a partir de RSU de aterros sanitários.....	44
Tabela 5- Geração de biogás por município	53
Tabela 6- Geração de créditos de carbono	57

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
ONU	Organização das Nações Unidas
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
EC	Economia Circular
COD	Carbono Orgânico Degradável
FCM	Fator de Correção de Metano
OX	Fator de Oxidação
NO	Óxido de Nitrogênio
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂	Hidrogênio
CH ₄	Metano
MME	Ministério de Minas e Energia
OIE	Oferta de Minas e Energia
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Pressão
t	Tonelada
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
T	Temperatura
L	Litro
Kg	Quilograma
%	Porcentagem
g	Gramma

SUMÁRIO

1 Introdução.....	15
2 Objetivos	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivo Específico.....	17
2.3 Hipóteses.....	17
3 Revisão da Literatura.....	18
3.1 Matriz Energética.....	18
3.1.1 Resíduos Urbanos.....	20
3.1.2 Aterro Sanitário.....	26
3.1.3 Biogás.....	29
3.1.4 Metano.....	30
3.1.5 Digestão Anaeróbica.....	31
3.2 Economia Circular.....	33
4 Metodologia	36
4.1 Análise Bibliométrica.....	37
4.2 Caracterização da Área de Estudo.....	38
4.3 Estimativa de Geração de Metano no RSU.....	41
4.4 Potencial Elétrico.....	44
5 Resultado da Discussão.....	44
5.1 Revisão Bibliométrica.....	46
5.1.1 Análise de rede de citações em periódicos.....	46
5.2 Geração de Biogás e Metano em Aterros Sanitários.....	54
5.3 Geração de Energia Elétrica	58
5.4 Créditos de Carbono.....	60
5.2 Análise Integradora.....	61
6 Conclusão.....	65
Referências.....	66

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos é uma crescente no mundo todo, tendo em vista o aumento populacional e o consumo que aumenta a cada dia. Sendo o Brasil um país de proporções continentais com mais de 200 milhões de habitantes (IBGE, 2023), a necessidade de pensar em maneiras de descartar e acondicionar os resíduos produzidos, de maneira que impactem menos o meio ambiente, passou a ser discutida com mais frequência ao longo das últimas décadas, mas foi em 2010 com a Política Nacional do Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) que passaram a vigorar regras para este descarte, e com isso estabeleceu-se prazos para que municípios se adequassem ao descarte destes RSU em aterros sanitários, que são locais preparados para destinar RSU.

Os aterros sanitários tem sido utilizados, em sua maioria para destinação final de resíduos sólidos urbanos, porém, atualmente, estes são cada vez mais utilizados como fonte de geração de energia, uma vez que os aterros sanitários de RSU contribuem de maneira significativa para a emissão de gás metano (CH_4). Por esta razão o Protocolo de Kyoto regulamentou a possibilidade de utilização de mecanismos para a diminuição de gases de efeito estufa (REGATTIERI, 2009).

Além disso, os combustíveis fósseis contribuem atualmente em cerca de 85% com a geração mundial de energia, porém, além de serem os principais causadores de emissões atmosféricas, suas reservas estão se esgotando rapidamente devido ao seu grande consumo (BEN, 2021).

A demanda cada vez maior de combustíveis fósseis, os problemas ambientais comprovadamente relacionados ao uso destes combustíveis e que são grandes causadores do aquecimento global, além das necessidades de adequação às legislações ambientais que tendem a se tornar cada vez mais rigorosas, estimulam o desenvolvimento de novos recursos energéticos (SILVESTRE, FERNÁNDEZ, BONMATÍ, 2015). Diante deste contexto, pesquisas e investimentos por novas matrizes energéticas, menos agressivas ao meio ambiente se fazem imprescindíveis.

Segundo Gênero et al. (2013), além do alto valor energético e do baixo impacto ambiental, o fato do hidrogênio poder ser armazenado e consumido quando necessário, além de ser convertido na fonte primária original (eletricidade, por exemplo), ou em outra forma de energia, faz das energias renováveis, um excelente

vetor energético, servindo de elo de ligação e de conversão entre diferentes fontes e formas de energia.

No que diz respeito à energia elétrica, a matriz brasileira tem origem predominantemente renovável, proveniente, principalmente, de hidrelétricas, uma demanda que só tende a crescer, em decorrência do aumento populacional e industrial. O Brasil também é uma grande potência para o uso de resíduos de biomassa para gerar energia, a chamada bioenergia, porém, apesar do alto potencial energético, a gestão ineficiente desses recursos, acaba por desperdiçar esse potencial (BARBOSA, 2018).

Do exposto, é importante que cada vez mais estudos abordem esta temática, buscando soluções não apenas para minimizar os problemas decorrentes da má gestão dos RSU, com os impactos que decorrem dela, como também, elaborando alternativas para diminuir a produção destes resíduos, seja realocando-os novamente no processo produtivo ou reutilizando-os como substrato para produção de outros bens e serviços, como por exemplo, a bioenergia.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar através de revisão bibliométrica, utilizando o software *VOSviewer*, a produção científica sobre a geração de biogás nos aterros sanitários no Brasil durante a última década, bem como, fazer o levantamento do potencial de produção de energia elétrica utilizando biogás, visando impulsionar a transição energética e a economia circular no setor.

2.Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo geral analisar, através de revisão bibliométrica e cálculo de potencial, a produção de biogás nos aterros sanitários do Rio Grande do Sul na última década, fazendo um comparativo das metodologias utilizadas para o aproveitamento de resíduos sólidos e seu potencial energético, visando impulsionar a economia circular no setor.

2.2 Objetivos Específicos

- 1 Realizar levantamento sobre a utilização de RSU provenientes de aterros sanitários no Brasil para a produção de biogás, entre os anos de 2012 a 2022, a partir de análise bibliométrica;
- 2 Estimar o potencial energético e elétrico em aterros sanitários do RS, por meio de equações da literatura científica;
- 3 Estimar a geração de créditos de carbono através da geração de metano proveniente dos RSU gerados nos principais municípios e no estado do RS.

2.3 Hipóteses

- A partir da pesquisa bibliométrica podemos dizer que a geração de biogás aumentou nos aterros sanitários do Rio Grande do Sul em relação à última década;
- O Rio Grande do Sul possui potencial para a produção de bioenergia a partir dos resíduos provenientes de aterros sanitários, especialmente o metano, disponível de forma substancial a partir dos resíduos sólidos urbanos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Os principais tópicos abordados nesta seção são a matriz energética nacional, o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, como ocorre a implantação e operação dos aterros sanitários, bem como os principais gases provenientes destes resíduos.

3.1 Matriz Energética

Os combustíveis fósseis geram inúmeros problemas, ao meio ambiente desde a sua extração, até sua emissão, o Dióxido de Carbono (CO_2), Óxido de Nitrogênio (NO) e o Dióxido de Enxofre (SO_2) originários já nas usinas dos combustíveis, são consequências dos impactos negativos causados pelo aquecimento global ao meio ambiente, como por exemplo: as emissões de GEE (DREIDY; MOKHLIS; MEKHILEF, 2017).

A maior parte da energia utilizada no planeta é de origem não renovável e diante disso, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas, para que novas alternativas e fontes de energia possam surgir e diminuir os impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis, para além disso, há também a questão econômica, tendo em vista às grandes variações no preço do petróleo (SANTOS et al., 2012).

As mudanças climáticas que são decorrentes das emissões antropogênicas, despertaram preocupação mundial, em decorrência desta preocupação, diversos países passaram a direcionar suas políticas energéticas capazes de incentivar, ou mesmo obrigar, o uso de energia renováveis por parte das concessionárias de energia elétrica, com a possibilidade de subsídios públicos para a instalação de usinas renováveis (ACEMOGLU; KAKHBOD; OZDAGLAR, 2017; WANGA et al., 2017).

O desenvolvimento e utilização de biocombustíveis para a geração de bioenergia, que se caracteriza como energia derivada da biomassa gerada a partir de combustível sólido, líquido e gasoso, utilizado de diferentes formas, permite a redução de GEE quando utilizado para substituir as energias fósseis (SANTOS; TURNES; CONCEIÇÃO, 2012; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018 CREUTZIG et al., 2015.).

Dados do relatório sobre a oferta energética em 2020 também constataram um aumento da produção de energias renováveis na matriz energética nacional, que corresponde a 48,4% contra 12,1% da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e 14,9% da média mundial (MME, 2021).

Enquanto o restante do mundo ainda é extremamente dependente das fontes de combustíveis fósseis, o Brasil utiliza, principalmente, as fontes renováveis, como observado na Figura 1:

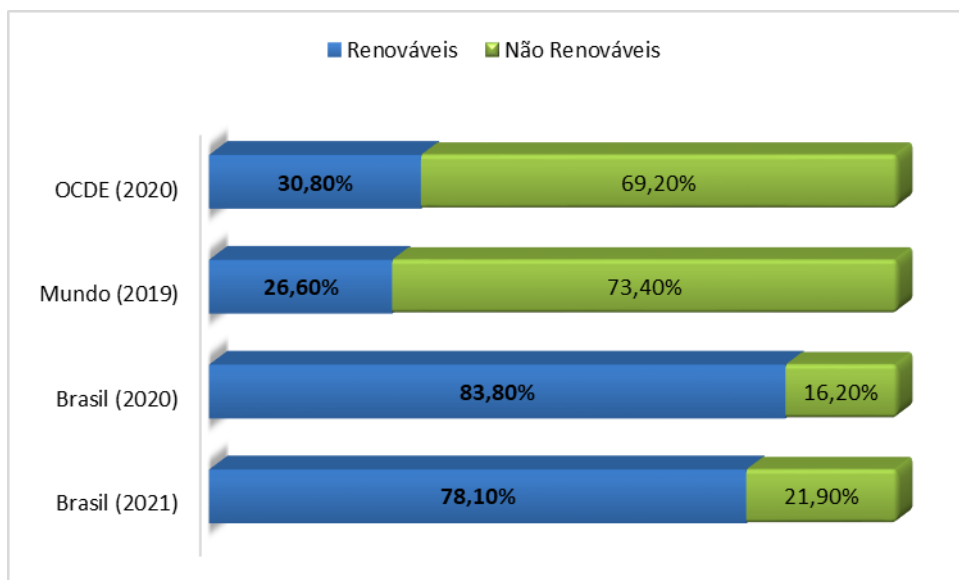


Figura 1- Comparação da participação de renováveis na matriz elétrica.
Fonte: Adaptada de EPE (2022, p.35).

A utilização de fontes renováveis no Brasil, teve um recuo no ano de 2021, devido a diminuição de participação das hidráulicas neste período, que se deve as secas, e para compensar a demanda foram utilizados o gás natural e as termoeletricas (BEM, 2022).

A Bioenergia é uma energia renovável obtida a partir das biomassas, e possui como pontos positivos a redução das emissões gases de efeito estufa durante a produção de energia e o gerenciamento de resíduos (JESUS et al., 2021). Esta é uma das razões pelas quais a transição energética se faz tão importante, a cada dia que passa. A nova transição energética terá como pilar a produção de eletricidade renovável, produção de biocombustíveis, o gás natural e a eficiência energética, e para que isso ocorra será necessário que o sistema energético mundial passe a utilizar de maneira majoritária, fontes renováveis de energia, produzindo-as, instalando-as e integrando aos setores onde haja demanda (BRASIL, 2020).

3.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Resíduos sólidos são definidos, de acordo com a ABNT NBR 1004:200, como qualquer material no estado sólido e semissólido resultante de variadas atividades, como: agrícolas; comerciais; domésticas; hospitalares; industriais e de serviços de varrição, incluindo lodos oriundos de sistemas de tratamento de água; equipamentos; instalações de controle de poluição e determinados líquidos inviáveis para o lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água (OLIVEIRA e JUNIOR, 2016).

A Norma Brasileira (NBR 10.004) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), também classifica os resíduos de acordo com sua periculosidade em duas classes: Perigosos (Classe I) e Não Perigosos (Classe II), sendo os resíduos Classe II subdivididos em Classe II A (não inertes) e Classe II B (Inertes).

A Figura 2 apresenta a classificação dos resíduos sólidos de acordo com o seu grau de periculosidade:

Resíduos Sólidos		
Perigosos	Não perigosos (Classe II)	
Perigosos (Classe I)	Não inertes (Classe II A)	Inertes (Classe II B)
Apresentam periculosidade por possuírem: Inflamabilidade, corrosividade, toxicidade e patogenicidade.	São os que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou classe II B. Podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade; combustibilidade e solubilidade em água.	Resíduos que, quando amostrados e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água (cor, turbidez, dureza e sabor).

Figura 2- Quadro de classificação dos resíduos sólidos de acordo com sua periculosidade.

Fonte: Adaptado de ABNT (2004).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), os resíduos sólidos urbanos, são definidos como todo o material de origem pública,

como resíduos de varrição, resíduos de podas e resíduos de limpeza pública ou de origem domiciliar, como restos de alimentos, embalagens, vidros e outros, conforme mostrado na Figura 2.

Ainda de acordo com o SNIS, após a coleta pública estes resíduos devem ter uma destinação final correta e adequada. Quando o resíduo não for passível de aproveitamento, este é considerado rejeito e deve ser disposto em aterros sanitários (SNIS, 2020).

De acordo com a Figura 3: Classificação dos resíduos sólidos urbanos de acordo com sua origem.

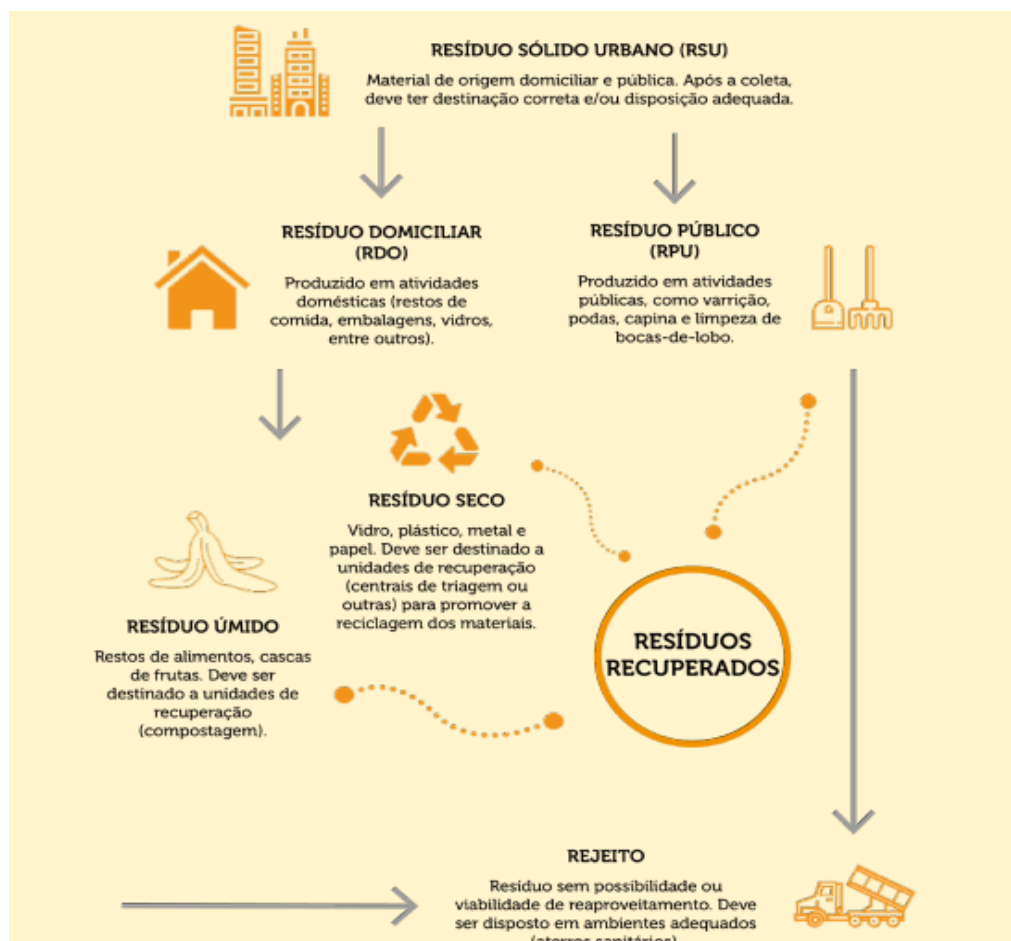


Figura 3- Classificação dos resíduos sólidos urbanos de acordo com sua origem.

Fonte: SNIS (2020).

No ano de 2010, 3.152 municípios registravam alguma iniciativa de coleta seletiva, enquanto na década seguinte esse número aumentou para 4.070 municípios, porém, em muitos municípios as atividades de coleta seletiva ainda não abrangem a totalidade de sua área urbana (ABRELP, 2020).

Estes dados estão representados na Figura 4:

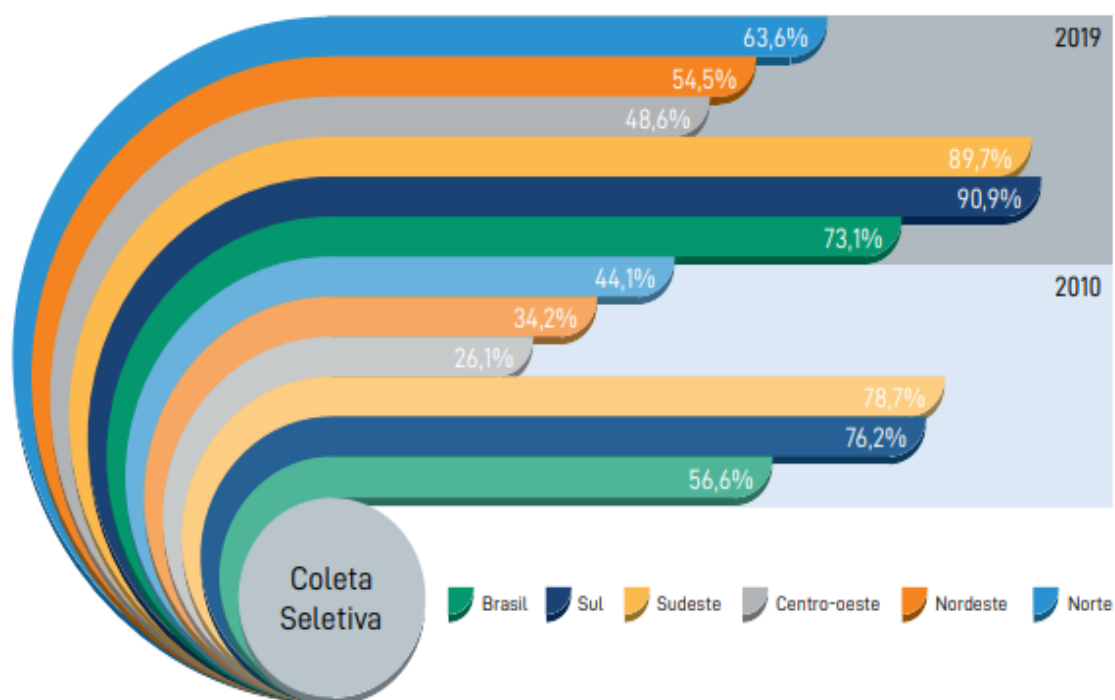


Figura 4.- Coleta Seletiva.

Fonte: ABRELPE (2020).

A concentração de pessoas em áreas urbanas, aumenta a cada ano, e produz cada vez mais resíduos, o manejo e destinação inadequados desses resíduos gera uma série de problemas socioambientais, problemas econômicos e de saúde pública. É notória as alterações na qualidade de vida e saúde da população, a falta de infraestrutura bem como o de serviços na área de saneamento básico faz-se necessário buscar uma solução para a destinação final destes resíduos. Esse tem sido um grande desafio, tendo em vista, que a má gestão destes resíduos, geram impactos diretos no solo, ar e nos recursos hídricos, podendo causar contaminação (OLIVEIRA e JUNIOR, 2016; FIRMO, 2013).

Na Figura 5, a seguir demonstra a composição gravimétrica dos RSU descartados no Brasil, segundo dados da ABRELPE (2020):

GRÁFICO 26. GRAVIMETRIA DOS RSU NO BRASIL

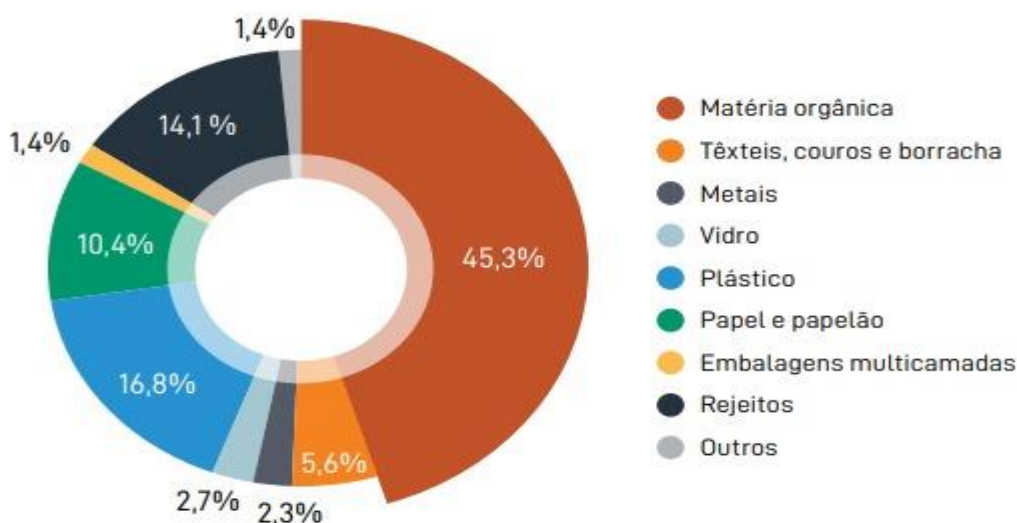


Figura 5- Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Fonte: ABRELPE (2020).

A gravimetria do RSU do Brasil, mostra que a grande maioria dos resíduos sólidos urbanos gerados são resíduos orgânicos (45,3%), seguido de resíduos plásticos (16,8%) e metais (14,1%). A matéria orgânica inclui os restos de resíduos alimentares, resíduos de frutas, verduras, resíduos verdes e madeiras. As Embalagens Multicamadas são constituídas por mais de um tipo de material. A composição de Têxteis, Couros e Borrachas inclui retalhos no geral, roupas, calçados, mochila, tênis, retalhos de couro e borracha. Os rejeitos não contemplam os resíduos sanitários, outros materiais que não foram identificados, e recicláveis contaminados que não permitem segregação. A categoria “OUTROS” contempla os resíduos identificados, porém que não deveriam estar no fluxo de RSU como RSS (Resíduos de Serviços de Saúde), eletroeletrônicos, baterias e pilhas, resíduos perigosos, RCD (Resíduos de Construção e Demolição), pneus, óleos e graxas, embalagens de agrotóxico entre outros (ABRELPE, 2020). Com o estudo da composição gravimétrica de resíduos é possível traçar um perfil consumista de uma determinada população.

A Lei nº 12.305/2010 que trata da Política Nacional dos Resíduos Sólidos Urbanos (PNRS), estabelece diretrizes gerais aplicáveis a todos os tipos de resíduos sólidos, salvo os radioativos, a lei também cria novo modelo de gestão dos resíduos com oportunidades de desenvolvimentos econômico e social, além de determinar o

encerramento dos lixões em até quatro anos e de fixar dois anos para a conclusão dos Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, a partir da sanção da Lei.

Esta lei apresenta uma série de conceitos inovadores, como por exemplo: o de resíduo sólido como material que pode ser reutilizado e reaproveitado, ou como o rejeito como insumo inservível como matéria-prima em uma cadeia produtiva. Para tanto, a PNRS definiu que na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos, deve-se adotar a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos é um dos grandes desafios para governantes de pequenas e grandes cidades dos países em desenvolvimento como o Brasil, por exemplo, uma vez que a geração de resíduos tem aumentado e os custos de gerenciamento são elevados frente ao orçamento disponível dos municípios (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018). A PNRS possui princípios e diretrizes, que são importantes, e que viabilizam o avanço que o Brasil tanto necessita diante dos problemas econômicos, sociais e ambientais, que são resultado do gerenciamento incorreto dos resíduos sólidos. Propõe, portanto, atitudes de consumo sustentável que favorecem o aumento da reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos que possuem valor econômico, bem como a destinação final ambientalmente correta dos rejeitos, que não podem ser reciclados ou reutilizados (BRASIL, 2010).

A destinação final dos resíduos é imprescindível para manter um equilíbrio ambiental, pois, o descarte inadequado dos resíduos pode ocasionar diversos impactos negativos ao meio ambiente, bem como comprometer a qualidade de vida das pessoas, devido ao aumento da emissão de gases poluentes, contaminação do solo e poluição das águas superficiais e subterrâneas. Logo, estes problemas socioambientais são de responsabilidade da população como um todo e não somente dos governos (OLIVEIRA; MEIRA, 2017). Dados da ABRELP (2020) detalham como até o ano de 2020 vem sendo feita a disposição final dos RSU no Brasil, a partir dos dados levantados sobre cada região do país, conforme Tabela 1:

Tabela 1. Dados sobre a disposição de resíduos no Brasil

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	ton/ano	%	ton/ano	%
Norte	1.773.927	35,6	3.209.013	64,4
Nordeste	6.016.948	36,3	10.558.666	63,7
Centro-oeste	2.456.849	42,5	3.323.972	57,5
Sudeste	29.542.830	73,4	10.706.257	26,6
Sul	6.011.894	70,8	2.479.482	29,2
Brasil	45.802.448	60,2	30.277.390	39,8

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

A Figura 6 demonstra os valores totais de disposição adequada e inadequada no Brasil, já com o total de dados levantados em cada região do país, ABRELPE (2020):

GRÁFICO 5. DISPOSIÇÃO FINAL ADEQUADA X INADEQUADA DE RSU NO BRASIL (T/ANO E %)

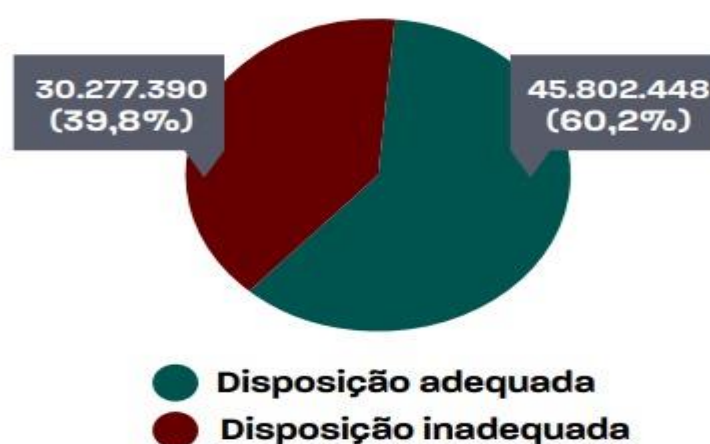


Figura 6- Total em (t/ano e %) de disposição adequada x disposição inadequada no Brasil.

Fonte: ABRELPE (2020).

De acordo com a Figura 6, ainda quase 40% dos resíduos sólidos urbanos gerados no país, são dispostos de maneira incorreta, o que pode causar diversos impactos negativos ao meio ambiente. A PNRS, informa em seu art. 3º inciso VII, que processos como a digestão anaeróbia e a compostagem são formas de gerenciamento e destinação correta para os resíduos orgânicos. Além destes, pode-se citar também a vermicompostagem, sendo uma vertente da compostagem que trata os resíduos com a colaboração de oligoquetas (BRASIL, 2010; COTTA et al., 2015).

O processo de digestão anaeróbia pode ser utilizado como tratamento de resíduos sólidos orgânicos e urbanos, pois, apresenta inúmeros benefícios ambientais e de saúde pública, tais como (PHAM et al., 2015):

- Redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE);
- Redução do volume de resíduos encaminhados para aterro;
- Redução de odores desagradáveis;
- Recuperação de nutrientes; e
- Aproveitamento energético.

3.1.2 Aterro Sanitário

É de responsabilidade da Prefeitura a coleta de todo o resíduo gerado bem como a escolha do modelo de gerenciamento dos resíduos sólidos, para que dê um destino final adequado, buscando maneiras para segregar tratar e destinar os resíduos do município, tendo em vista que essas maneiras só darão resultados positivos se atenderem os requisitos econômicos e ambientais, realizar campanhas e implantar programas voltados à conscientização da população com objetivo de manter a cidade limpa e incentivar a diminuição da geração de resíduos, são uma etapa importante a ser desempenhada (CEMPRE, 2010), outra etapa é sobre o cuidado com o descarte destes resíduos, a disposição final dos RSU, que deve ser feita em Aterros Sanitários.

Trata-se de um método de disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos, que se baseia em técnicas sanitárias de impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária das células em operação, e tratamento de gases e chorume gerados.

De acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), aterro sanitário é definido como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, NBR 8419, 1992, p.1).

Observar os aspectos geológicos e hidrogeológicos do local onde o aterro está construído é muito importante para garantir a estanqueidade e evitar a dispersão de contaminantes no ambiente, porém sempre há o risco de ocorrer infiltração de chorume para o solo e as águas superficiais. Por esta razão, é necessário à realização

de estudos e monitoramento das águas e do solo na área de influência dos aterros, assim como o estabelecimento de modelos matemáticos que possam prever o comportamento geoquímico e a dispersão de contaminantes associados aos resíduos urbanos, para o caso de vazamentos de base ou de topo na célula de disposição de resíduos e das lagoas de tratamento do efluente (REGINATO, 2018).

O aterro sanitário é uma obra de engenharia de utilidade pública, projetada de acordo com normas técnicas, que visa acomodar no solo, previamente impermeabilizado e com instalações de dutos de captação de lixiviado e biogás, os rejeitos no menor espaço possível, garantindo uma disposição adequada deles, são fundamentais na infraestrutura necessária para garantir a saúde pública e a gestão ambientalmente adequada de rejeitos (PWC e SELURB, 2019).

A maior parte dos RSU coletados no Brasil segue para disposição em aterros sanitários. Houve um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, e passou de 33 milhões de toneladas por ano para 43 milhões de toneladas destinadas a aterros, ainda assim há uma quantidade de resíduos que segue para unidades que são inadequadas como: lixões e aterros controlados, que também teve aumento de 25 milhões de toneladas por ano, passando a mais de 29 milhões de toneladas por ano (ABRELP, 2020), conforme observamos na Figura 7 que mostra a disposição final de RSU nas regiões, por tipo de destinação (t/ano).

Região	2010			2019		
	Aterro Sanitário	Aterro Controlado	Lixão	Aterro Sanitário	Aterro Controlado	Lixão
Norte	1.165.810	1.015.795	1.348.675	1.683.745	1.421.675	1.664.765
Nordeste	4.314.300	4.312.110	4.486.215	5.686.700	5.255.270	5.031.525
Centro-oeste	1.272.025	2.217.010	1.036.235	2.252.415	1.957.860	1.243.190
Sudeste	22.166.085	5.322.065	3.639.780	28.121.425	6.653.220	3.906.960
Sul	4.488.040	1.170.555	840.960	5.556.030	1.440.290	873.445
Brasil	33.406.260	14.037.535	11.351.865	43.300.315	16.727.950	12.720.250

Figura 7- Disposição final de RSU nas regiões, por tipo de destinação (t/ano).

Fonte: ABRELP (2020)

O aterro sanitário é composto por um sistema que envolve reações metabólicas, que podem ser influenciados, direta ou indiretamente por fatores

climáticos, através de microrganismos, e/ou por aspectos físicos, químicos e microbiológicos (FIRMO,2013), como pode ser observado na Figura 8.

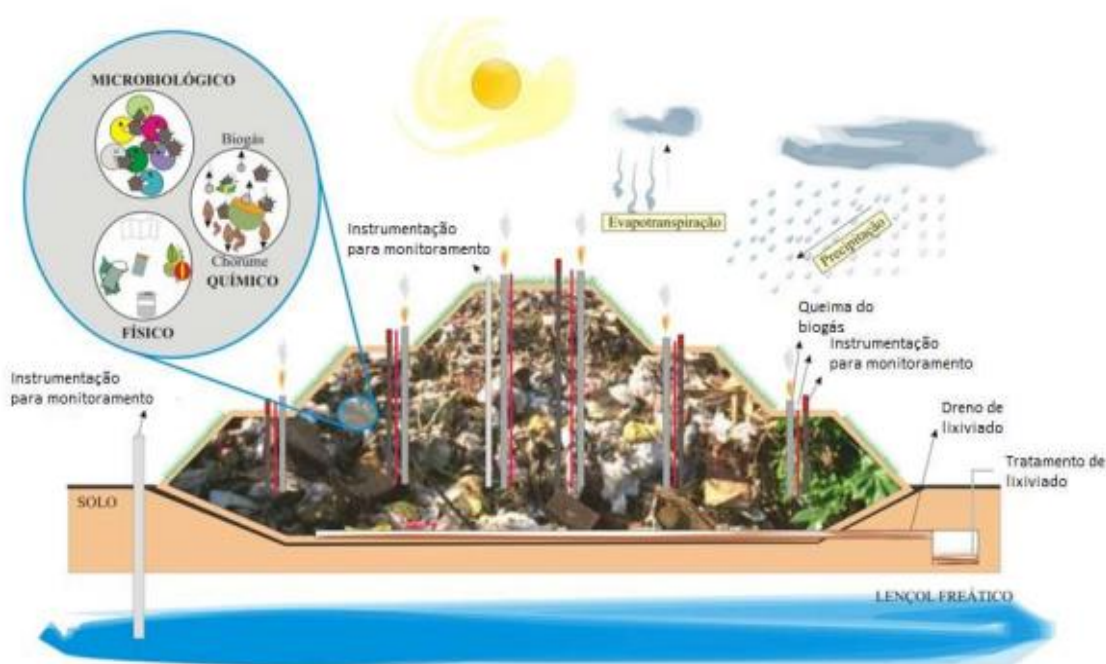


Figura 8- Interações físicas, químicas e biológicas em aterro RSU.

Fonte: Firmo (2006).

A disposição incorreta ou o manuseio indevido de resíduos sólidos estão gerando ou podem gerar sérios problemas para o ambiente, inclusive provocando grande impacto nas águas subterrâneas. Aterros sanitários bem construídos (impermeabilizados e com drenos de coleta de lixiviados), operados com eficiência (com cobertura de solo ao final de cada período de serviço) e em localização correta (onde a vulnerabilidade do aquífero subjacente não tenha índices altos) são alternativas seguras para muitos resíduos, mas não para todos (OLIVERA; PASCOAL, 2004). Objetivando a preservação do meio ambiente, o projeto desse tipo de empreendimento, bem como de outras atividades geradoras de impactos significativos, deve ser submetido a um processo de licenciamento ambiental junto ao órgão licenciador competente (GUZMAN, 2020).

O chorume gera impactos ambientais por apresentar elevado poder de poluição das águas subterrâneas e superficiais, sendo uma das primeiras alterações

observadas e a redução do teor de oxigênio dissolvido, que pode prejudicar a fauna e a flora aquática, além dos metais que podem se apresentar em diversas formas (livres, complexados, não solubilizados). Os fatores físicos como a temperatura, também devem ser observados, pois contém íons não solúveis em temperaturas baixas, ao passo que outros tem sua solubilidade reduzida em temperaturas elevadas. Esses poluentes devem ser monitorados com rigor face aos danos ambientais que provém dos mesmos, portanto, o chorume formado nos aterros deve ser tratado antes de seu lançamento em corpos receptores (SILVA, 2002).

3.1.3 Biogás

A história do biogás, de acordo com os registros existentes, começou com alguns estudos realizados em meados de 1600. Com a evolução dos estudos, foi possível descobrir que o odores, proveniente da decomposição química em regiões pantanosas, era uma substância inflamável a qual denominaram de biogás e/ou gás dos pântanos, que ocorreu em 1667 atribuída a Shirley. Em 1776, Alessandro Volta, físico italiano, teria reconhecido a presença de gás metano no gás dos pântanos.

Já no século XIX o aluno de Louis Pasteur, Ulysse Grayon realizou a fermentação anaeróbia a partir de uma mistura de estrume e água, a 35°C e obteve 100 litros de gás/m³ de matéria. A partir de então, Louis Pasteur descobriu que tal fermentação poderia construir uma fonte de aquecimento e iluminação (PECORA, 2006).

O biogás é composto, primordialmente, pelos gases de efeito estufa, como: CH₄ (55 – 60% do volume produzido) e CO₂, (40 – 45% do volume produzido). Nos aterros sanitários brasileiros, a emissão de metano através do sistema de cobertura varia consideravelmente, com valores acima de 1000 g/m² dia. A recuperação energética do metano produzido nos aterros sanitários é uma alternativa para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, gerando a energia elétrica e lucros financeiros para estas unidades, desta forma, contribuindo para uma gestão sustentável dos RSU, de acordo com (DAMASCENO, 2018).

Nos últimos anos, o biogás era tido como um subproduto, porém a partir da grande demanda de combustíveis e do esgotamento de recursos naturais para utilização do mesmo vem estimulando a produção científica acerca da temática de energias renováveis (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Castilhos et al. (2003) a geração de gás em aterros sanitários sofre interferência através de diversas variáveis, dentre elas estão: a natureza dos resíduos, umidade presente nos resíduos, estado físico dos resíduos (tamanho das partículas), pH, temperatura, nutrientes, capacidade tampão e taxa de oxigenação. Estes fatores são os responsáveis pelo desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia de substratos orgânicos.

Após à disposição dos RSU no aterro, ocorre grande incidência de oxigênio preenchendo os espaços vazios criados pela decomposição dos microrganismos de ação aeróbia presentes, como bactérias, fungos e leveduras. Este processo produz, além de água, calor e dióxido de carbono, os subprodutos que irão compor a biomassa para a fase anaeróbia, que se inicia após todo o consumo de oxigênio, através dos microrganismos anaeróbios (bactérias anaeróbias facultativas ou estritas). É nesta fase que ocorre a formação de gás metano (FIRMO, 2013).

A produção do biogás pode ser realizada a partir da vaporização, decomposição biológica e reações químicas. É feita a partir de microorganismos mesófilos e termofílicos, na ausência de ar, e pode ocorrer em diferentes ambientes, como: estações de tratamento de efluentes, aterros sanitários e plantas de digestão para resíduos orgânicos agrícolas (RASI; VEIJANEN; RINTALAI, 2007; RYCKEBOSCH; DROULLON; VERVAEREN, 2011).

Os principais decompositores da matéria orgânica presentes na massa de resíduo são as bactérias, além dos fungos e protozoários (em menor escala). Os grupos de bactérias presentes na decomposição anaeróbia da matéria orgânica são: bactérias fermentativas, acetogênicas produtoras de H_2 , acetogênicas consumidoras de H_2 e as metanogênicas. A decomposição dos resíduos é um dos principais fatores que influenciam a geração de biogás, (FERNANDES, 2009).

3.1.4 Metano

Os aterros sanitários são considerados fontes importantes quanto a emissão de gases de efeito estufa, principalmente em relação ao gás metano, que é também um valioso recurso energético, por esta razão a importância em se determinar seu fluxo superficial no aterro sanitário (Park; Kang; Lee, 2016).

O metano é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa e possui uma ação 25 vezes maior do que o dióxido de carbono em relação à retenção do calor

responsável pelo aquecimento estimado do planeta ao longo de cem anos, a degradação anaeróbia de resíduos sólidos nos aterros sanitários é uma das fontes mais importantes de produção antropogênica desse gás, que tem os aterros sanitários como responsáveis por 10 a 20% das emissões de metano geradas pela atividade antropogênica (*INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMA*, 2007).

Uma parte do biogás gerado em aterros sanitários, composto por 50 a 60% de CH_4 , pode atravessar a barreira de cobertura e escapar para a atmosfera, também chamado de emissões fugitivas, mesmo no caso dos aterros dotados de sistema de captação de biogás, (TEIXEIRA et al., 2009).

Porém o metano sofre alterações ao longo do processo no aterro sanitário, a oxidação do metano, é um fenômeno biológico natural que ocorre em solos com presença de bactérias, onde o metano é aerobiamente oxidado para dióxido de carbono, como todos os processos bioquímicos, a oxidação do metano depende da disponibilidade de todos os substratos envolvidos, neste caso: o metano e oxigênio (RACHOR et al., 2011).

3.1.5 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) consiste na decomposição de compostos orgânicos e inorgânicos que ocorrem quando os microrganismos mineralizam os substratos formando o biogás, reação que ocorre na ausência de oxigênio e que pode ser utilizada para produzir biogás, este biogás proveniente da DA, é composto por 50 - 70% de metano (CH_4) e 30 – 40% de dióxido de carbono (CO_2) (AGUSTINI, 2018).

A produção do biogás ocorre geralmente, dentro de um biodigestor e envolve uma série de processos biológicos, os microrganismos digerem a matéria orgânica dentro deste equipamento na ausência de oxigênio, o processo acontece de maneira controlada, proporcionando a redução do passivo ambiental e a produção de um combustível de baixo custo (ALVES et al., 2010).

A Figura 9 apresenta o processo simplificado de DA, onde os microrganismos presentes no substrato são os responsáveis pela primeira etapa do processo, seguidos das bactérias, que em inóculo compõem a segunda etapa do processo (RAPOUSO et al 2011; ABAD, 2015):

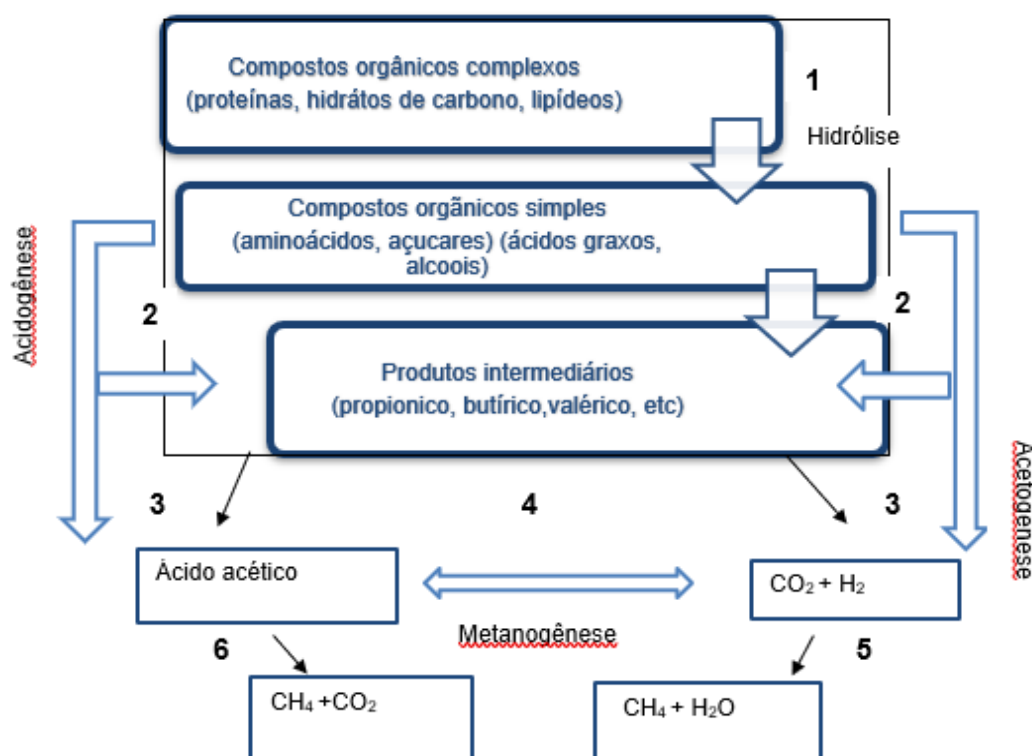


Figura 9- Processo simplificado de digestão anaeróbia.

Fonte: autora, adaptado de Suares (2014).

Tipos de bactérias: (1) fermentativas, (2) acidogênicas, (3) acetogênicas produtoras de hidrogênio, (4) homoacetogênicas, (5) metanógenos hidrogenotróficos, (6) metanógenos metilotróficos.

A primeira etapa é um estágio conhecido como hidrólise, onde os compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e gorduras) são decompostos em moléculas mais simples (ácidos graxos, monossacarídeos, aminoácidos), através de atividades dos micro-organismos hidrolíticos aeróbios, anaeróbios ou facultativos. Na segunda etapa, ocorre a acidogênese, onde os micro-organismos acidogênicos fermentam compostos solúveis, já criados pela hidrólise, transformando-os em: H_2 , CO_2 , etanol e ácidos orgânicos voláteis de baixo peso molecular (ácidos acético, propiônico e butírico). A terceira etapa é chamada de acetogênese, onde bactérias acetogênicas digerem os produtos da etapa anterior, produzindo: ácido acético, assim como CO_2 e H_2 . Por fim, a última etapa do processo, chamada de metanogênese, é onde ocorre a formação de CH_4 e CO_2 e outros gases traços a partir dos produtos intermediários (ácido acético, H_2 e CO_2), por rchaeas metanogênicas, (DAS NEVES; CONVERTI; PENNA, 2009; KUMAR; SAMADDER, 2017; WILLIAMS, 2005; ENGELMANN, 2021).

A digestão anaeróbia dos microrganismos provenientes dos resíduos para a produção de biogás, torna-se uma alternativa viável, sob o ponto de vista econômico e ambiental. É uma fonte de energia renovável, armazenável, que pode ser utilizada tanto como combustível, como para a geração de energia elétrica. Além disso, sua produção é tecnologicamente implementável em diferentes escalas, e virtualmente inesgotáveis (SIDDIKI et al, 2021; FERRARESE, 2021).

3.2 Economia Circular

O termo denominado “Economia Circular”, popularizado pela *Ellen McArthur Foundation* em 2010, apresenta um modelo capaz de desvincular o crescimento econômico da geração de resíduos, o termo ganhou popularidade entre as empresas globais devido aos seus benefícios ambientais, que visam transformar resíduos em recursos úteis para a fabricação de novos produtos, bem como, a possibilidade de aumentar os lucros e a competitividade das empresas. A economia circular, concebida pelos seus criadores, consiste num ciclo de desenvolvimento positivo e contínuo que preserva e valoriza o capital natural, otimizando a produção de recursos e minimizando os riscos, através da gestão de inventários finitos e fluxos renováveis, (STAHEL, 2010).

A economia circular promove a sustentabilidade através de um modelo econômico pautado em um cenário que prioriza a reciclagem e o reúso como substitutos da matéria-prima (HONRICH et al., 2018). Na prática a EC baseia-se em um sistema que implementa a eficiência dos recursos nos mais diferentes setores, e que considera desde o design e integridade do produto, as práticas de reutilização e gestão de resíduos, até o descarte final Ghisellini et al., (2016); Murray et al., (2017); Knickmeyer, (2020). A urgência de uma economia de modelo circular, baseia-se principalmente, na eminente escassez de recursos naturais Hobson e Lynch (2016), bem como, no problema ecológico causado pela produção e descarte indiscriminado de resíduos em lixões e aterros sanitários.

Ao longo da última década, uma atenção crescente tem sido dada em todo o mundo em relação ao novo conceito e modelo de desenvolvimento denominado de Economia Circular (CE), com o objetivo de fornecer uma alternativa melhor ao modelo de desenvolvimento econômico dominante (NESS, 2008).

Para que ocorra o desenvolvimento sustentável, há que se considerar que o mesmo ocorra de maneira equilibrada e simultânea aos aspectos econômicos, ambientais, tecnológicos e sociais dentro de um mesmo processo econômico, seja no setor industrial ou no processo individual, mas na interação entre todos esses aspectos (GHIZELLINI, 2016 apud FAO, 2002; REN et al., 2013).

A popularização do conceito de Economia Circular foi fornecida pela Fundação Ellen MacArthur, que diz: “uma economia industrial intencionalmente restauradora; pretende contar com fontes renováveis de energia; minimizar, rastrear e eliminar o uso de produtos químicos, tóxicos; e erradicar o desperdício através de um design cuidadoso”(ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013, p. 22).

Enfim, apesar de estarmos ainda muito longe do ideal, estamos vivendo o ponto de ebulição do paradigma da EC. De acordo com (KIRCHHERR et al., 2017, p.22), “a economia circular é mais frequentemente descrita como uma combinação para reduzir, reutilizar e reciclar atividades”.

A EC visa um crescimento que beneficie toda a sociedade, logo, são ações que objetivam o desenvolvimento econômico, mas é possível desde que seja disseminada a ideia, de que os recursos são úteis para o consumo e manutenção do sistema econômico, além de modificar a maneira como os resíduos são tratados, ou seja, o principal objetivo é transformar resíduos em recursos, através da implantação da circularidade no processo, e para que esta funcione, é necessário, tornar todo o processo mais sustentável (ALHOLA, 2018; VALENZUELA-INOSTROZA et al., 2019).

A Figura 10 demonstra um comparativo entre os dois modelos econômicos atuais, o Linear, modelo econômico que predominou até alguns anos atrás, e o modelo de economia circular, que é o modelo econômico contemporâneo, e de suma importância nos dias atuais e futuros, tendo em vista a necessidade de um desenvolvimento mais sustentável:



Figura 10- Modelos Econômicos Linear versus Circular.
Fonte: Google imagens, (2023).

4 METODOLOGIA

Desenvolveu-se nesse estudo, a partir de pesquisa bibliográfica, um levantamento sobre a produção de biogás em aterros sanitários no Brasil, com posterior análise de potencial energético nos aterros sanitários do estado do Rio Grande do Sul, partindo de levantamentos: bibliométrico, sistemático, buscando a partir destes, fazer um comparativo sobre a produção do biogás utilizando RSU de aterros sanitários na última década e análise de implantação de economia circular como forma de impulsionar econômica e sustentavelmente o setor.

Este estudo adotou a metodologia qualitativa na forma de um estudo de literatura a partir de leitura de artigos primários, artigos secundários e artigos terciários, sobre empréstimos a produção de biogás em aterros sanitários no Brasil. A principal característica da pesquisa qualitativa é a análise descritiva, onde os resultados da pesquisa não comprovam uma hipótese (RUSYDIANA et al., 2021).

Dados das publicações de periódicos científicos foram coletados da plataforma *Scopus*, e após selecionados, estes, foram analisados por meio de software estatístico denominado *VOSviewer*. Além disso, os dados do *VOSviewer* foram analisados qualitativamente para identificar questões que fossem relevantes para a pesquisa acerca do tema do estudo (KHOLIDAH et al., 2022). Este trabalho seguiu metodologia descrita de acordo com a Figura 11:

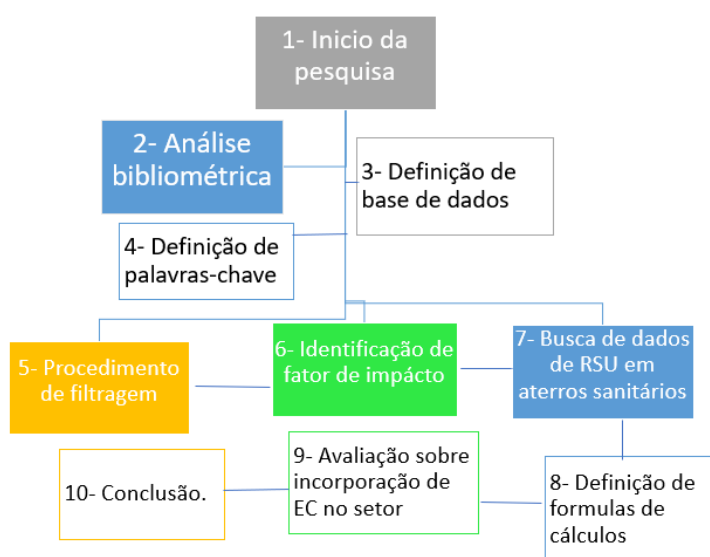


Figura 11– Etapas de desenvolvimento metodológico.

4.1 Análise Bibliométrica

Para este trabalho inicialmente foi utilizada o método de pesquisa de análise bibliométrica, por meio de uso do software *VOSviewer* (GOYAL & KUMAR, 2021 ; ZHANG et al., 2019 ; BAHOO et al., 2020 ; BHATT et al., 2020 ; CHUN-HAO e JIAN-MIN, 2012). A análise bibliométrica é uma técnica de investigação que é utilizada por pesquisadores para avaliar o progresso do trabalho científico ao longo dos anos (OLK e GRIFFITH, 2004 ; SCHILDT et al., 2006).

A bibliometria é um método estatístico utilizado para analisar a literatura acadêmica (livros, artigos e outros tipos de literatura) (BELLIS,2009). Conforme o campo de pesquisa e os índices de publicação de periódicos evoluem, os estudos bibliométricos são criados para registrar e analisar os resultados escritos dos cientistas, a bibliometria é conhecida como bibliografia estatística, pois é uma combinação de técnicas estatísticas e matemáticas a partir da análise de dados escritos, em livros ou em outros meios de comunicação, ou seja, as técnicas bibliométricas têm várias funções, que incluem, explicar o processo de comunicação escrita para identificar a direção do desenvolvimento de certas disciplinas e interpretar estatisticamente os dados escritos (PRITCHARD,1969), e para medir a importância, bem como a qualidade das pesquisas publicadas na forma de artigos científicos ou livros (BALL, 2018).

O *VOSViewer* foi utilizado no processamento e visualização dos dados bibliométricos de artigos encontrados a partir da busca que obedeceu alguns critérios específicos para que se obtivesse resultados que respondessem ao objetivo principal deste trabalho, que foram: o levantamento sobre a utilização de RSU provenientes de aterros sanitários no Brasil para a produção de biogás, para que através desta pesquisa fosse possível a construção de mapas e ligações de redes próximas. Além disso, este *software* possibilita a alteração de critérios analíticos dos dados a serem analisados, como periódicos, instituições acadêmicas, países de origem, autores, co-citações, palavras-chave entre outros (VAN ECK; WALTMAN, 2020).

Os dados a serem analisados, foram coletados da base de dados da *Scopus*, considerando que este é o maior banco de dados de resumos e citações da literatura e que o mesmo contém pesquisas de diversas áreas da ciência e tecnologia, saúde,

ciências humanas, ciências sociais dentre outras. O Scopus indexa quase 20.000 periódicos revisados por pares de muitos editores renomados (YONG -HAK, 2013).

O próximo passo foi estabelecer os critérios a serem utilizados para a pesquisa bibliométrica. Foi estabelecido que a pesquisa se basearia na busca por bibliografia entre os anos de 2012 A 2022, nas quais foram excluídos: capítulos de livros, livros e trabalhos de conferencias, outros critérios utilizados para refinar a pesquisa foram: trabalhos realizados apenas no Brasil, publicados nos idiomas: português, inglês e espanhol. Além disso, o estudo se concentrou nos seguintes critérios de avaliação: autores mais citados, cocitações de periódicos, países com maior incidência de publicações e coocorrência de palavras-chave.

A *string* de busca com os termos e operadores booleanos, utilizada para a pesquisa bibliométrica é mostrada abaixo:

String = “energ.* potential” OR bioenergy OR biomethane OR biogás AND “landfill gas” OR landf* AND “municipal solid wast”.

4.2 Caracterização da área de estudo

O presente estudo concentrou-se no estado do Rio Grande do Sul, especificamente nas cinco principais cidades mais populosas do estado: Porto Alegre, Caxias do Sul, Canoas, Pelotas e Gravataí, conforme mostrado na Figura 11, abaixo. O Rio Grande do Sul, possui uma população estimada pelo IBGE (2021) de 11.466.630 habitantes contra 10.693.929 habitantes em 2010, com uma densidade demográfica de 37,96 hab/km², possuindo também 7.689.278 veículos em circulação (IBGE CIDADES, 2021). O RS, conforme Figura 12, é a quarta maior economia do Brasil, participando com 6,5% no PIB nacional, com o Produto Interno Bruto chegando a 482 bilhões de reais em 2019 (GOVERNO DO RIO GRANDE DO SUL, 2020):

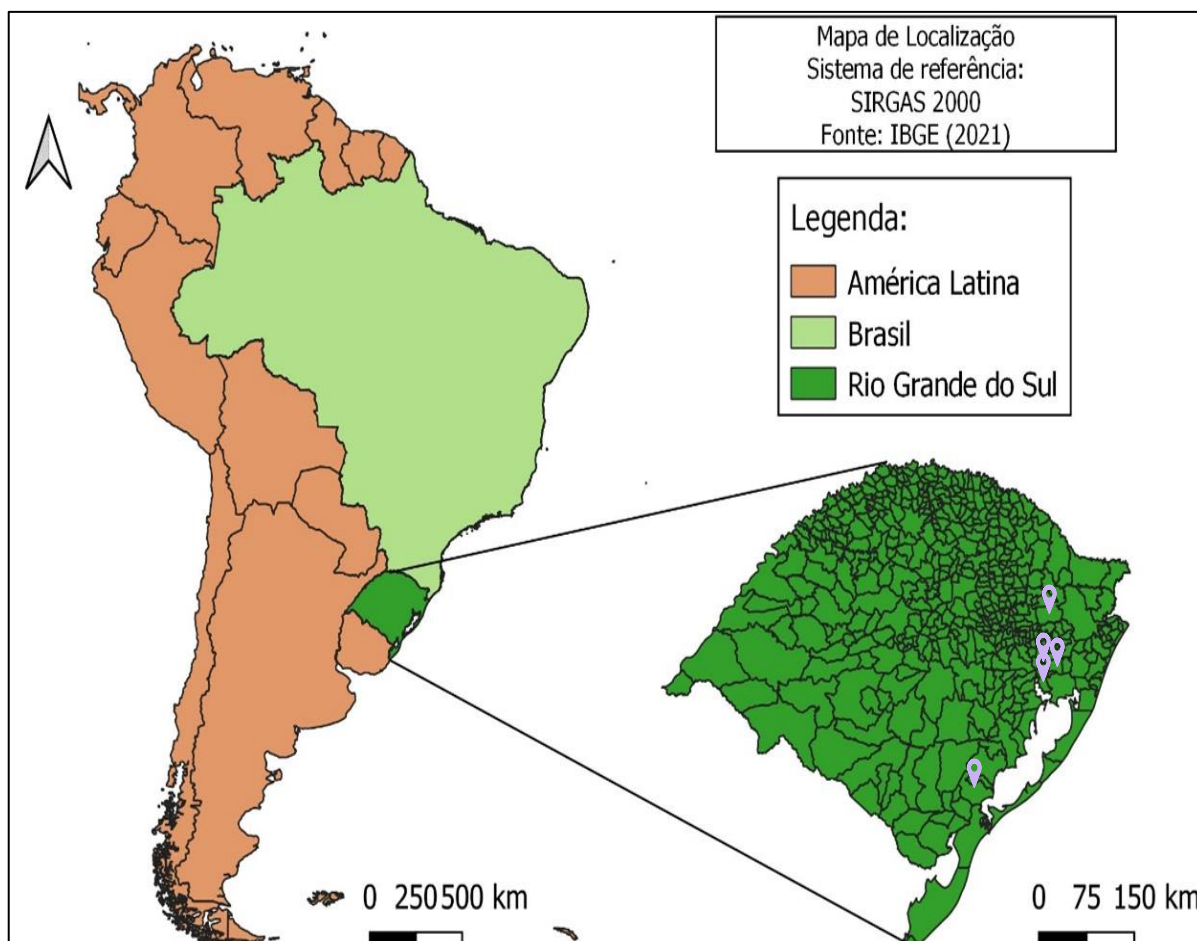


Figura 12- Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: Elaborado no Qgis Adaptado de IBGE (2021).

De acordo com as informações do IBGE (2021) e dos indicadores do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) (2021) podemos caracterizar os seguintes municípios:

- Porto Alegre: Capital do Rio Grande do Sul, possui uma população de 1.492.530 pessoas, de acordo com a estimativa do IBGE em 2021, em uma área territorial de 495,390km², com uma densidade demográfica de 2.837,53 hab/km², sendo a cidade mais populosa do estado do Rio Grande do Sul. A taxa de escolaridade no ensino fundamental é de 96,6%. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) em 2010 era de 0,8, com 93% do município possuindo esgotamento sanitário. O PIB *per capita* em 2020 foi de 51.116,72 R\$. Em relação aos resíduos sólidos o município possui uma taxa de cobertura de coleta de 100%, com uma massa total coletada de 0,93 Kg/habitante/dia, uma taxa de recuperação de resíduos de 1,83% e um custo total de coleta dos resíduos de 171,11 R\$/t.

- Caxias do Sul: possui uma população de 523.716 pessoas, com uma densidade demográfica de 264,89 hab/km², sendo a segunda cidade mais populosa do estado. A taxa de escolaridade no ensino fundamental é de 96,3%. Em 2020 possuía um PIB *per capita* de 50.178,98 R\$. Em 2010 o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) era de 0,8, com 91,9% do município possuindo esgotamento sanitário. O município também possui uma cobertura de coleta de resíduos sólidos de 100%, com uma massa coletada total de 0,62 Kg/habitante/dia, taxa de recuperação de 9,58% e um custo de coleta de 349,07 R\$/t.
- Canoas: Localizado na região Metropolitana de Porto Alegre é o terceiro município mais populoso do estado, possui uma população estimada de 349.728 pessoas, com área uma área territorial de 130,789 km² e densidade demográfica de 2.470,15 hab/km². A taxa de escolaridade no ensino fundamental é de 95,9%, com índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM) de 0,75. O PIB *per capita* em 2020 era de 53.031,82 R\$, com esgotamento sanitário adequado de 92,9%. Além disso, o município possui uma massa total de resíduos coletada de 0,82 Kg/habitante/dia, com cobertura de coleta total de 100% e gasto com coleta de 162,19 R\$/t.
- Pelotas: Possui uma área territorial de 1.609,708 km², localizado na região na mesorregião Sudeste Rio-grandense, com uma população total de 343.826 pessoas e uma densidade demográfica de 203,89 hab/km², sendo o quarto município mais populoso do RS. O município também possui um valor de IDHM de 0,739 (2010), com taxa de escolaridade no ensino fundamental de 96,9%, PIB *per capita* de 27.671,06 R\$ e esgotamento sanitário de 82,4% (2010). Possui uma taxa de cobertura total de resíduos sólidos de 97,98%, com taxa de recuperação de 0,36%, massa total de resíduos coletada de 0,68 Kg/habitante/dia gerando gastos de 293,3R\$/t.
- Gravataí: O quinto município mais habitado do estado, está localizado na região metropolitana de Porto Alegre, possui uma área territorial de 468,288 km², população total de 285.564 pessoas e densidade demográfica de 551,59 hab/km². Possui PIB *per capita* de 37.518,45 R\$, IDHM de 0,736, taxa de escolaridade do ensino fundamental de 95,7% e esgotamento sanitário de 83,5%. Além disso, o município possui uma taxa de cobertura de coleta de

100%, uma massa coletada de resíduos ao dia de 0,75 Kg/habitante, com taxa de recuperação de 1,65% e custos com coleta de 210,83 R\$/t.

Com a caracterização realizada para os 5 municípios a serem estudados e utilizando os indicadores sobre saneamento básico nacional do SNIS é possível estimar a geração de metano por ano para estes municípios, utilizando o **indicador IN028** que considera a Massa Coletada Total (resíduos públicos + resíduos domiciliares) (SNIS, 2021). Para tanto, foi utilizado os seguintes dados de geração de resíduos. A taxa de resíduos gerada pelos municípios é apresentada na Tabela 2:

Tabela 2. Caracterização dos municípios

Municípios	Nº de habitantes	RSU coletado (kg/hab/dia)	Resíduos Orgânicos (kg/hab/dia)
Porto Alegre	1.492.530	0,93	0,42
Caxias do Sul	523.716	0,64	0,29
Canoas	349.728	0,82	0,37
Pelotas	343.826	0,74	0,34
Gravataí	285.564	0,85	0,39
Rio Grande do Sul	11.466.630	0,82	0,38

Fonte: SINIS (2021).

4.3 Estimativa da geração de metano de RSU

Para obter a produção de biogás dos aterros sanitários do estado e dos municípios do Rio Grande do Sul, o método aplicado para o presente trabalho baseou-se na metodologia recomendada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas IPCC (1996), que considera a quantidade estimada de carbono orgânico degradável presente nos resíduos, resultando em metano que pode ser produzido por uma certa quantidade de resíduo depositado. A Equação (1) apresenta a estimativa de geração de metano para os resíduos sólidos urbanos gerados nos municípios:

$$E_{CH_4} = [P * RSD * RSD_f * (F_{CM} * COD * COD_f * F) * \left(\frac{16}{12} - R\right) * (1 - OX)]$$

$$E_{CH_4} = [P * RSD * RSD_f * (F_{CM} * COD * COD_f * F) * \left(\frac{16}{12} - R\right) * (1 - OX)] \quad (1)$$

Em que:

E_{CH_4} : Emissões de CH₄, em kg/ano;

P = População urbana (hab.);

RSD = Taxa de geração de resíduos sólidos domésticos (hab./ano);

RSD_f = Fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição = 0,6;

FCM = Fator de correção de metano, 1 (adimensional);

COD = Carbono orgânico degradável no resíduo sólido doméstico (kg C/kg de resíduos);

COD_f = Fração de COD que realmente degrada (adimensional);

F = Fração de CH₄ no gás de aterro = 0,5;

16/12 = Taxa de conversão de carbono em metano (massa molecular CH₄/C);

R = Quantidade de metano recuperado no ano (kg); valor desprezível;

OX = Fator de oxidação no ano; valor desprezível.

O valor de COD (carbono orgânico degradável) dos resíduos, mostrado na Equação (2), foi obtido através da composição gravimétrica dos resíduos gerados, utilizando a Tabela 3:

$$COD = (0,40 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,40 * D) + (0,30 * E)$$

$$COD = (0,40 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,40 * D) + (0,30 * E) \quad (2)$$

Tabela 3. Teor de Carbono Orgânico Degradável nos resíduos

Identificação	Componente	COD (%) em massa
A	Papel e Papelão	40
B	Resíduos de Parques e Jardins	17
C	Restos de alimentos	15
D	Tecidos	40
E	Madeira*	30

*excluindo a fração de lignina que se decompõe lentamente.

Fonte: Bingemer e Crutzen (1987).

A composição gravimétrica dos resíduos foi obtida de ABRELPE (2020) e Reis et al. (2003). Entretanto, apenas uma fração de COD degradará realmente, sendo o COD_f dado pela Eq. (3) de Bingemer e Crutzen (1987):

$$COD_f = 0,014T + 0,28$$

(3)

Em que

T, é a temperatura (°C) na zona anaeróbica, sendo considerada neste estudo como 35°C, logo COD_f é igual a 0,77.

O fator de correção do metano (FCM) é um valor adimensional de correção de metano produzido, e está relacionado com local de disposição e o gerenciamento dos resíduos no local (IPCC, 2006). O local de destino dos resíduos determinará a quantidade de metano produzido, logo em uma zona anaeróbia a geração de metano é maior. Portanto, foi considerado o aterro sanitário de degradação anaeróbia como local de destino, levando a um $FCM=1$.

A maioria dos locais de disposição de resíduos como aterros, gera um biogás com aproximadamente 50% de metano, exceto resíduos como óleos e gorduras que podem gerar quantidades elevadas. O uso padrão do IPCC, recomenda um valor de F de 0,5 para gás de aterro (IPCC, 2006).

O fator de oxidação do metano (OX) indica a quantidade de metano da massa residual, que é oxidada no solo ou em outro material cobrindo os resíduos. As propriedades físicas, a espessura da cobertura e o teor de umidade dos solos de cobertura afetam diretamente a oxidação de metano. Portanto, o IPCC recomenda a utilização de fator nulo, quando ocorre falta de informações (IPCC, 2006).

O metano gerado pode ser recuperado e queimado em *flare* ou outro dispositivo de energia. A quantidade de metano recuperado (R). Quando não se há informações específicas da quantidade a ser recuperada, utiliza-se o valor padrão nulo (IPCC, 2006).

A partir da utilização destes dados foi possível calcular o potencial energético dos principais municípios do estado do Rio Grande do Sul, conforme demonstrado a seguir.

4.4 Potencial elétrico

A energia elétrica do metano (E_e) em kWh/ano gerado no aterro e coletado, pode ser obtida através da Equação (4), adaptada de Ayodele et al. (2017):

$$E_e = \frac{E_{CH_4} * 0,9 * PCI_{CH_4} * \lambda * \eta}{3,6} \quad E_e = \frac{E_{CH_4} * 0,9 * PCI_{CH_4} * \lambda * \eta}{3,6}$$

(4)

Em que:

PCI_{CH_4} : é o poder calorífico inferior do biogás (37,2 MJ/m³);

η : é a eficiência de conversão elétrica para o motor de combustão interna, sendo dada como 35% (Saghir et al., 2018);

λ : é a eficiência de coleta de metano em aterros, normalmente o valor é de 75%.

O valor de 3,6 é referente a conversão de MJ para kWh e 0,9 é um coeficiente empírico da conversão.

4.5 Créditos de carbono

O aproveitamento energético do metano gerado no aterro sanitário, promove uma redução de gases de efeito estufa que seriam lançados para a atmosfera. Deste modo, a implementação de um projeto como este permite que a empresa possa obter o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Kyoto, gerando assim créditos de carbono e incentivos fiscais. Portanto, o cálculo dos créditos de carbono para o metano gerado foi obtido da Equação (5), de acordo com Oliveira e Oliveira (2012):

$$CO_{2eq} = E_{CH_4} * GWP * d_{CH_4} \quad CO_{2eq} = E_{CH_4} * GWP * d_{CH_4}$$

(5)

Em que:

CO_{2eq} : é a quantidade de CO_{2eq} (tCO₂/ano);

E_{CH_4} : é a geração de metano (m³/ano);

GWP: é o potencial de aquecimento global (CO_2/CH_4);

d_{CH_4} : é a densidade do metano ($0,7167 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^3$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Revisão Bibliométrica

5.1.1 Análise de rede de cocitações em periódicos

A primeira busca utilizando a *string* na base dados da *Scopus*, foi a pesquisa por revistas, onde foram utilizados os seguintes critérios para o refino das buscas:

Cocitação; citação de fonte; mínimo de citações:20 e máximo:163, que foi o máximo que a plataforma permitiu para este parâmetro, dentro dos critérios estabelecidos na *string* de busca, conforme Figura 13 abaixo: Cocitações

824 document results

(TITLE-ABS-KEY("energ* potential") OR TITLE-ABS-KEY(bioenergy) OR TITLE-ABS-KEY(biomethane) OR TITLE-ABS-KEY(biogas) AND TITLE-ABS-KEY("landfill gas") OR TITLE-ABS-KEY(landf*) AND TITLE-ABS-KEY("municipal solid waste")) AND (LIMIT-TO(PUBYEAR, 2022) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2021) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2015) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2014) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2013) OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2012)) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "re"))

Figura 13- Cocitações.

O próximo passo foi verificar a partir de tabela gerada pelo *software* (*verify selected sources*), que exibe as fontes selecionadas. Nessa parte da pesquisa é possível refinar estes resultados de acordo com as perguntas a serem respondidas com a pesquisa, e dentro dos critérios estabelecidos para tal, verificar se todas as fontes selecionadas pela ferramenta fazem sentido para esta pesquisa, antes de finalizar e gerar os mapas bibliométricos.

O critério para o refino sobre a seleção de revistas disponibilizadas na tabela da ferramenta, foi selecionar as fontes com maior número de citações, bem como, as que possuem Força Total de Link (*total link strength*), ou seja, as que possuem maior incidência de links de acoplamento bibliográfico, e por consequência, com maior relevância com a *string* de busca, previamente estabelecida para esta pesquisa.

Na Tabela 4, estão selecionadas as 10 revistas com mais citações e com maior incidência de links:

Tabela 4. Análise de cocitações e maior incidência de publicações sobre a produção de biogás a partir de RSU de aterros sanitários

RELEVÂNCIA	REVISTAS	CITAÇÕES	INCIDÊNCIA
1	Bioresour. Technology	390	35727
2	Bioresour Technology	646	22813
3	Waste Management	632	21712
4	Waste Management	575	20196
5	Waste Management	994	15825
6	Energy	314	14507
7	Journal of Cleaner Production	376	13921
8	Waste Management.	725	13538
9	Renewable and Sustainable Energy Reviews	189	12653
10	Chemosphere	258	11615

A Figura 14, representada abaixo, mostra o mapa de cocitações com base na maior incidência de publicações relacionadas a produção de biogás em aterros sanitários no Brasil, indexados pela *Scopus*. O mapa mostra que o periódico *Waste Management* possui clusters nos principais pontos do mapa, o periódico, também mantém, o maior número de agrupamentos, ou seja, de cocitações, além de possuir os clusters maiores, indicando sua relevância no assunto.

Fonte: autora, adaptado de *VOSviewer*, (2022).

Os nomes dos periódicos nos clusters conectados pelas linhas, indica que houveram cocitações entre diferentes periódicos. São observadas no mapa, cinco cores de clusters diferentes, ambas correlacionadas, porém, estas, tem como principais ligações clusters que aparecem com mais incidência no mapa, o que pode indicar mais relevância no tema em questão.

O periódico *Energy* (principal cluster na cor lilás), não é o maior cluster, também não está dentre os grupos com mais citações, porém, aparece bem no centro do mapa, indicando ser a principal ligação entre os clusters das extremidades do mapa, devido as linhas que se ligam a ele, o que pode indicar que colaborações entre os periódicos representados por clusters que estão nas partes mais extremas do mapa possam aumentar a proximidade entre as pesquisas através de citações.

O periódico *Bioresource Technology* (cluster verde) terceira cor com mais incidência, ao contrário dos clusters de cor azul e vermelho, primeiro e segundo respectivamente, possuem como principal rede de ligação a revista *Waste Management*, esta parte do mapa possui a maior rede de ligações do mapa, inclusive

com a parte de cor com menor incidência do mapa (amarelo) que também é representado através do seu maior cluster, também pelo periódico: *Bioresource Technology*, o que pode indicar a razão dessas redes estarem ligadas.

Nos clusters de cor vermelho, dois clusters se sobrepõem, *Waste Management* e *Bioresource Technology*, que tem como principais ligações os periódicos: *Chemosphere* e *Energy*, este segundo sendo a ligação entre este ponto do mapa e a sua principal cor (azul), no que se refere a tamanho de cluster, embora não seja o que possui a principal rede de ligações ou a mais numerosa, mas é onde se encontram os clusters de tamanhos maiores, o que pode indicar os periódicos com maior fator de impacto sobre o tema em questão, e onde o principal cluster se refere ao periódico *Waste Management*, que possui rede de ligação com *Energy*, este último novamente configurando como o principal periódico para fazer a rede de ligações entre os extremos do mapa, o que demonstra sua importância no que tange o tema central desta pesquisa.

Os clusters de cor amarela, são os que possuem menor rede de ligações e consequentemente, menos representatividade no mapa (clusters menores), estão no centro do mapa, o que indica um potencial importante para futuras ligações com os demais extremos do mapa, suas principais ligações até o momento são com o cluster de cor vermelha, representado pelo periódico *Chemosphere* e com o cluster de cor verde, representado pelo periódico *Waste Management*, que aparece como o maior cluster daquela cor, e o de maior incidência neste mapa bibliométrico, o que pode-se acreditar ser um importante propulsor para o aumento futuro de citações entre o periódico *Bioresource Technology* (principal cluster amarelo) e outros periódicos já citados neste trabalho:

Mediante análise de co-ocorrência para identificar áreas de pesquisa e compreender como os pesquisadores estão realizando combinações de palavras sobre a produção de biogás a partir de RSU em aterros sanitários, utilizando o título, resumo e palavras-chave como fontes de termos dos periódicos extraídos da base de dados da *Scopus*. Para a busca de co-ocorrência de palavras-chave, utilizou-se na pesquisa, como uma base para a busca, um número mínimo de 15 co-ocorrência., conforme Figura 15.

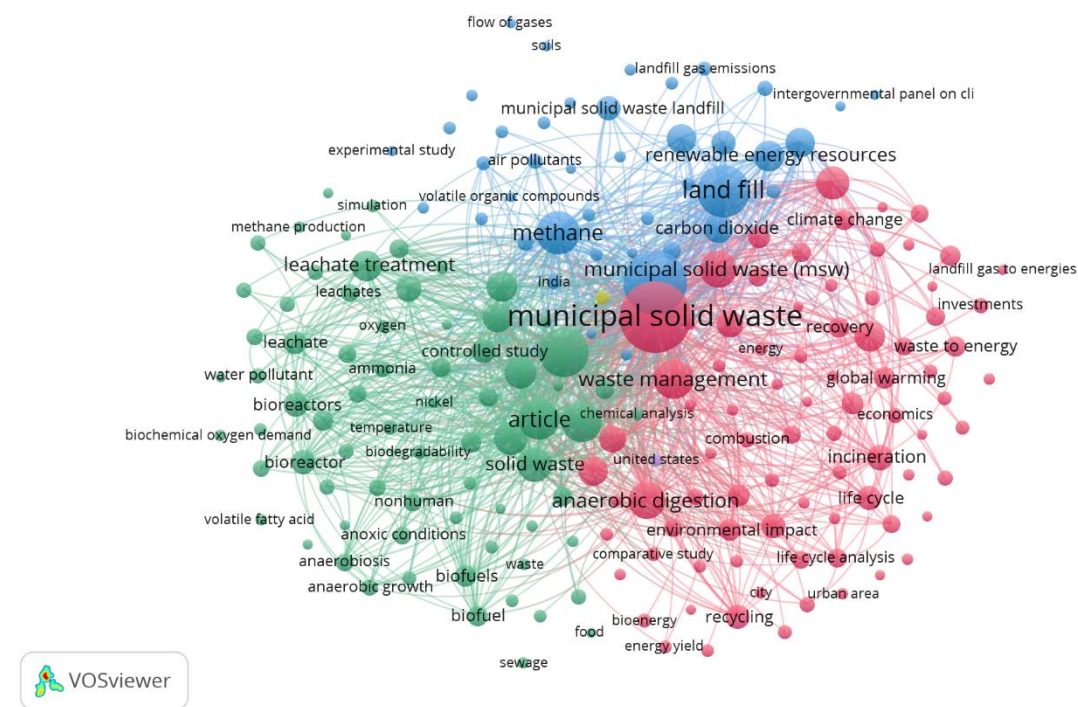


Figura 15.- Mapa de co-ocorrência de palavras-chave entre os anos de 2012 à 2022.

Fonte: Autora, adaptado de VOSviewer (2022).

Nesta pesquisa a rede de ligações ficou dividida entre três cores de ocorrência de palavras-chave: vermelho, azul e verde, sendo que, destas, a parte do mapa de cor vermelha é a que possui a maior rede de interligações e também a que possui os maiores clusters, ou seja, que possui maior impacto dentro das pesquisas em relação ao tema proposto.

A rede de cor azul também possui muitas ligações é a segunda em tamanho de clusters, ou seja, também possui grande incidência de co-ocorrência de palavras-chave que aparecem na sua rede de ligações. Seguidos pelos clusters de cor verde, que são nesta pesquisa, os clusters que apresentaram menor tamanho, ou, os que possuem a menor incidência de co-ocorrência de palavras-chave, e também os que possuem a menor rede de ligações, e que por consequência tem menor relevância que os demais. Os clusters de cor verde são os que possuem o menor tamanho e também a menor rede de ligações.

Foi possível observar que a palavra-chave com maior co-ocorrência foi a palavra municipal solid waste, que está representada pelo maior cluster de cor vermelha do mapa de interligações, a mesma palavra também aparece com maior co-ocorrência no cluster de cor azul, outras palavras com bastante co-ocorrência na rede de clusters vermelhos, são: *waste management*, *anaerobic digestion* e *climate change*.

Na rede de clusters azuis existem três palavras-chave que possuem bastante incidência: land fill, methane e renewable energy resourcers. Na rede de clusters de cor verde as palavras com maior co-ocorrência, ou seja, as que possuem os maiores cluster são: *article*, *solid waste* e *leachate treatment*:

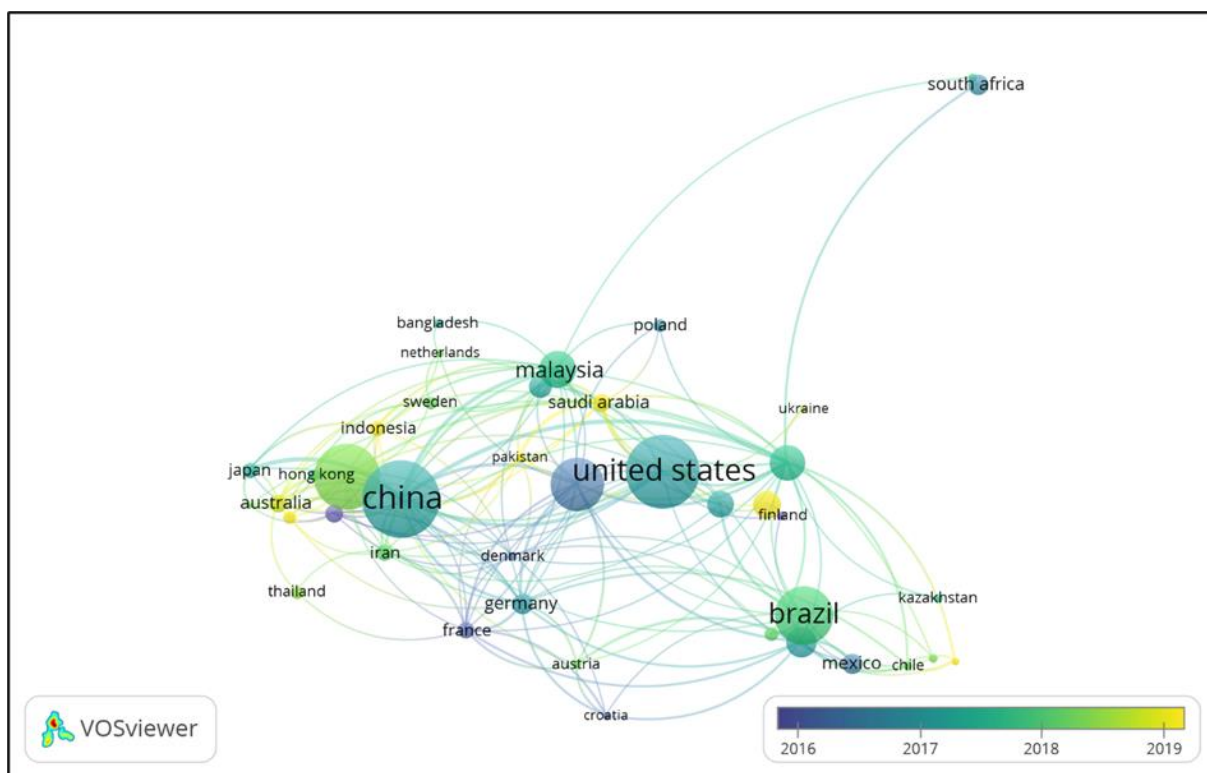


Figura 16- Rede de interações entre países e publicações com o tema sobre bioenergia proveniente de aterros sanitários.

Fonte: Autora, adaptado de VOSviewer,(2022).

A partir de análise da rede de ligações do software conforme Figura 16 acima, sobre os países que mais publicaram sobre o tema de bioenergia a partir de aterros sanitários, foi possível constatar que Brasil, foi o país com mais publicações (cluster maior) entre os anos de 2017 e 2018, até pelo menos o primeiro período deste último. Tendo como principais redes de ligações: *United Kingdon* (Reino Unido), Canadá, Itália, China e Alemanha, a Índia é o país que como o Brasil, também está entre os principais países com publicações nesta área nos anos entre 2017 e o primeiro semestre de 2018, seguidos pela Malásia.

A implementação da PNRS no Brasil, criada a partir da Lei 12.305 de 2010, algumas perspectivas de definição de resíduos sólidos, criando metas e objetivos para os municípios cumprirem, com o intuito de acabar com os lixões e outros meios irregulares de destinação, este movimento na política de gestão de resíduos foi determinante para que o Brasil passasse então a figurar como um dos principais em número de trabalhos publicados na temática de resíduos sólidos.

A Índia aparece como um dos países com maior número de publicações, fato que pode estar relacionado com o fato de ser uma das economias mundiais que mais investe no crescimento verde. No ano de 2015, por exemplo, a Índia foi escolhida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA 2015) como país sede para a comemoração do “Dia Mundial do Meio Ambiente”, que acontece no dia 05 de junho (PEREIRA, 2015).

O Brasil e Índia foram antecidos por países como: Estados Unidos e China, que na rede de ligações aparecem com os clusters maiores na cor azul, ainda na rede de cor azul, aparece no canto mais extremo do mapa, a África do Sul, país com publicações que se ligam basicamente a dois pontos: *United Kingdom* e Malásia, ambas na rede de ligações de cores esverdeadas.

O que demonstra a ligação nas redes do mapa entre os países da rede azul, com maior ênfase de publicações nos anos de 2016 e a primeira metade de 2017, e os países com clusters verdes, com mais publicações (cluster maiores) que aparecem a partir da segunda metade do ano de 2017 e a primeira metade do ano de 2018, é que há uma interligação entre eles, demonstrando maior interesse sobre o tema e uma colaboração entre ambos.

Nos anos de 2005 as populações da China e dos Estados Unidos era, respectivamente: 1,304 bilhão de habitantes e gerou no mesmo ano 300 milhões de toneladas de resíduos sólidos, já os Estados Unidos eram 295,5 milhões de habitantes

e gerou 238 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Enquanto no Brasil no ano de 2008 tinha 192 milhões de habitantes e gerou 52,9 milhões de toneladas. Esses dados são a provável razão da China e dos Estados Unidos estarem bem na frente na publicação de trabalhos relacionados ao tema, uma vez que por conta do aumento populacional e consequente aumento de geração de RSU estes países já vinham aplicando métodos como a reciclagem e implementação de aterros sanitários (OLIVEIRA, 2011; ANDRADE, 2021).

É interessante salientar sobre a interligação entre publicações da África do Sul (cluster azul) e da Malásia e *United Kingdom* (clusters verdes), que isso pode demonstrar que estas citações geraram uma continuidade de publicações sobre o tema, uma vez que tanto Malásia quanto *United Kingdom*, se ligam ao Brasil e a Índia, países já citados aqui, como países com bastante incidência de publicações e citações na área nos anos que se seguiram.

Sobre os países com rede de ligações na cor amarela, que são os países com mais relevância de citações no período mais atual indicado pelo mapa que é o ano de 2019, estão: Arábia Saudita e Austrália, embora ambos apareçam com clusters pequenos em relação aos demais já citados aqui, demonstram sua importância por manterem essa rede de interações com os demais países e desta forma dar continuidade a um tema com tanta relevância.

Na rede de ligações o cluster de cor roxa, o principal cluster está representando a Itália, país que aparece bem ao meio do mapa e que demonstra ser o precursor neste tema dentro do mapa apresentado, uma vez que a cor roxa é indicada nas publicações que aparecem como mais “antigas” do mapa, ou, onde, a partir dela, a rede de interligações começa, mais precisamente na segunda metade do ano de 2015.

E que a partir desta, toda a rede de interligações começa, pois é possível analisar que a Itália é o país com mais redes de ligações do mapa, o que se deve ao aumento de O de acordos e discussões sobre a temática de sustentabilidade e resíduos sólidos, fato muito semelhante ao que ocorreu no Brasil posteriormente, e que, provavelmente por ser o precursor, tornou-se também o mais citado, o que explica tantas interligações e demonstra sua importância.

5.2 Geração de Biogás e Metano em Aterros Sanitários

Com a utilização da Equação (1) e convertendo os resultados em tonelada/ano, foi possível obter a estimativa da geração metano nos cinco municípios mais populosos do Rio Grande do Sul, conforme apresentado nas Figuras 17 e 18:

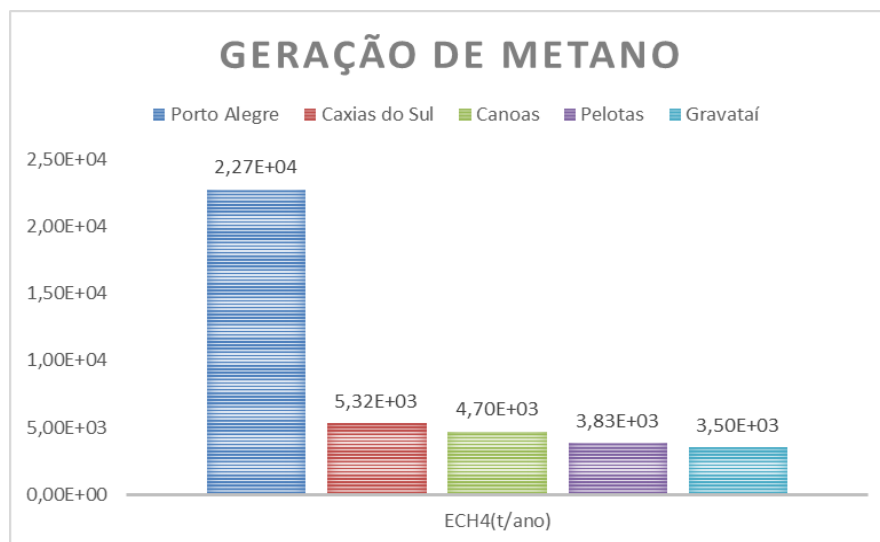


Figura 17- Potencial de geração de metano nos municípios do RS.

A capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre apresentou o potencial mais elevado para a geração de metano 22.700 toneladas de metano ao ano, sendo equivalente a geração de 34,6 milhões de metros cúbicos de metano ao ano, seguido por Caxias do Sul com o potencial de geração de 5.320 ton/ano de CH₄ ou 8,1 milhões de metros cúbicos de metano ao ano. Dentre os cinco municípios estudados, Canoas apresentou o terceiro maior potencial de geração de metano, com uma produção anual de 4.700 ton de CH₄/ano de acordo com os dados do IBGE do ano de 2021.

Esta geração seria equivalente a produção de 7,15 milhões de metros/cúbicos ao ano de metano, conforme mostrado na Figura 18 a seguir. Os municípios de Pelotas e Gravataí apresentaram uma capacidade de geração 3,83 mil e 3,50 mil toneladas ao ano de metano, respectivamente. Logo, os municípios de Pelotas e Gravataí possuem potencial de geração de 5,83 milhões de metano ao ano aproximadamente. De acordo com CIBiogás (2022), no ano de 2021 no Brasil havia cerca de 10 plantas de biometano no país, ou seja, 10 unidades de purificação de biogás, correspondendo a 23% do volume total de biogás gerado em 2021, com capacidade de produção de 435mil Nm³/dia de biometano, sendo equivalente energeticamente a geração de 378 mil litros de diesel ao dia. Considerando que 1Nm³ de biometano é equivalente energeticamente a geração de 0,87 litros de diesel, logo

seria possível produzir 19,8 mil litros de diesel em Porto Alegre, 4.628 litros em Caxias do Sul, 4 mil litros em Canoas, 3,3 mil litros em Pelotas e 3 mil litros em Gravataí aproximadamente.

O biometano pode ser utilizado como substituto do gás natural (GN), principalmente devido suas características, podendo ser distribuído em rede e armazenamento de GN já existente (SANTOS, 2017). O biometano pode ser utilizado como combustível doméstico tanto para fornecer calor na residência, quanto na cocção de alimentos, pode ser utilizado como combustível veicular em transportes aéreos, navais e automóveis. O metano também pode ser aplicado para geração de calor e eletricidade em unidades combinadas de calor e e energia- CHP (*Combined Heat & Power*). Pode ser utilizado em Células a Combustível (CaC), para a geração de eletricidade e injeção em automóveis como combustível veicular. Além de ser aplicado para a produção de compostos químicos e demais produtos, como na geração de metanol e de combustíveis sintéticos no processo de *Fischer-Tropsch* (SANTOS, 2017; GALVAGNO et al., 2013; DUNHAM et al., 2009).

Um estudo realizado por Da Paz e Firmo (2017) avaliando a geração de metano de locais provenientes de disposição de RSU no estado de Pernambuco, com uma população total de 8.796.448 habitantes, foi estimada para 2014 em 21.790 ton CH₄ e 161.986,5 ton CH₄ em 2032. Além disso, a comercialização de créditos de carbono com os aterros renderia cerca de 5,2 milhões de dólares por ano, contribuindo para a melhoria dos municípios do Estado. Lima (2015) estimou a geração de 38.496,44 ton CH₄/ano no aterro sanitário de João Pessoa na Paraíba no ano de 2015, com 723.515 habitantes.

A Figura 18 apresenta a proporção da geração de metano de RSU dos cinco municípios mais populosos do estado do RS:

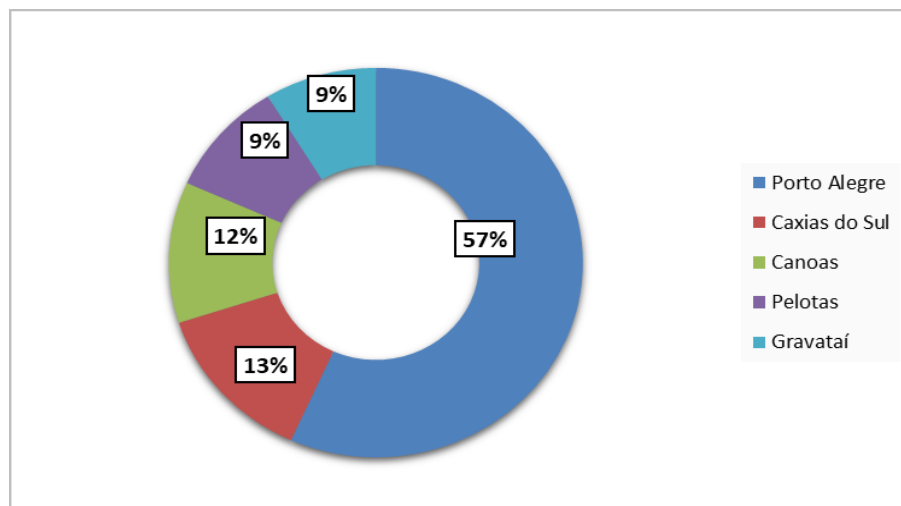


Figura 18- Proporção de geração dos resíduos.

O potencial teórico de geração de resíduos utilizado para os cinco municípios em conjunto resultou em 40 100 toneladas de gás metano ao ano, enquanto que no estado do RS esta estimativa resultou em uma geração de 135 mil tCH₄/ano. Em relação aos municípios, Porto Alegre apresentou o maior potencial de geração de metano 22 700 tCH₄/ano representando 57% da geração dos municípios, seguido por Caxias do Sul com a geração de 5 230 tCH₄/ano, representando 13% da geração total dos municípios. Canoas apresentou o terceiro maior potencial de 4 700 tCH₄/ano, representando 12% da produção estadual, seguido de Pelotas e Gravataí com a geração de 3830 e 3500 tCH₄/ano, respectivamente.

Os resultados obtidos através dos cálculos de potencial de metano nas principais cidades do Rio Grande do Sul, não são surpreendentes, sobretudo ao identificarem que a capital do estado é a cidade que possui maior potencial de geração de metano, haja vista que é o município mais populoso do estado e por consequência, é também o que mais produz resíduos, o que também resulta no maior potencial de geração de metano.

Outra evidencia que esse resultado nos mostra é em relação a quantidade de RSU orgânicos, que conforme a Figura 12, é o principal resíduo gerado, em todos os municípios analisados neste trabalho, e um fator predominante para isso é o aumento populacional, uma vez que os RSU orgânicos são em sua maioria, resíduos domésticos. Outro fator que impacta nos resultados sobre geração de RSU e sua destinação final é a questão econômica ao qual está inserido aquele município, uma

vez que quanto maior a renda maior será sua população e também seu consumo e geração de resíduos, (ABRELPE,2020).

A Tabela 5, apresenta a geração de metano em metros cúbicos e sua conversão em biogás, bem como a população e sua respectiva geração de resíduos ao ano:

Tabela 5. Geração de biogás por município

<i>Cidade</i>	<i>Pop (hab)</i>	<i>RSD (kg/hab/ano)</i>	<i>ECH₄ (kg/ano)</i>	<i>ECH₄ (m³/ano)</i>	<i>E_{biogás} (m³/ano)</i>
<i>Porto Alegre</i>	1.492.530	339,45	2,27E+07	3,46E+07	6,92E+07
<i>Caxias do Sul</i>	523.716	226,3	5,32E+06	8,10E+06	1,62E+07
<i>Canoas</i>	349.728	299,3	4,70E+06	7,15E+06	1,43E+07
<i>Pelotas</i>	343.826	248,2	3,83E+06	5,83E+06	1,17E+07
<i>Gravataí</i>	285.564	273,2	3,50E+06	5,83E+06	1,07E+07
<i>Rio Grande do Sul</i>	11.466.630	262,8	1,35E+08	2,06E+08	4,12E+08

As cinco cidades em conjunto poderiam produzir cerca de 61 milhões de metros cúbicos de metano e 122 milhões de metros cúbicos de biogás ao ano, correspondendo a 30% do potencial de produção de biogás estimado para o estado (Tabela 4) de 412 milhões de metros cúbicos de biogás ao ano. É possível observar também que embora Caxias do Sul, possua o segundo maior número de habitantes do estado, o município gera menor quantidade de resíduos (kg) por habitante ao ano 226,3 kg/hab/ano, quando comparado aos demais subsequentes: Canoas, Pelotas e Gravataí, fato que implica em uma geração de biogás semelhante entre estes quatro municípios. De acordo com os dados do CIBiogás, ocorreu um aumento de 16% de plantas de biogás no Brasil em 2021 e 10% de aumento no volume de biogás gerado, quando comparado a 2020. Atualmente há 755 plantas de biogás em operação

cadastradas no CIBiogás, gerando cerca de 2,3 bi Nm³/ano de biogás. O estado de Minas Gerais possui 251 plantas, Paraná 159 plantas e o Rio Grande do Sul com apenas 38 plantas, sendo o setor agropecuário responsável por cerca de 80% das plantas de biogás em operação. Entretanto, o setor de saneamento é responsável por cerca de 74% do volume total de biogás gerado, seguido pelo setor industrial com 16% e agropecuário com 10% (CIBIOGÁS, 2022). No ano de 2020 havia cerca de 57 plantas de RSU e ETE (Estações de Tratamento de Esgoto), gerando 1.342.221.982 Nm³ de biogás, correspondendo a 9% do total de plantas de biogás no país (CIBIOGÁS, 2021).

O biogás pode ser utilizado para geração de biometano para alimentação da própria frota veicular, ou injeção na rede gás natural, também pode ser utilizado para cogeração de energia térmica e elétrica ou apenas energia elétrica, além de ser utilizado para aquecimento de reatores ou em processos de secagem (Abiogás, 2022).

5.3 Geração de energia elétrica

Através da Equação (4) e a partir dos dados encontrados sobre geração de RSU nas principais cidades do RS, foi possível obter a determinação da potência de EE para estes municípios do estado.

A geração de energia para os municípios pode ser visualizada na Figura 19 o estado como um todo apresentou um potencial total de energia elétrica de 5,03 E+08 kWh/ano, enquanto o potencial dos municípios em conjunto foi estimado em 1,49E+08 kWh/ano, correspondendo a 30% do potencial total do RS. Ou seja, assim como o potencial energético dos RSUs, o potencial elétrico destes municípios, também apresenta crescimento.

Esta estimativa é bastante representativa dada a demanda cada vez maior em relação a energias que provenham de fontes renováveis. Bravaresco (2020) também encontrou em seu estudo potencial elétrico significativo, com estimativa de aumento na geração de metano e consequente aumento no potencial de geração de energia elétrica até o ano 2035.

De acordo com a Resolução Normativa Aneel nº 482/2012 o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e ainda passar o excedente para a rede de distribuição da sua localidade, sendo que, desde 2015 é permitido que o consumidor fique com créditos quando produzir mais energia

do que ele consumir em um período. O consumidor pode utilizar estes créditos para reduzir a fatura da conta de luz em até 60 meses, além de abater no consumo de unidades consumidoras do mesmo titular em outro local (BRAVARESCO, 2020).

A Figura 19 demonstra os dados obtidos a partir do cálculo de potencial elétrico dos municípios que de acordo com dados do SNIS (2021), são os municípios que mais geram RSU, e seu potencial de geração de energia elétrica a partir da geração de metano no estado do RS. Em um estudo realizado por De Brito et al., (2020), realizado no estado de Minas Gerais, constataram que é possível gerar energia elétrica em todos os aterros do estado que foram analisados pelo estudo, somente nos cálculos sobre geração de EE via digestão anaeróbia por exemplo, os autores concluíram que a quantidade total de energia elétrica gerada foi de 15,400 MWh/ano e a potência total instalada foi de 3.200 KW:

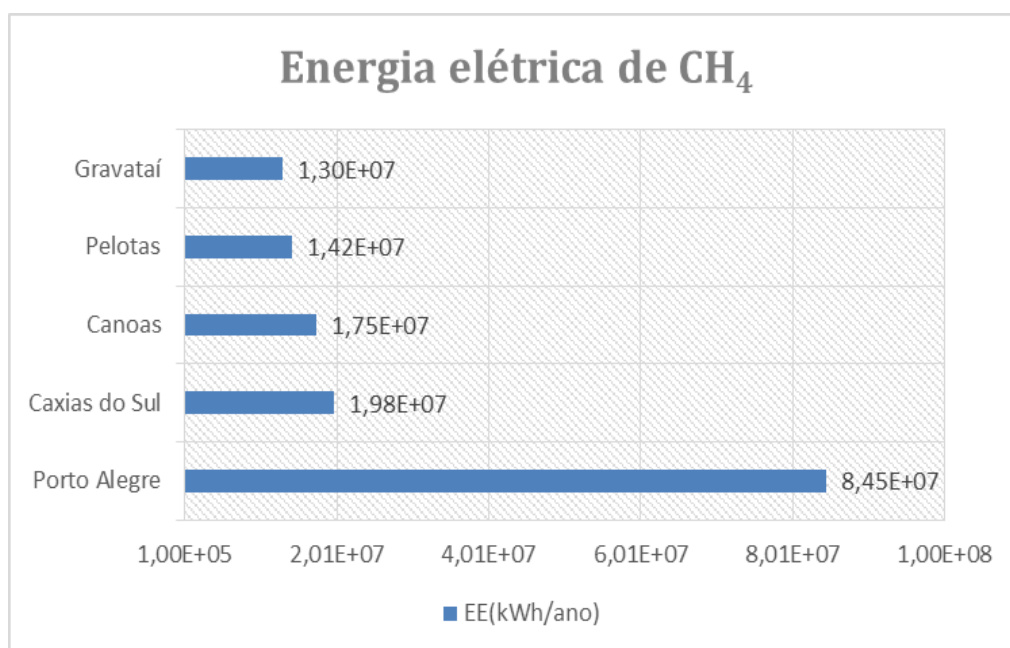


Figura 19 - Potencial elétrico (Ee) dos municípios em kWh/ano

O potencial energético do RS, segundo os indicadores calculados neste trabalho, está disposto na Figura 20, para este, foram calculados toda a geração de RSU do RS, onde observa-se o potencial energético do metano ECH₄ (m³/ano), bem como, o potencial energético do biogás Ebiogás (m³/ano) e o potencial energético elétrico Ee (KWh/ano). O potencial de energia elétrica, foi o maior encontrado, estimado em 5,03E+08, seguido pelo potencial energético do biogás, aqui estimado em 4,12E +08, enquanto o potencial do metano foi estimado em 2,06E +08 ao ano.

Os dados demonstram a importância deste estudo, na busca para que sejam utilizadas novas tecnologias que invistam na utilização de energias limpas, uma vez que estas, reduzem os gases de efeito estufa (GEE) contribuindo para a mitigação de mudanças climáticas.

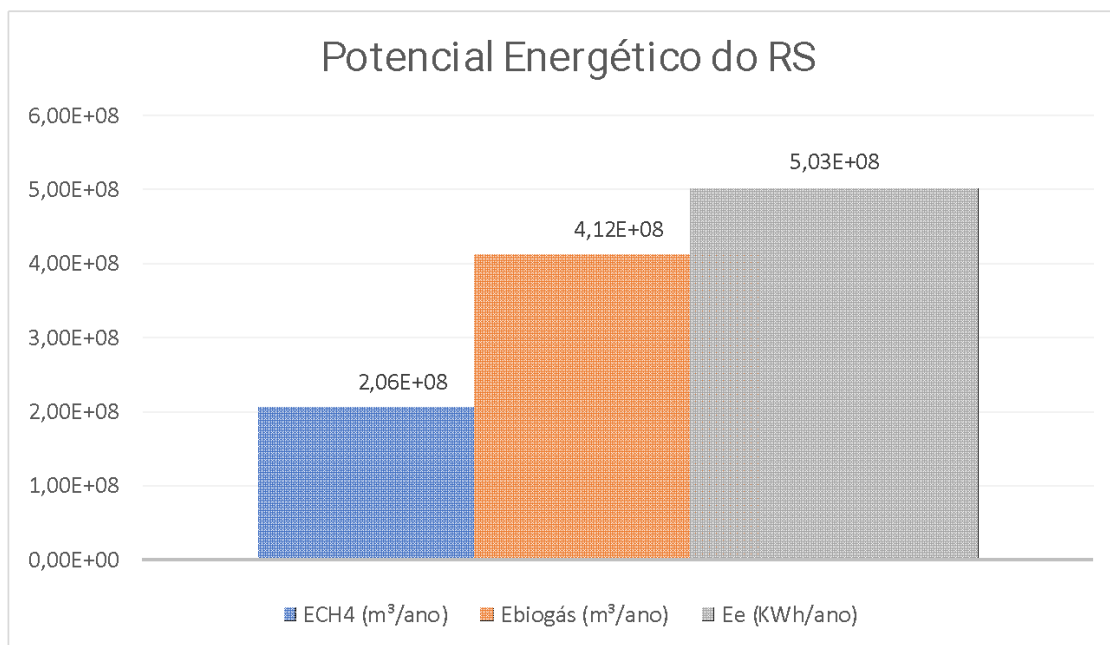


Figura 20- Potencial energético do RS, contabilizando toda a geração de resíduos do estado.

Fonte; Autora.

5.4 Créditos de Carbono

Para estimar o valor obtido das vendas dos créditos de carbono (Tabela 6), o preço de tonelada de carbono foi obtido do *site* investing.com (2022) em tempo real. Em 22 de dezembro de 2022 o valor do crédito estava em 86,63EUR, logo este valor de venda foi considerado, gerando os resultados mostrados na Tabela 6:

Tabela 6. Geração de Créditos de Carbono

Região	CO ₂ eq (t/ano)	EUR/ano
Porto Alegre	6,20E+05	5,37E+07
Caxias do Sul	1,45E+05	1,26E+07
Canoas	1,28E+05	1,11E+07
Pelotas	1,04E+05	9,05E+06
Gravataí	9,55E+04	8,27E+06

Rio Grande do Sul	3,69E+06	3,20E+08
-------------------	----------	----------

O valor que poderia ser obtido com a comercialização dos créditos de carbono, foi de 53,7 milhões de euros ao ano, em média 4,48 milhões ao mês para Porto Alegre, sendo equivalente a 292,66 milhões de reais ao ano, com a cotação de 1 euro estando a 5,45 reais. O município de Caxias do Sul poderia receber em torno de 68,67 milhões de reais ao ano (12,6 mi EUR/ano), seguido de Canoas arrecadando cerca de 11,1 mi EUR/ano (60,5 mi R\$/ano). Enquanto os municípios de Pelotas e Gravataí poderiam obter cerca de 9,05 e 8,27 milhões de euros ao ano, respectivamente. Estas vendas de créditos de carbono, contribuiriam para a evolução das cidades, sendo revertidos em investimentos em áreas carentes, investimentos em saneamento básico para reduzir a degradação ambiental e a saúde da população.

Além disso, seria possível investir em educação ambiental, infraestruturas para evitar danos causados por eventos extremos, além de reduzir o *payback time* da implantação da planta de biogás. Logo, além de contribuir com o meio ambiente, com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável do Acordo de Paris, de reduzir as emissões de GEE, mitigar as mudanças climáticas, o retorno financeiro por si só pagaria o investimento inicial, e o restante poderia ser aplicado diretamente pela prefeitura dos municípios nos projetos que necessitam de investimentos.

5.5 Análise Integradora

A principal proposta do aterro sanitário é minimizar os problemas causados pela geração de RSU. Porém, a partir da globalização, o aumento do consumo ficou evidente, sendo assim, para que a procura por soluções para a gestão dos RSU seja realizada de maneira que se priorize o meio ambiente, é necessário pensar em uma economia que considere não apenas os lucros, e sim, o desenvolvimento sustentável.

De acordo com a ABRELP o setor de RSU é transversal a diversas questões ambientais e é a partir dele que poderá acontecer a mitigação do impacto ambiental através de sua utilização com recuperação de fração orgânica com a compostagem e/ou com a digestão anaeróbia (ABRELP, 2020).

A Economia Circular permeia todas as atividades produtivas, de forma a tornar os produtos mais duráveis, reparáveis e atualizáveis, para permitir a remanufatura e

a reciclagem pela mesma indústria ou por outras. Desta forma, conseguimos entender a principal diferença entre a economia circular e a linear, que consiste no fato que, na economia circular, produtos, serviços e processos industriais são projetados e concebidos de forma que permitam um ciclo de vida mais longo, dentro e fora da cadeia produtiva possibilitando que sejam reparados, atualizados ou restaurados (BONCIU, 2014; FOSTER, ROBERTO e IGARI, 2016). Na Figura 21 podemos perceber a diferença nos dois modelos econômicos:

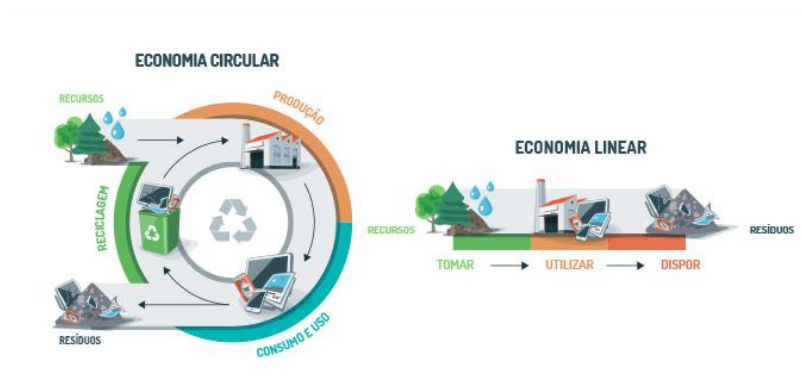


Figura 21- Modelos econômicos, circular e linear.

Fonte:Teraambiental (2021).

A prática de EC se deu a partir do crescimento industrial e consequente aumento de utilização de matéria prima, bem como aumento de descarte de RSU, esta prática tornou o modelo de Economia Linear, que é o modelo econômico utilizado até então, em uma prática inviável, despertando assim a necessidade de mudanças sobre o que estávamos habituados até então.

Quando relacionados os conceitos de bioeconomia e economia circular, compreendemos então, as implicações econômicas, sociais e ambientais das cadeias de biomassa e dos processos e produtos, e do quanto devemos pensa-los e implantá-los de maneira economicamente viável e ambientalmente correta. Diante disso, é necessário que compreendamos os benefícios gerados com a inserção de resíduos como matéria-prima para a geração de energia limpa. A importância da gestão ambientalmente correta é imprescindível, pensar no ciclo como um todo, não apenas na produção de um produto, e sim, desde a sua matéria prima, ao seu design, na sua produção, até a sua reinserção na cadeia produtiva e finalmente, na gestão e

destinação correta do resíduo proveniente deste processo, uma vez que desta forma se promove a eficiência dos recursos renováveis. Ao aplicar o conceito de economia circular, química verde e bioeconomia, estreita-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, e a partir deste, pode-se gerar inúmeras oportunidades à humanidade e ao meio ambiente (EMBRAPA, 2020).

A partir destas premissas, este trabalho em sua análise integradora, acredita que a implantação de EC nos aterros sanitários do estado do Rio Grande do Sul, proporcionaria não apenas a mitigação dos problemas causados pelo grande quantidade de resíduos dispostos nos aterros sanitários no mundo todo, mas principalmente, colaboraria com a transição para um modelo de capital econômico, natural e social, com base nos princípios de eliminação de resíduos e poluição desde o início, o corroboraria com a manutenção de produtos e materiais em uso e com a regeneração dos sistemas naturais.

A Figura 22 demonstra como o sistema de EC pode ser implantado em um aterro sanitário:

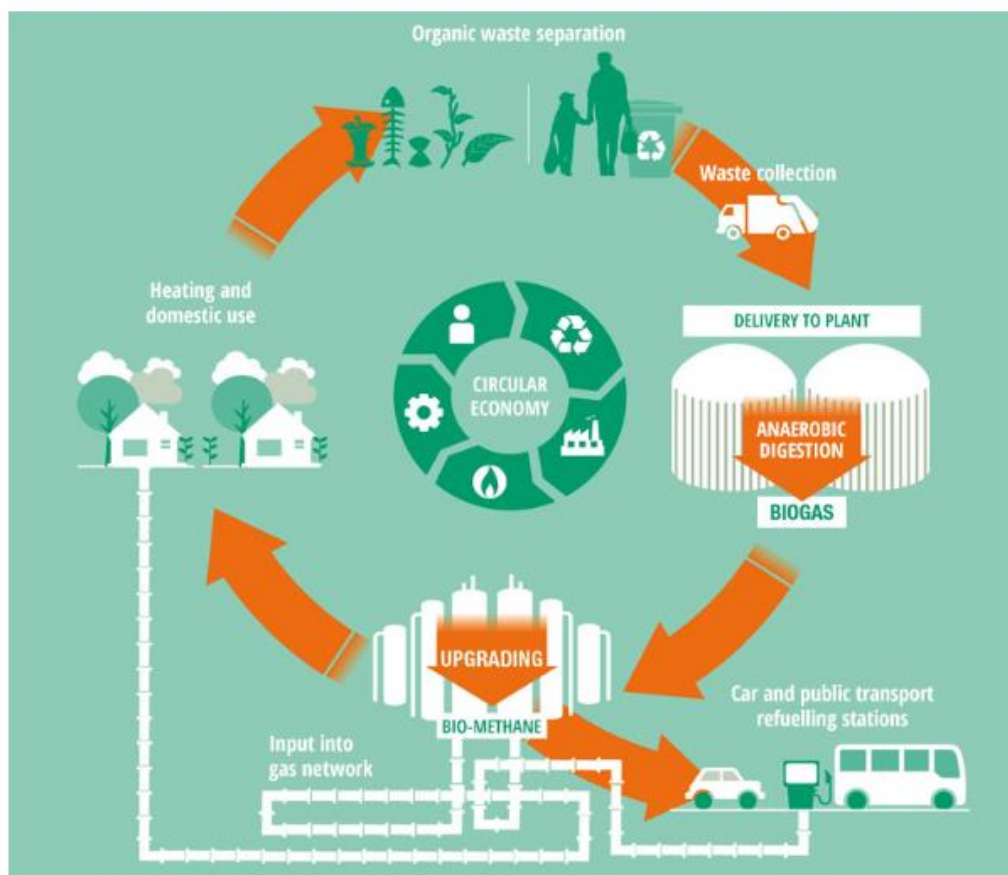


Figura 22- Modelo de EC no aterro sanitário.

Fonte: BIOMETHER (2017).

A implantação de um modelo de EC no aterro sanitário também possibilitaria a diminuição na demanda de energia elétrica no estado, a redução no volume de resíduos destinados a aterros e a redução das emissões de GEE. Uma vez que diminuindo a quantidade de RSU nos aterros sanitários, aumenta-se a sua vida útil e consequentemente, diminui a demanda territorial que estes empreendimentos necessitam. Além disso, é importante salientar o quão benéfico economicamente a implantação da EC pode ser para este setor, uma vez que com a energia gerada a partir de seus resíduos, é possível utilizá-la para suprir a demanda energética do próprio aterro, e também como combustível em seus veículos.

6 CONCLUSÕES

O número de publicações sobre a utilização de RSU como fonte de bioenergia, configura como um tema bastante utilizado nos estudos científicos disponibilizados na base de dados da *Scopus*, a rede de interligações entre palavras-chave utilizadas na busca, bem como os periódicos mais citados, e os países com maior volume de publicações, foi possível constatar que o tema está em crescente interesse pelos principais cientistas da área e vem ganhando relevância importante nos mais diferentes países do continente, o Brasil, principalmente após o ano de 2017, configura como um dos que mais publicam e/ou é citado sobre o tema.

O potencial energético dos resíduos sólidos urbanos no estado do Rio Grande do Sul, não surpreende, uma vez que, demonstra Porto Alegre, a capital do Estado, como a cidade com maior potencial energético do estado, uma vez que também é mais populosa, inclusive, a relação entre a quantidade de geração de resíduos orgânicos, está diretamente relacionada ao aumento populacional, haja vista que, os municípios que produzem maior quantidade de resíduos orgânicos, são também, os que possuem maior renda e conseqüentemente, maior número de habitantes.

O potencial de geração de energia elétrica dos cinco municípios mais populosos do estado, demonstrou que somados as estimativas individuais destes juntos eles representam 30% do potencial total de energia elétrica do estado, ou seja, assim como o potencial energético dos RSU, o potencial elétrico destes municípios também apresentou crescimento.

Sobre os créditos de carbono, com os dados obtidos através dos cálculos, foi possível constatar que a venda de créditos de carbono, contribuiria com as demandas financeiras do aterro sanitário e do próprio município onde este está instalado, além de contribuir com demandas sociais importantes da região, e do meio ambiente, afinando-se com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável do Acordo de Paris, de reduzir as emissões de GEE, e de mitigar as mudanças climáticas,

Sem dúvida, repensar o modelo econômico ao qual estamos acostumados, buscando a transição para o modelo de economia circular, além de incorporar as energias renováveis cada vez mais, é pensar em um futuro mais sustentável, para isso, é necessário que investimentos sejam realizados, sobretudo em pesquisas científicas que possam encontrar cada vez mais caminhos para que possamos nos adequar ao um futuro mais social e economicamente mais equilibrado.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SHAFY, H. I.; MANSOUR, M. SM. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian journal of petroleum**, v. 27, n. 4, p. 1275-1290, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>. Acesso em: 20 de out. 2021.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004:

Resíduos Sólidos – Classificação. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=936>. Acesso em: 12 de setembro de 2021.

ACEMOGLU, D.; KAKHBOD, A.; OZDAGLAR, A. Competition in electricity markets with renewable energy sources. **The Energy Journal**, v. 38, n.1, 2017.

AGUSTINI, Caroline Borges. **Co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos de curtumes**. 2018.

ALHOLA, Katrina et al. Exploiting the potential of public procurement: Opportunities for circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 96-109, 2019.

ANDRADE, Natália Barbosa. **Análise bibliométrica de resíduos sólidos utilizando o software R na interface RStudio e a rotina operacional Bibliometrix**. TCC de Graduação e Engenharia Ambiental, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Disponível em <https://abrelpe.org.br/panorama-2020>. Acesso em: 10 out. 2022.

AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. **Applied energy**, v. 201, p. 200-218, 2017.

BALL, R. Bibliometric methods: Basic principles and indicators. **An introduction to bibliometrics**: New developments and trends, 2018, 15-56.

BINGEMER, H.G. AND CRUTZEN. The production of methane from solid wastes. **Journal of Geophysical Research** 92(D2). 1987.

BONCIU, F. The European Economy: From a Linear to a Circular Economy, [Economia europeană: de la o economie liniară la una circulară]. **Romanian Journal of European Affairs**, v. 14, n. 4, 2014.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Brasília, DF, 1986.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e Esgoto – 2021**. Brasília: SNIS, 2021.

Brasília: MME/EPE. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/ptbr/assuntos/noticias/ResenhaEnergticaExerccio2020final.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2022.

BAVARESCO, Mauricio. **Análise do potencial de geração de energia elétrica oriundo do biogás gerado a partir dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul-RS**. 2020.

_____. Presidência da República. **Casa Civil. Lei n. 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. 2010.

_____. Senado Federal. Resíduos sólidos: os lixões persistem. In: **Revista em Discussão!** Ano 5, n. 22, set. 2014.

BAHOO, Salman; ALON, Ilan; PALTRINIERI, Andrea. Sovereign wealth funds: Past, present and future. **International Review of Financial Analysis**, 2020, 67: 101418.

BAHOO, Salman, et al. Role of China-Pakistan economic corridor in Pakistan's trade, investment, energy, infrastructure, and stock market. *Journal of Independent Studies and Research-Management*, **Social Sciences and Economics**, 2018, 16.1: 63-84.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES / RiMa, 294 p., 2003.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2010.

CHUN-HAO, Chiang; JIAN-MIN, Yang. A bibliometric study of financial risk literature: a historic approach. **Applied Economics**, 2012, 44.22: 2827-2839.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás Panorama do Biogás no Brasil 2021. **CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022** – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2022.

CIBIOGÁS. **Nota Técnica: Nº 001/2021** – Panorama do Biogás no Brasil 2020. Foz do Iguaçu, Março de 2021.

COELHO, S. T.; SILVA, O. C.; VARKULIA, A. JR.; AVELLAR, L. H. N.; FERLING, F. F. **Estado da arte do biogás. Relatório de acompanhamento**. Centro nacional de referência em biomassa. São Paulo, 2001.

COTTA, J. A. de O.; CARVALHO, N. L. C.; BRUM, T. S.; REZENDE, M. O. O. Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, p. 65-78, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000111864>>. Acesso em: 03 de nov. 2022.

CREUTZIG, F.; RAVINDRANATH, N. H.; BERNDEN, G.; BOLWIG, S.; BRIGHT, R. CHERUBINI, F.; CHUM, H.; CORBERA, E.; DELUCCHI, M.; FAAIJ, A.; FARGIONE, J.; HABERL, H.; HEATH, G.; LUCON, O.; PLEVIN, R.; POPP, A.; ROBLEDO-ABAD,

C.; ROSE, S.; SMITH, P; STROMMAN, A.; SUH, S.; SERA, O. A. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. **GCB Bioenergy**, v. 7, p.916–944, 2015.

DAMASCENO, Larissa Aparecida Góes. **Emissão fugitiva de metano através do sistema de cobertura de um aterro sanitário considerando a ocorrência de zonas com fissuramento**. 2018.

DAS NEVES, L. C. M.; CONVERTI, A.; PENNA, T. C. V. **Biogas Production: New Trends for Alternative Energy Sources in Rural and Urban Zones**. **Chemical Engineering & Technology**, v. 32, n. 8, p. 1147–1153, 2009.

DA Tera, 2022PAZ, Diogo Henrique Fernandes; FIRMO, Alessandra Lee Barbosa. Estimativa da geração de metano proveniente dos locais de disposição final de RSU em Pernambuco seguindo as diretrizes do Plano Estadual de Resíduos Sólidos. **Revista DAE**, v.66, n.211, 2017.

DE BELLIS, Nicola. Bibliometrics and citation analysis: from the science citation index to cybermetrics. **scarecrow press**, 2009.

DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: DESCUBRA A RELAÇÃO ENTRE GESTÃO DE RESÍDUOS E ECONOMIA CIRCULAR.. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/desenvolvimento-sustentavel-relacao-entre-gestao-de-residuos-e-economia-circular>. Acesso em: 23 fev.2022.

DREIDY, M.; MOKHLIS, H.; MEKHILEF, S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.69, p.144-155, 2017.

DUARTE, Elizabeth d’Almeida Duarte. **O Contributo da Digestão Anaeróbia para o Aumento da Competitividade do Setor Agropecuário**. 2017.

DUNHAM, F. B.; BOMTEMPO, J. V.; ALMEIDA, E. L. F. de. Trajetórias Tecnológicas em Combustíveis Sintéticos: análise dos mecanismos de seleção e indução. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 5, n. 1, p. 99–129, 2009.

ENGELMANN, Pâmela de Medeiros. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Xangri-lá**. 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, (2013). **Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition**. (Retrieved from: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf)

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais**: Uma abordagem sustentável. Embrapa Agroenergia, [s. l.], p. 26, 2020. Disponível em:
<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126255>> Acesso em: 28 Set. 2021.

ENSINAS, Adriano Viana et al. Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas/SP. **Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. tracer method based on FTIR absorption spectroscopy. Environ. Sci. Technol**, v. 35, n. 1, p. 21-25, 2003.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2017**: Ano base 2016. Rio de Janeiro, 2017.

FERRARESE, Julia Carolina Bevervanso Borba. **Potencial de geração de energia a partir da digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos oriundos do abate de bovinos**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FERREIRA PINTO, C. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável: O Uso de Fontes Alternativas de Energia**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, USP, 224p., 2009.

FERNANDES, Juliana Goncalves. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental. 2009.**

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Verdi de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica-Estudo de caso.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FIRMO, A.L.B. (2006). **Análise comportamental de parâmetros físico-químicos e geração de gás numa célula experimental no Aterro da Muribeca-PE.** Trabalho de conclusão de curso. Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 79 p

FIRMO, Alessandra Lee Barbosa. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos.** 2013.

FOSTER, Allan; ROBERTO, Samanta Souza; IGARI, Alexandre Toshio. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. **Encontro internacional sobre gestão empresarial e meio ambiente, São Paulo, 2016.**

GALVAGNO, Antonio et al. Biogas as hydrogen source for fuel cell applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 10, p. 3913-3920, 2013.

GÊNERO, Laura Cristina et al. Produção de hidrogênio a partir do biogás. *Acta Iguazu*, V. 2, N. 1, P. 29-42, 2013.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 1987

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, L. M.; CORREA, D. F.; RYAN, S.; JENSEN, P. D.; PRATT, S.; SCHENK, P. M. Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, part 1, p.1137-1148, 2018.

GOYAL, Kirti; KUMAR, Satish. Financial literacy: **A systematic review and bibliometric analysis**. *International Journal of Consumer Studies*, 2021, 45.1: 80-105.

GUZMÁN, Júlia Rodrigues. **PROPOSIÇÃO DE DIRETRIZES PARA A AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DE ATERROS SANITÁRIOS NO BRASIL**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

HOBSON, K., LYNCH, N., 2016. **Diversifying and de-growing the circular economy: radical social transformation in a resource-scarce world**. *Futures* 82, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2016.05.012>

HOMRICH, A.S., GALVÃO, G., ABADIA, L.G., CARVALHO, M.M., 2018. **The circular economy umbrella: trends and gaps on integrating pathways**. *J. Clean. Prod.* 175, 525–543. Johansson, N., Henriksson, M., 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE: cidades**: Todas as cidades: RS. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IPCC - International Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Inventories: **Reference Manual – Volume 3 – Waste**. 1996a. Available in: <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>. Access: jul 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Solid waste disposal. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, v. 5, p. 1-40, 2006.

KHOLIDAH, Himmatul, et al. **A Bibliometric mapping of peer-to-peer lending research based on economic and business perspective**. *Heliyon*, 2022, e11512.

KIRCHHERR, J. et al. (2017). **Conceptualising the circular economy: An analysis of 114 definitions**. *Resources, Conservation & Recycling* 221-232 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

KNICKMEYER, D., 2020. **Social factors influencing household waste separation: a literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas**. *J. Clean. Prod.* 245.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 407–422, 2017.

LEOPOLD, L. et al. **A Procedure for Evaluating Environmental Impact**. [S.l.], 1971.

LIMA, Thaís Cordeiro Queiroz de O. **Estimativa de emissão de metano a partir da degradação de resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa/Paraíba**, 2015. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1884/57465>>

MELERO, Paula Abad. **Valorização de resíduos agro-industriais por processos de digestão anaeróbia**. Tese de Doutorado. 00500:: Universidade de Coimbra, 2015.

MOREIRA, Renata et al. Patentes depositadas em âmbito nacional como indicador de desenvolvimento das tecnologias de produção de hidrogênio. **Química nova**, v. 36, n. 5, p. 748-751, 2013.

MURRAY, A., SKENE, K., HAYNES, K., 2017. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. **J. Bus. Ethics** 140, 369–380.

NADALETI, Willian César. **Aproveitamento de biogás, hidrogênio e gás de síntese no setor de transporte público e agroindustrial de arroz: estudo de potencial energético de resíduos e emissões de poluentes (Tese de Doutorado)**. Biogas, hydrogen and syngas utilization in the public transport sector and rice agroindustry: study of energy potential of waste and pollutant emissions. 2017.

NESS, D., 2008. **Infraestrutura urbana sustentável na China: em direção a um fator 10 melhoria na produtividade dos recursos através do sistema integrado de infraestrutura**. Int. J. Sustain. Dev. World Ecol. 15, 288e301.

OLIVEIRA, Thais Brito de; GALVÃO JUNIOR, Alceu de Castro. Planejamento municipal na gestão dos resíduos sólidos urbanos e na organização da coleta seletiva. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 55-64, 2016.

OLIVEIRA, Selene de; PASQUAL, Antenor. Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 9, n. 3, p. 240-249, 2004.

OLK, Paul; GRIFFITH, Terri L. Creating and disseminating knowledge among organizational scholars: The role of special issues. **Organization Science**, 2004, 15.1: 120-129.

PAGANI, R. et al. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, p. 1–27, 2015.

PARK, J.-K.; KANG, J.-Y.; LEE, N.-H. Estimation of methane emission flux at landfill surfasse using laser methane detector: Influence of gauge pressure. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 8, p. 784-792, 2016.

PEIXOTO, G. **Produção de hidrogênio em reator anaeróbio de leito fixo e fluxo ascendente a partir de água residuária de indústria de refrigerantes**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2008.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, JOSÉ ALCIONE. **Mapa do Conhecimento Gestão Residual**. 2015.

PHAM, T. P. T. *et al.* Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions. **Waste management**, v. 38, p. 399-408, 2015.

PRITCHARD, Alan. Statistical bibliography or **bibliometrics**. **Journal of documentation**, 1969, 25: 348.

PWC; SELURB. PricewaterhouseCoopers. Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana. **Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana**. 2019.

RACHOR, I. *et al.* Assessment of the methane oxidation capacity of compacted soils intended for use as landfill cover materials. **Waste Management**, Houston, v. 31, n. 5, p. 833-842, 2011.

RAPOSO, F. *et al.* Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 16, n. 1, p. 861-877, 2012.

REGGINATO, Romelito. **Modelamento matemático da trajetória e tempo de chegada dos contaminantes na área do aterro de resíduos sólidos urbanos de Candiota-RS**. 2018.

REIS, Mariza Fernanda Power; ELLWANGER, Rosa Maria; GONÇALVES JUNIOR, Nelson. 360-**CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE/RS—ANO 2002**. 2003.

ROJAS, M. D. P. A. **Influência da relação C/N na produção de hidrogênio em reator anaeróbio de leito fixo**. 2010. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

RUSYDIANA, Aam Slamet; SUKMANA, Raditya; LAILA, Nisful. Waqf on education: a bibliometric review based on Scopus. **Libr Philos Pract**, **2021**, 2021.June: 5537.

SAGHIR M., EL MAHI CHBIHI M., TAHIRI M., NAIMI Y. 2018. Estimated Production of Electrical Energy for the Controlled Landfill in Fez (Morocco) by the Land-GEM Model of US EPA. *American Journal of Earth Science and Engineering*, 1(2), 137–142.

SANTOS, D. G.; TURNES, C. G.; CONCEIÇÃO, F. R. Bioremediation of Parboiled Rice Wastewater Supplemented with Biodiesel-Derived Glycerol Using *Pichia pastoris* X-33. **Scientific World Journal**, v. 2012, 2012. DOI: 10.1100/2012/492925.

SANTOS, J. I.; ROGÉRIO, F.; MIGLIAVACCA, R. A.; et al. **Efeito da Adubação Potássica na Cultura do Crambe**. **Biosci. J.**, v.28, n.3, p.346- 350, 2012.

SANTOS, Mariana Cristina Vilaça. **Metano como forma de energia renovável**. 2017.

SCHILDT, Henri A.; ZAHRA, Shaker A.; SILLANPÄÄ, Antti. Scholarly communities in entrepreneurship research: A co-citation analysis. **Entrepreneurship theory and practice**, 2006, 30.3: 399-415.

SIDDIKI, Sk Yasir Arafat et al. Theoretical calculation of biogas production and greenhouse gas emission reduction potential of livestock, poultry and slaughterhouse waste in Bangladesh. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 3, p. 105204, 2021.

SILVA, Alessandra Cristina. Tratamento do percolado de aterro sanitário e avaliação da toxicidade do efluente bruto e tratado. **Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. Dissertação de Mestrado, 126p**, 2002.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis: Apostila da UFSC, 2001.

SILVA PEREIRA, Suellen; CATÃO CURI, Rosires. Aplicação do índice de qualidade de aterros de resíduos sólidos urbanos no Aterro Sanitário de Puxinanã/PB. **Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate**, v. 8, n. 1, 2017.

SILVESTRE, G.; FERNÁNDEZ, B.; BONMATÍ, A. Addition of crude glycerine as strategy to balance the C/N ratio on sewage sludge thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion. **Bioresource technology**, v. 193, p. 377-385, 2015.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO (SNIS). **Do SNIS ao SINISA Informações para o planejar o Manejo de Resíduos Sólidos: Diagnóstico SNIS-RS 2019. 2020. Disponível em:** <<http://antigo.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2019>> Acesso em: 23 Out. 2022.

STAHEL, W., 2010. **The Performance Economy**, segunda ed. Palgrave-MacMillan, Londres. 350 páginas, ISBN 978-0-230-58466-2 (primeira edição 2006).

STAHEL, W.R., 2013. **Política de eficiência material e tributação sustentável como saída de uma sociedade descartável**. Phyl. Trans. R. Soc. A 371, 20110567.

SUÁREZ, J.L.R., 2014. **Producción de biogás a partir de biomasa de microalgas Scenedemos sp. procedente de diferentes procesos**. Tese doutoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España.

TEIXEIRA, Cláudia Echevengúá et al. Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 99-108, 2009.

TETRAPLAN, ARCADIS. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto)**, visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. **Acesso em**, v. 15, p. 36, 2012.

VAN ECK, N.; WALTMAN, L. **VOSviewer manual**: manual for VOSviewer Version 1.6.6. Netherlands: Leiden University, 2020

VALENZUELA-INOSTROZA, Juan; ESPINOZA-PÉREZ, Andrea; ALFARO-MARCHANT, Miguel. Diseño de la cadena logística inversa para modelo de negocio de economía circular. **Ingeniería Industrial**, v. 40, n. 3, p. 306-315, 2019.

VENCE, Xavier; PEREIRA, Ángeles. Eco-innovación y modelos de negocio circulares como facilitadores de una economía circular. **Contaduría y administración**, v. 64, n. SPE1, p. 0-0, 2019.

WANG, YI; MU, YANG; YU, HAN-QING. Comparative performance of two upflow anaerobic biohydrogen-producing reactors seeded with different sludges. **International journal of hydrogen energy**, V. 32, N. 8, P. 1086-1094, 2007.

WANGA, J.; FENGA, L.; TANGA, X.; BENTLEYB, Y.; HÖÖKC, M. The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections: A supply-side analysis. **Futures**, v.86, p.58-72, 2017.

WILLIAMS, P. T. **Waste Treatment and Disposal**. 2nd. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

YONG-HAK, Jo. The definitive resource for global research web of science access powerful cited reference searching and multidisciplinary content. **Thomson Reuters: Toronto, ON, Canada**, 2019.

ZHANG, Dayong; ZHANG, Zhiwei; MANAGI, Shunsuke. A bibliometric analysis on green finance: Current status, development, and future directions. **Finance Research Letters**, 2019, 29: 425-430.