

Influência de Agrotóxicos na Produção de Biogás
Pela Digestão Anaeróbia: Uma Revisão
Bibliométrica

Douglas Pereira Reis

Porto Alegre

2025

Douglas Pereira Reis

**INFLUÊNCIA DE AGROTÓXICOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS
PELA DIGESTÃO ANAERÓBIA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA**

Trabalho referente à disciplina de Trabalho de Conclusão
do Curso de Engenharia Ambiental realizado na
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a Orientadora: Maria Cristina de Almeida Silva

Porto Alegre, Janeiro de 2025

CIP - Catalogação na Publicação

Reis, Douglas Pereira
Influência de Agrotóxicos na Produção de Biogás
Pela Digestão Anaeróbia: Uma Revisão Bibliométrica /
Douglas Pereira Reis. -- 2025.
44 f.
Orientadora: Maria Cristina de Almeida Silva.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2025.

1. Produção de Biogás. 2. Digestão Anaeróbia. 3.
Tratamento de Efluentes. 4. Revisão Bibliométrica. 5.
Uso de Agrotóxicos. I. Silva, Maria Cristina de
Almeida, orient. II. Título.

Douglas Pereira Reis

**INFLUÊNCIA DE AGROTÓXICOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS
PELA DIGESTÃO ANAERÓBIA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA**

Trabalho referente à disciplina de Trabalho de Conclusão
do Curso de Engenharia Ambiental realizado na
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aprovado em: Porto Alegre, 10 de Janeiro de 2025.

Prof^a Dra. Maria Cristina de Almeida Silva – IPH/UFRGS

Orientadora

M^a Maria Teresa de Jesus Camelo Guedes

Examinadora

Prof. Dr. Maurício Andrades Paixão - IPH/UFRGS

Examinador

Porto Alegre, Janeiro de 2025

1. Resumo

A contaminação de recursos hídricos e efluentes por agrotóxicos é uma realidade no Brasil e no mundo. Porém, os métodos convencionais de tratamento são considerados ineficientes na remoção desses poluentes, que podem afetar a digestão anaeróbia em reatores biológicos, interferindo negativamente na produção de biogás. Este trabalho tem como objetivo verificar o estado da arte sobre a interferência na produção de biogás, a partir do tratamento de efluentes pela presença de pesticidas, através de uma pesquisa bibliométrica. Utilizando o método bibliométrico Proknow-C, foram selecionados 18 dos 88 artigos encontrados após pesquisa na base SciVerse Scopus, de acordo com o alinhamento do título e do conteúdo ao tema da pesquisa, utilização da Regra de Pareto baseando-se no número de citações, o ano de publicação e o envolvimento de autores reconhecidos, que foram determinados pelos artigos selecionados pelo segundo critério. Os países que mais possuem estudos sobre o tema são China e Índia, o que era esperado, devido ao seu longo histórico na produção de biogás. Porém, chama atenção o fato de não terem sido encontrados estudos realizados no Brasil, que é o maior consumidor de agrotóxicos do mundo atualmente. Estes estudos mostraram, em particular, que o emprego de reatores anaeróbios eletroquímicos de membranas, decantadores de alta velocidade inseridos em reatores UASB (Cobertura de Lodo Anaeróbio de Fluxo Ascendente) e consórcios entre microalgas vêm se mostrando promissores para remoção de agrotóxicos possivelmente prejudiciais à produção de biogás e devem ser alvo de mais estudos para comprovar sua eficiência. Também, ainda há poucos estudos sobre a possível toxicidade desses agroquímicos para os micro-organismos que realizam a digestão anaeróbia. Recomenda-se, então, que a pesquisa bibliométrica se expanda para outras bases de dados, como Web of Science, SciELO, entre outras que podem ser acessadas pelo Portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Também recomenda-se que as metodologias sejam estudadas na questão de seus custos de implantação e operação. Por último, em se tratando de Brasil, recomenda-se que sejam feitos estudos com todos os agrotóxicos que estão entre os mais utilizados no país, com destaque para o glifosato, por seu grande potencial de eutrofização de corpos d'água.

Palavras-chave: Bioreatores, Biogás, Metano, Esgotos, Bibliometria, Proknow-C, Digestão Anaeróbia, Anaerobiose.

2. Abstract

Contamination of water resources and effluents by pesticides is a reality in Brazil and worldwide. However, conventional treatment methods are considered inefficient in removing these pollutants, which can affect anaerobic digestion in biological reactors, negatively interfering with biogas production. This study aims to verify the state of the art on the interference in biogas production, from effluent treatment by the presence of pesticides, through a bibliometric research. Using the Proknow-C bibliometric method, 18 of the 88 articles found after research in the SciVerse Scopus database were selected according to the alignment of the title and content with the research topic, use of the Pareto Rule based on the number of citations, the year of publication and the involvement of recognized authors, which were determined by the articles selected by the second criterion. The countries that have the most studies on the subject are China and India, which was expected, due to their long history in biogas production. However, it is noteworthy that no studies were found in Brazil, which is currently the largest consumer of pesticides in the world. These studies have shown, in particular, that the use of anaerobic electrochemical membrane reactors, high-speed decanters inserted in UASB (Upflow Anaerobic Sludge Cover) reactors, and microalgae consortia have shown promise for the removal of pesticides that may be harmful to biogas production and should be the subject of further studies to prove their efficiency. Furthermore, there are still few studies on the possible toxicity of these agrochemicals to microorganisms that perform anaerobic digestion. It is therefore recommended that the bibliometric research be expanded to other databases, such as Web of Science, SciELO, among others that can be accessed through the CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) Journal Portal. It is also recommended that methodologies be studied in terms of their implementation and operating costs. Finally, in the case of Brazil, it is recommended that studies be carried out on all pesticides that are among the most widely used in the country, with emphasis on glyphosate, due to its great potential for eutrophication of water bodies.

Keywords: Bioreactors, Biogas, Methane, Sewage, Bibliometrics, Proknow-C, Anaerobic digestion, Anaerobiosis.

3. Lista de Gráficos

- Gráfico 1 - PIB do agronegócio brasileiro entre 2002 e 2022;
- Gráfico 2 - PIB do agronegócio gaúcho entre 2002 e 2022;
- Gráfico 3 - Maiores consumidores de agrotóxicos no mundo em 2022;
- Gráfico 4 - Percentual dos artigos selecionados por país.

4. Lista de Figuras

- Figura 1 - Fluxograma das etapas da digestão anaeróbia;
- Figura 2 - Fluxograma das etapas do método Proknow-C;
- Figura 3 - Mapa bibliométrico de palavras-chave;
- Figura 4 - Gráficos da produção de biogás e rendimento dos reatores eletroquímico e convencional;
- Figura 5 - Gráfico da concentração de biomassa para cada analito após 0, 2 e 7 dias do início dos experimentos (TSS: Sólidos Suspensos Totais; Blank: Branco; Microalgae: microalgas; CHL: Clorpirifós; CYP: Cipermetrina e OXA: Oxadiazona).

5. Lista de Tabelas

- Tabela 1 - Agrotóxicos mais utilizados no Brasil em 2022;
- Tabela 2 - Acesso ao esgoto nas cinco regiões do Brasil em 2022;
- Tabela 3 - Composição média do biogás;
- Tabela 4 - EC50 e concentrações residuais dos herbicidas analisados por Czarny et al (2019);
- Tabela 5 - Portifólio bibliográfico final
- Tabela 6 - Produção de biogás e porcentagem de metano produzido pelos reatores R1 e R2;
- Tabela 7 - Biodegradação dos agrotóxicos pelo consórcio de microalgas;
- Tabela 8 - Potencial de produção de metano para o substrato contendo concentrações residuais dos agrotóxicos analisados;
- Tabela 9 - Substrato utilizado no estudo de Donlon et al (1995);
- Tabela 10 - Concentrações inibitórias dos compostos estudados.

Sumário

1. Resumo	3
2. Abstract	4
3. Lista de Gráficos	5
4. Lista de Figuras	6
5. Lista de Tabelas	7
6. Introdução	8
7. Objetivos	9
7.1. Objetivo Principal.....	9
7.2. Objetivo Específico.....	9
8. Referencial Teórico	10
8.1. Agronegócio.....	10
8.2. Agroquímicos.....	11
8.3. Esgotos domésticos.....	13
8.4. Tratamento de Esgotos.....	14
8.5. Biogás.....	17
8.5.1. Biogás no Brasil.....	18
8.5.2. Formação do Biogás.....	19
8.5.3. Composição do biogás.....	22
8.5.4. Agrotóxicos e Biogás.....	23
9. Metodologia	25
10. Resultados e Discussão	26
11. Conclusões	39
11.1. Recomendações Para Trabalhos Futuros.....	39
12. Referências	40

6. Introdução

Atualmente, segundo a ONU, a população mundial é de 8,2 bilhões de habitantes, mas é esperado que esse número atinja a marca de 10,3 bilhões em 2080. Com o aumento desordenado da população em um planeta com recursos finitos como a Terra, também cresce a pressão por recursos, como água, riquezas minerais, terra e a produção de alimentos. Buscando aumentar a produtividade agrícola, surgiu o advento dos pesticidas, substâncias produzidas artificialmente de forma a inibir a proliferação de plantas indesejadas, insetos prejudiciais e outros organismos patogênicos que afetam o rendimento da agricultura.

Contudo, essas substâncias, quando aplicadas sem o manejo correto, podem causar vários problemas ambientais, contaminando cursos d'água, prejudicando organismos benéficos para as plantas e problemas de saúde humana. O problema se torna mais significativo com o fato de que os agrotóxicos não são removidos com a tecnologia convencional de tratamento de água aplicada no Brasil - etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração - e de efluentes - sistema de lagoas anaeróbias, facultativas, ou de lodos ativados e reatores anaeróbios convencionais. O motivo principal é o fato de esses poluentes se encontrarem normalmente em concentrações baixas (na ordem de micro ou nanogramas por litro) e serem recalcitrantes, ou seja, não são facilmente biodegradadas.

A presença desses compostos pode também interferir na produção de biogás, um recurso renovável utilizado como fonte de energia alternativa aos combustíveis fósseis e as hidrelétricas. Esse recurso vem sendo bastante explorado nas últimas décadas a nível mundial, com destaque para China e Índia.

7. Objetivos

7.1. Objetivo Principal

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal verificar o estado da arte sobre a interferência da presença de agrotóxicos na produção de biogás a partir do tratamento de efluentes através de uma pesquisa bibliométrica.

7.2. Objetivo Específico

Este estudo também propõe, como objetivo específico, avaliar a eficiência de métodos de tratamento na degradação anaeróbia destes contaminantes e seu efeito na produção de biogás.

8. Referencial Teórico

8.1. Agronegócio

Segundo a Organização das Nações Unidas Para Alimentação e Agricultura (FAO), a produção de alimentos no mundo terá de aumentar em 70%, em relação à quantidade produzida em 2009, para suprir as necessidades da população global em 2050, quando esta deverá atingir a marca de 9,1 bilhões de pessoas. No Brasil, a situação não é diferente, visto que a produção agrícola atingiu um PIB de 2,58 trilhões de reais em 2023, um aumento de 1,53% em relação à produção de 2022. (CEPEA, 2023). O Gráfico 1 mostra o crescimento do PIB do agronegócio no Brasil nos últimos 30 anos:

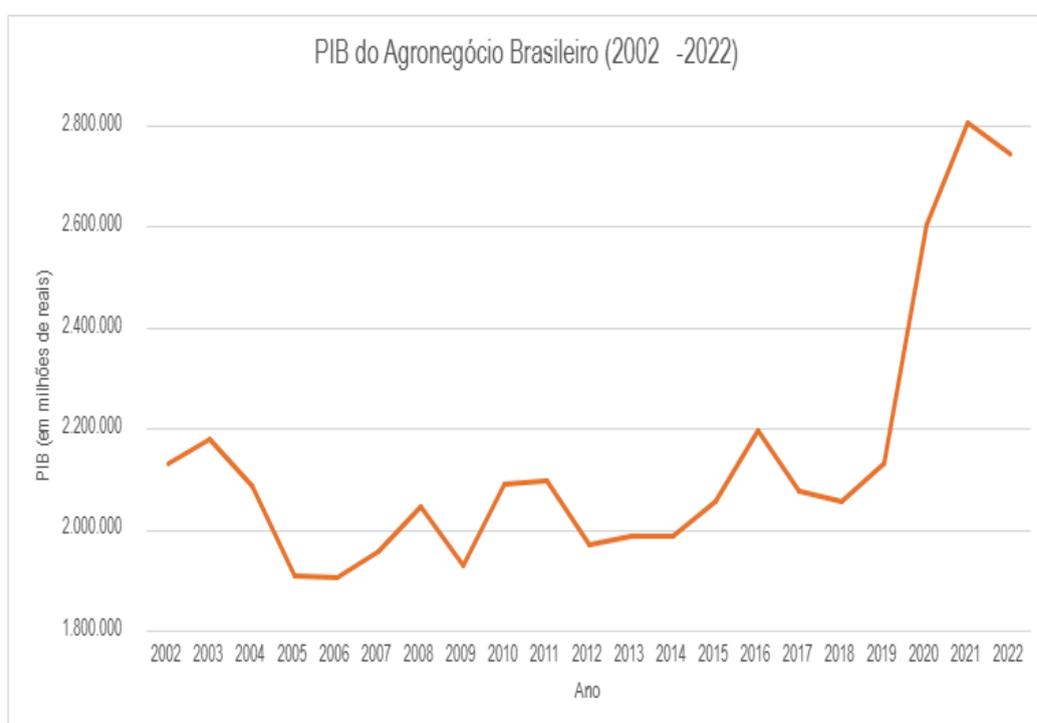


Gráfico 1 - PIB do agronegócio brasileiro entre 2002 e 2022 (Fonte: CEPEA)

No Estado do Rio Grande do Sul, o agronegócio foi responsável por 16,3% do PIB em 2023 - aproximadamente 104,4 bilhões de reais - após uma forte recessão em 2022 em decorrência principalmente da forte estiagem ocorrida em boa parte daquele ano devido ao fenômeno La Niña, como mostrado no gráfico 2, logo abaixo. As principais contribuições ao setor agropecuário foram da produção de soja (responsável por 34,4% das exportações de commodities do setor), de carnes (representando 17,0%) e de fumo e seus derivados (alcançando 13,4%) (DEE, 2024). Os dados do PIB do agronegócio gaúcho desde 2002 são mostrados no gráfico abaixo.

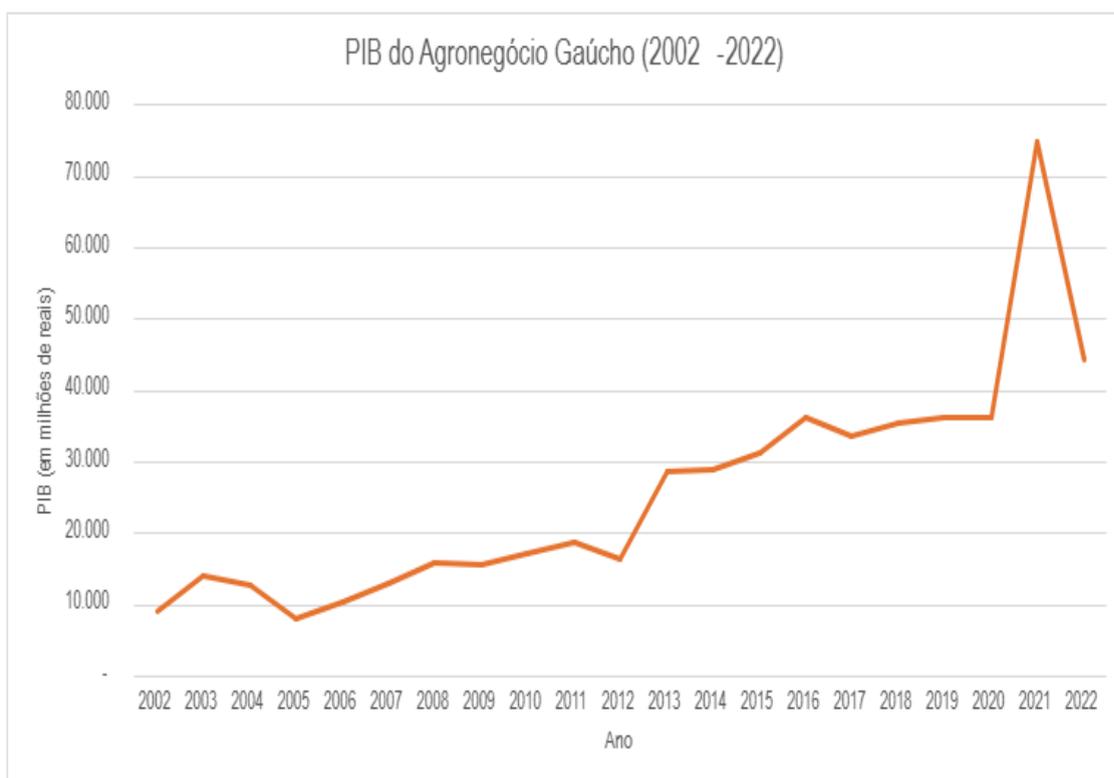


Gráfico 2 - PIB do agronegócio gaúcho entre 2002 e 2022 (Fonte: DEE)

Neste cenário, em que o agronegócio é a principal atividade econômica no Brasil e a população atual chegou a 203,1 milhões, com taxa de crescimento anual de 0,52%, os produtores procuram e adotam estratégias para aumentar sua produtividade e seus lucros. Entre elas, destaca-se o crescente uso dos agrotóxicos, que podem acarretar impactos ambientais diretos, especialmente em ambientes aquáticos.

8.2. Agroquímicos

A Lei Federal Nº 14.785, de 27 de dezembro de 2023, define agrotóxicos como:

[...] produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens ou na proteção de florestas plantadas, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos;

Os agrotóxicos - também conhecidos como agroquímicos, defensivos agrícolas e pesticidas - são substâncias desenvolvidas de forma a potencializar sua ação biocida, com o objetivo de alterar a composição da flora e da fauna de uma área, protegendo espécies de interesse de outras consideradas nocivas (VEIGA, 2007).

Porém, essas substâncias podem contaminar o ser humano e a biota pelo contato direto ou indireto, inclusive por meio da digestão. Segundo Lopes et al (2018),

diversos estudos científicos apontam casos de dores de cabeça, náuseas, dores de estômago, dores lombares, gastrite, depressão, ansiedade, mialgia, tendência ao suicídio, diversos tipos de câncer, óbitos fetais, alterações hormonais, Mal de Alzheimer, entre diversos outros problemas de saúde.

O gráfico abaixo mostra os dez maiores consumidores de agrotóxicos no planeta em 2022, com destaque para o Brasil, que lidera o ranking com 800.652 toneladas aplicadas apenas em 2022.

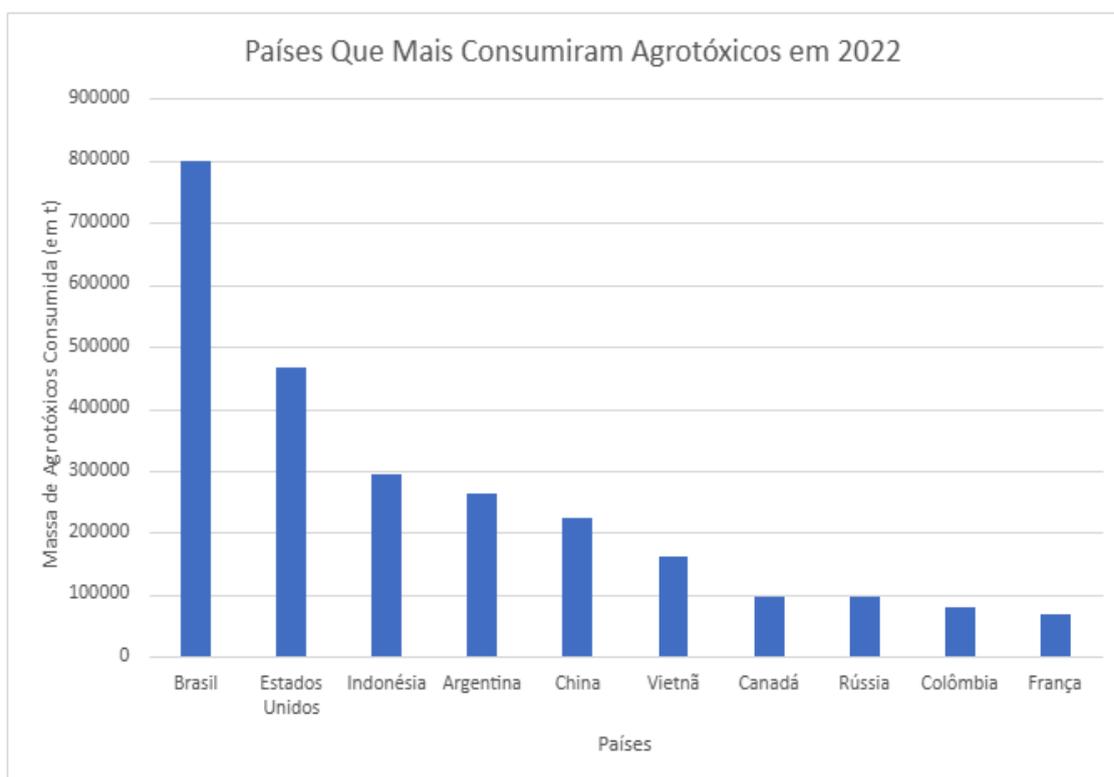


Gráfico 3 - Maiores consumidores de agrotóxicos no mundo em 2022. Fonte: FAO (2022)

Segundo os dados disponíveis mais recentes divulgados pelo IBAMA, em 2022, o estado brasileiro que mais consome pesticidas é o Mato Grosso (176.746 t), seguido de São Paulo (102.305 t) e do Paraná (83.071 t). O consumo total de agroquímicos no ano em questão foi de 731.741 t.

A Tabela 1 mostra os agrotóxicos mais utilizados no Brasil, com destaque para o herbicida glifosato, cujo volume consumido no país chegou a 230.519 toneladas, o que representa 31,5% do total de pesticidas adquiridos em território brasileiro.

Princípio Ativo	Quantidade Utilizada no Brasil (t)
Glifosato	230.519
2,4-D	59.098

Mancozebe	45.564
Atrazina	42.394
Clorotalonil	36.282
Acefato	32.800
Dibrometo de Diquate	20.992
S-metolacoloro	11.600
Malationa	11.356
Glufosinato - Sal de Amônio	10.819

Tabela 1 - Agrotóxicos mais utilizados no Brasil em 2022. Fonte: IBAMA (2022)

Segundo o IBAMA (2022), o Rio Grande do Sul é o quinto maior consumidor de agroquímicos no Brasil, com 64.915 t utilizadas, com destaque novamente pro glifosato, responsável por 41,8% desse total (27.146 t).

8.3. Esgotos domésticos

A NBR 9648 (ABNT, 1986, p. 1) divide o esgoto em três tipos:

- Esgoto doméstico: definido como o “despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas”;
- Esgoto industrial: caracterizado como o “despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos”;
- Esgoto sanitário: especificado como o “despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária”.

Quando esses efluentes se acumulam sem o devido tratamento, a decomposição da matéria orgânica contida neles levam a condições incômodas, como a proliferação de gases malcheirosos. Além disso, o esgoto não-tratado contém inúmeros micro-organismos patogênicos que vivem no trato intestinal humano (METCALF & EDDY, 2014).

O esgoto também contém nutrientes que podem estimular o crescimento de plantas aquáticas e podem conter substâncias tóxicas, mutagênicas ou carcinogênicas (METCALF & EDDY, 2014). As enfermidades mais comuns que podem ser transmitidas pela água são febre tifoide, disenteria, cólera, diarreia, hepatite, leptospirose e giardíase (Peres et al, 2010).

Por isso, a remoção imediata desse material, seguida de tratamento, reuso ou dispersão no meio ambiente é imprescindível para proteger a saúde pública e dos ecossistemas (METCALF & EDDY, 2014).

Segundo o último censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022):

- 58,3% dos domicílios brasileiros utilizam a rede geral ou pluvial de coleta de esgoto;
- 13,2% utilizam fossa séptica ou fossa-filtro não conectada à rede;
- 4,2% utilizam fossa séptica ou fossa-filtro ligada à rede;
- 24,3% não possuem acesso à rede coletora de esgoto, utilizando sistemas mais precários. Dentre eles:
 - 19,4% utilizam fossa rudimentar ou buraco;
 - 2% lançam seu esgoto diretamente em rio, córrego, mar ou lago;
 - 1,5% lançam nas chamadas valas;
 - 0,7% foram classificados na categoria “outra forma”.
- Por fim, 0,6% dos domicílios brasileiros sequer possuem um banheiro. Portanto, não possuem acesso a nenhum sistema de esgotamento sanitário.

As desigualdades no acesso à rede coletora de efluentes ficam evidentes quando verificado o percentual em cada uma das cinco Grandes Regiões Federativas do país, conforme a Tabela 2:

Região	Rede geral ou pluvial	Fossa séptica ou fossa-filtro	Sistemas precários	Não possuem banheiro
Norte	17,7	28,6	52,3	1,3
Nordeste	38,3	19,8	40,3	1,6
Centro-Oeste	50,5	22,9	26,4	0,2
Sudeste	84,0	6,8	9,3	0,0
Sul	49,9	34,0	16,1	0,0

Tabela 2 - Acesso ao esgoto nas cinco regiões do Brasil em 2022. Adaptado de IBGE (2022).

8.4. Tratamento de Esgotos

Segundo Jordão e Pessoa (2005), qualquer sistema de esgotamento direciona os esgotos, direta ou indiretamente, para corpos d'água receptores, sejam superficiais, sejam subterrâneos por meio de infiltração no subsolo. Para que a qualidade desses corpos receptores não se alterem com o lançamento de efluentes,

deve-se estabelecer graus de condicionamento dados pela capacidade receptora desse curso d'água e sua utilização. Os condicionamentos aplicados aos esgotos são comumente os processos de tratamento.

Esses processos são constituídos por uma série de operações unitárias empregadas para remoção de substâncias indesejáveis, ou para transformação destas em outros compostos menos danosos ao meio ambiente e à saúde humana (Jordão e Pessoa, 2005)

Segundo Jordão e Pessoa (2005), as mais importantes operações unitárias empregadas nos sistemas de tratamento são:

- Troca de gás: operação na qual gases são adicionados ou tomados em solução pelo esgoto a ser tratado. Exemplos: adição de oxigênio ou ar a fim de manter condições aeróbias, adição de cloro gasoso para eliminação de micro-organismos patogênicos.
- Gradeamento: operação na qual materiais flutuantes ou em suspensão, que forem maiores que as aberturas das grades, ficam retidos;
- Coagulação química: operação pela qual substâncias químicas formadoras de flocos - os denominados coagulantes - são adicionadas ao esgoto para aglutinar ou se combinar com o material poluente e formar flocos com densidade maior, para que possam sedimentar mais facilmente. Embora solúveis em água, os coagulantes precipitam depois de reagir com outras substâncias do meio. Exemplos de coagulantes: cloreto férrico e sulfato de alumínio.
- Precipitação química: operação pela qual agentes solúveis em água são adicionados ao esgoto e reagem com substâncias químicas do esgoto, precipitando-as. Exemplo: adição de cal a um esgoto rico em ferro, produzindo flocos sedimentáveis.
- Sedimentação: operação pela qual a capacidade de carreamento e de erosão da água é diminuída, levando às partículas suspensas a decantarem pela ação da gravidade. Exemplos: a retirada de areia do esgoto nos desarenadores, a remoção de sólidos que se tornaram sedimentáveis devido à coagulação, oxidação biológica, ou precipitação química nos decantadores. A camada de sólidos decantados no fundo dos decantadores é denominada lodo.
- Flotação: operação que ocorre em tanques chamados flotadores e na qual a capacidade de carreamento da água é diminuída e a de empuxo é aumentada, às vezes pela adição de agentes flotantes. As substâncias naturalmente menos densas que a água, ou que se tornam menos densas pela ação desses agentes, sobem à superfície e são, na sequência, raspadas mecanicamente. Esses agentes flotantes costumam ser pequenas

bolhas de ar ou compostos químicos. A operação é utilizada para retirar óleos e gorduras dos esgotos e algumas partículas suspensas.

- Oxidação biológica: operação na qual micro-organismos decompõem a matéria orgânica presente no esgoto ou no lodo e transformam substâncias complexas em outras mais simples.
- Filtração: operação onde sólidos que passaram incólumes pelos processos anteriores ficam retidos em filtros compostos por pequenas pedras, areia e outros materiais granulares, como carvão ativado. As partículas retidas devem ser removidas posteriormente a fim de evitar a colmatação dos filtros.
- Desinfecção: operação onde os micro-organismos patogênicos são inativados ou eliminados pela ação de um agente oxidante. Exemplos: ozônio, cloro e radiação UV.

Para avaliar a qualidade do tratamento de efluentes, devem ser analisados os parâmetros de qualidade, definidos pela Resolução CONAMA nº 430 como “substâncias ou outros indicadores representativos dos contaminantes toxicológica e ambientalmente relevantes do efluente”. Dentre os principais parâmetros de qualidade de efluentes, pode-se citar os analisados por Pulschen et al (2013):

- Demanda bioquímica de oxigênio (DBO): retrata, de uma forma indireta, o teor de matéria orgânica biodegradável presente nos esgotos ou nos corpos d’água, pois esta é responsável pelo consumo, pelos micro-organismos decompositores, do oxigênio dissolvido na água. A DBO dos esgotos domésticos está em torno de 300 mg/L (VON SPERLING, 2005);
- Turbidez: representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água ou efluente, conferindo uma aparência turva à mesma. No caso dos esgotos, esta aparência é causada pela matéria orgânica suspensa (VON SPERLING, 2005);
- Potencial hidrogeniônico (pH): representa a concentração, em escala anti-logarítmica, de íons H⁺, dando uma indicação da condição de acidez, neutralidade, ou alcalinidade do meio (VON SPERLING, 2005);
- Nitrogênio: elemento presente nos esgotos, o nitrogênio é indispensável para o crescimento de algas e, quando em elevadas concentrações em corpos d’água, pode levar a um crescimento exagerado desses organismos (eutrofização). Além disso, a oxidação das formas do nitrogênio (amônia, nitrito, nitrato, nitrogênio gasoso e orgânico) implica no consumo de oxigênio dissolvido. Ao mesmo tempo, é um nutriente importantíssimo para o crescimento dos micro-organismos responsáveis pela degradação de matéria orgânica (VON SPERLING, 2005);

- Fósforo: elemento muito presente nos esgotos, o fósforo também é imprescindível para o crescimento de algas, podendo também provocar a eutrofização de corpos d'água, e para o crescimento dos micro-organismos utilizados no tratamento de efluentes (VON SPERLING, 2005);
- Demanda química de oxigênio (DQO): indica a quantidade de oxigênio consumido durante a oxidação química da matéria orgânica. Portanto, é uma medida indireta do teor desta no meio.
- Coliformes fecais: são um grupo de bactérias indicadores de organismos originários do trato intestinal humano e de outros animais de sangue quente e que determinam o potencial do esgoto ou da água para transmitir doenças. Um exemplo de coliforme fecal é a Escherichia coli, presente no trato intestinal (VON SPERLING, 2005).

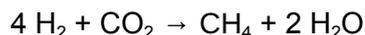
Há diversas técnicas de tratamento de esgotos, e muitas delas envolvem a digestão anaeróbia, onde o efluente é degradado por bactérias, protozoários e fungos sob ausência de oxigênio por meio de mecanismos de fermentação, respiração, hidrólise e oxirredução; produzindo lodo biológico, água e biogás, quando nas condições corretas. A digestão anaeróbia é particularmente eficiente no Brasil - devido à sua localização em região tropical, onde predominam temperaturas perto da faixa ótima do processo (entre 30 e 35 °C), o que ajuda a reduzir as dimensões do reator. Porém, o tratamento anaeróbio não remove nutrientes e organismos patogênicos, necessitando, então, que o efluente passe por outros métodos complementares para remoção desses parâmetros antes de ser lançado no corpo receptor (Costa et al, 2014).

8.5. Biogás

Segundo ICLEI (2012), o biogás foi descoberto pelo britânico Thomas Shirley em 1667, quando observou que a decomposição da matéria orgânica nos pântanos, onde a concentração de oxigênio no solo é nula ou muito baixa, dava origem a um gás inflamável que, sob certas condições, entrava em combustão espontânea, gerando o denominado "fogo-fátuo". Porém, somente em 1776, o italiano Alessandro Volta descobriu a presença de metano (CH₄) nesse gás.

Segundo Soares et al (2010), a primeira usina de produção de biogás para combustível entrou em operação em 1857, para abastecimento de um hospital de hansenianos em Bombaim (atual Mumbai), na Índia. Porém, apenas em 1883, o francês Ulysse Gayon, aluno do famoso Louis Pasteur, executou a primeira fermentação anaeróbia em laboratório, produzindo 100 L de biogás por m³ de uma mistura de esterco e água.

Também, em 1890, Van Senus constatou que a degradação anaeróbia era realizada por diversas espécies de micro-organismos e deduziu que o metano era gerado pela redução do gás carbônico, também presente no biogás, pelo hidrogênio, que ocorre segundo seguinte reação:



Porém, a maioria dos países desenvolvidos relegou o uso do biogás em detrimento das fontes de energia mais tradicionais, ainda em relativa abundância. No entanto, o biogás desempenhou importante papel na China e na Índia, países com menos recursos energéticos e financeiros, sobretudo em pequenas comunidades rurais (Soares et al, 2010).

Com o advento da crise do petróleo na década de 1970, o aproveitamento do biogás voltou a despertar interesse nos países desenvolvidos e subdesenvolvidos, porém nenhum país utilizou essa tecnologia tão fortemente quanto Índia e China (Soares et al, 2010).

O biogás é um gás incolor, inodoro, altamente combustível e com um potencial de contribuição para o efeito estufa 21 vezes maior que o dióxido de carbono, por conta disso, sua liberação direta na atmosfera pode agravar os impactos ambientais causados pelo aquecimento global (Zilotti, 2012). Por conta disso, a exploração de seu poder calorífico para geração de energia não só é uma alternativa aos combustíveis fósseis, mas também é uma oportunidade de fomentar o desenvolvimento sustentável.

8.5.1. Biogás no Brasil

Segundo Zilotti (2012), o interesse pelo biogás no Brasil intensificou-se nas décadas de 1970 e 1980, especialmente entre os suinocultores. Programas oficiais estimularam a implantação de biodigestores para geração de energia e produção de biofertilizantes. O objetivo era diminuir a poluição gerada pelos dejetos animais, reduzir a dependência das pequenas residências rurais em relação a fertilizantes químicos e energia térmica e hidráulica, gerando uma economia de energia e criando uma fonte de renda para os criadores. Infelizmente, os resultados esperados não foram alcançados, e a maioria dos biodigestores foram desativados.

No fim da década de 1990, um novo movimento em prol da produção de biogás surgiu motivado pela inserção da digestão anaeróbia no mercado de carbono via MDL (mecanismo de desenvolvimento limpo), estabelecido com o Protocolo de Kyoto. Com a entrada da Rússia no programa, a agropecuária comemorou, na esperança de que os projetos e os créditos de carbono por si só viabilizassem os empreendimentos. Porém, a grande flutuação nos preços dos créditos, as dificuldades operacionais e a crise financeira mundial de 2008 frustraram esses planos.

Em 21 de março de 2022, foi publicado o Decreto nº 11.003, que institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, a fim de promover a implantação de tecnologias para a utilização do biogás como combustível, iniciativas para o abastecimento de veículos leves e pesados, incentivar o mercado de carbono, dentre outras diretrizes. São instrumentos dessa estratégia:

- Programa Nacional de Crescimento Verde: instituído pelo Decreto nº 10.846, em 25 de outubro de 2021, o programa é uma iniciativa que busca oferecer financiamentos e subsídios para incentivar projetos e atividades economicamente sustentáveis e gerar os denominados “empregos verdes”. O objetivo é neutralizar as emissões de carbono pelo Brasil até 2050.
- Fundo Nacional Sobre Mudança do Clima: criado pela Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009, e regulamentado pelo Decreto nº 9.548, de 22 de novembro de 2018, e este alterado pelo Decreto nº 11.549, de 5 de junho de 2023. O fundo objetiva financiar projetos, estudos e empreendimentos que visem a redução de emissões de gases-estufa e a adaptação às mudanças climáticas.
- Pesquisas científicas, principalmente as realizadas por meio de agências de fomento;
- e a Política Nacional de Biocombustíveis, ou RenovaBio: instituída pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, a política tem como objetivo promover a expansão do uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira, ajudar no cumprimento dos compromissos do Brasil com o estabelecido no Acordo de Paris, contribuir com a relação positiva entre eficiência energética e redução de emissões de gases-estufa na produção de biocombustíveis, inclusive com mecanismos de Análise do Ciclo de Vida.

8.5.2. Formação do Biogás

Segundo Zilotti (2012), a digestão anaeróbia é um processo em que bactérias de várias espécies, adaptadas à ausência de oxigênio, se alimentam de substâncias orgânicas complexas, extraem a energia e os nutrientes necessários para seu crescimento e produzem outras mais simples, como metano (CH₄) e dióxido de carbono. Algumas outras substâncias produzidas ficam dissolvidas no efluente, como amônia, sulfetos e fosfatos.

Segundo Cavaleiro et al (2020), a transformação da matéria orgânica em outras substâncias ocorre devido a uma cadeia de sucessivos processos feitos por diferentes tipos de bactérias, que podem ser agrupados em quatro fases descritas abaixo, na Figura 1:

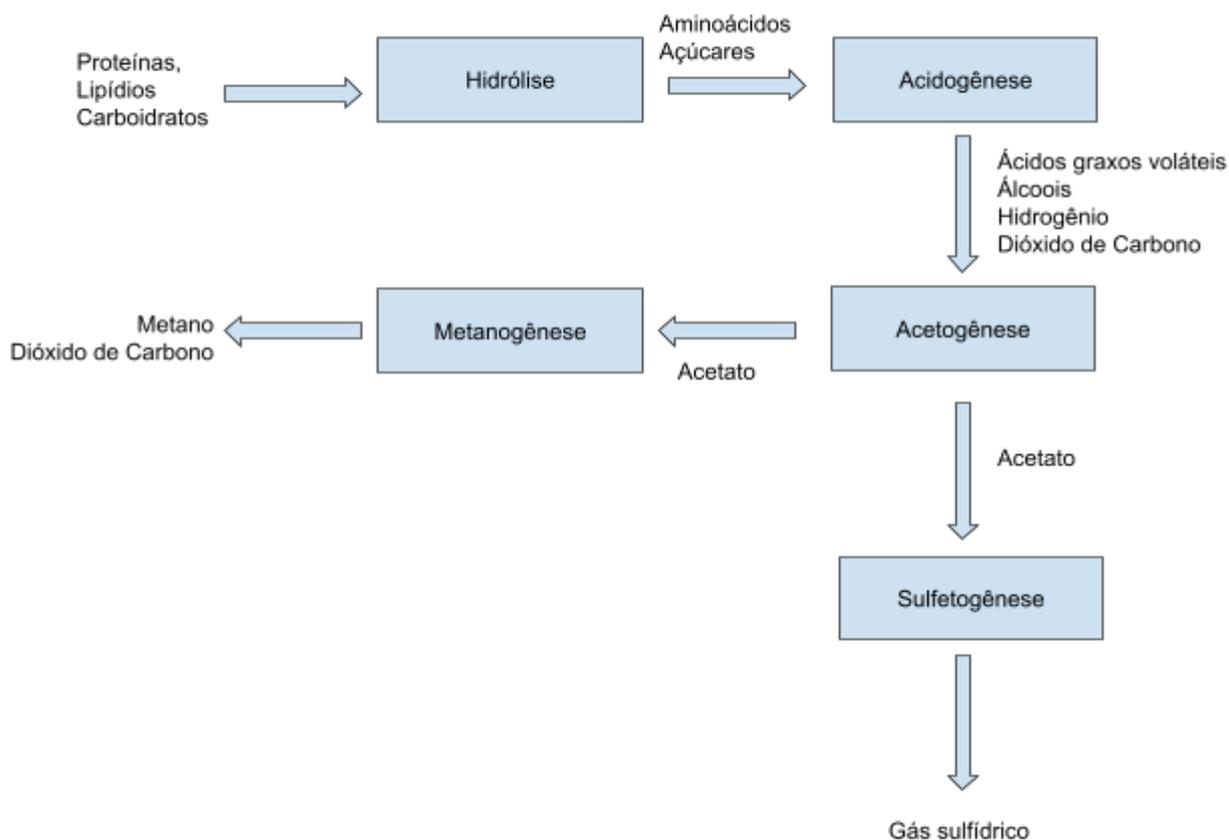


Figura 1 - Fluxograma das etapas da digestão anaeróbia. Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Hidrólise:** é a primeira fase do processo, onde proteínas, lípidios e carboidratos insolúveis são convertidos por bactérias específicas em substâncias mais simples e solúveis, como aminoácidos e açúcares.
- **Acidogênese ou fermentação:** nesta fase, os micro-organismos atuantes transformam as substâncias formadas na fase anterior em ácidos graxos voláteis (AGV), álcoois, hidrogênio e CO₂. A população da etapa acidogênica constitui cerca de 90% do total de micro-organismos presentes nos biodigestores, sendo que as bactérias que atuam nesta etapa são as mesmas que realizaram a hidrólise, como as dos gêneros *Lactobacillus* e *Clostridium*.
- **Acetogênese:** nesta etapa, o acetato é formado por bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio - também conhecidas como bactérias sintróficas - que consomem os AGV e os álcoois formados na etapa anterior, e por bactérias homoacetogênicas, que produzem acetato a partir do H₂/CO₂ ou de compostos orgânicos multicarbonados, como açúcares. As bactérias sintróficas atuantes nesse processo pertencem aos gêneros *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Smithella* e *Pelotomaculum*. O metabolismo desses micro-organismos é inibido pelo hidrogênio, por isso é necessário manter uma pressão de hidrogênio baixa (< 10⁻⁴ atm) para que o processo seja termodinamicamente viável. Normalmente, isto é assegurado por organismos metanogênicos que consomem o H₂ formado.

- **Metanogênese:** é a etapa final do processo, onde micro-organismos, conhecidos como arqueias, produzem metano e gás carbônico. Esses organismos consomem apenas um determinado número de substratos. Mais precisamente acetato (micro-organismos acetoclásticos), metanol, formiato e a mistura $H_2 + CO_2$ (micro-organismos hidrogenofílicos). Alguns exemplos de arqueias metanogênicas são as pertencentes aos gêneros Methanosaeta, Methanosarcina, Methanospirillum e Methanobacterium. Em relação às bactérias acidogênicas, as arqueias metanogênicas se reproduzem mais lentamente e são mais sensíveis a alterações no ambiente e a condições adversas.
- **Sulfetogênese:** etapa onde bactérias redutoras de sulfato competem com as arqueias pelos mesmos substratos, o que reduz a produção de metano e leva à geração de gás sulfídrico (H_2S), que tem um odor característico de ovo podre. Apesar dessa desvantagem, as bactérias sulfetogênicas são mais eficientes na redução de DQO que as arqueias metanogênicas.

A eficiência na produção de biogás pode ser afetada por diversos fatores. Segundo Zilotti (2007), os de maior relevância são:

- **Composição química do resíduo:** a degradação de substâncias orgânicas facilmente biodegradáveis; como carboidratos, lipídios e proteínas produz mais metano que substâncias mais difíceis de serem biodegradadas, como lignina, celulose e compostos artificiais.
- **Impermeabilidade do meio:** como as bactérias metanogênicas são anaeróbias, o metano não é produzido se o meio for permeável à passagem de ar atmosférico. A degradação em presença de oxigênio produzirá apenas CO_2 e água.
- **Temperatura:** a temperatura influencia fortemente o processo enzimático das bactérias metanogênicas: em temperaturas já em torno de $10\text{ }^\circ\text{C}$, a atividade dos micro-organismos é muito baixa, enquanto em valores acima de $65\text{ }^\circ\text{C}$, as enzimas são destruídas. A faixa ótima para produção de metano fica entre 32 e $37\text{ }^\circ\text{C}$ para bactérias mesofílicas, e entre 50 e $60\text{ }^\circ\text{C}$ para as termofílicas.
- **Produção e consumo de ácidos orgânicos:** o pH do meio durante a digestão anaeróbia é, em parte, regido pela produção de AGVs e sua transformação em metano. Quando o processo desvia-se das condições ótimas, a concentração de AGVs aumenta, o que demonstra o desequilíbrio da biodigestão. Durante certo tempo, a alcalinidade do meio agirá como tampão e impedirá a queda do pH. Porém, quando essa alcalinidade for consumida pelos AGVs, o pH tenderá a cair.
- **pH:** as bactérias metanogênicas possuem crescimento ótimo na faixa de pH entre $6,6$ e $7,4$. Todavia, a produção de metano manter-se-á estável em valores entre $6,0$ e $8,0$. Caso o processo se mantenha dentro das condições

normais, o pH manter-se-á dentro da neutralidade, não afetando a eficiência da produção de metano.

- Alcalinidade: conforme as bactérias produzem AGVs e CO₂ durante o processo, o pH tenderia a diminuir sem a presença de carbonatos e bicarbonatos que caracterizam a alcalinidade, pois esses últimos reagem com os ácidos produzidos e impedem grandes flutuações do pH (efeito tampão).
- Acidez: a acidez do meio está diretamente relacionada com o pH e com a alcalinidade, visto que uma alta produção de AGVs e CO₂ pode consumir a alcalinidade do meio e desencadear a queda no pH.
- Nutrientes: a presença de nutrientes é vital para o crescimento e desenvolvimento dos micro-organismos. Os principais nutrientes para essas populações microbianas são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12. Geralmente, para resíduos de origem animal - como o lodo de esgoto doméstico - não é necessário adicionar nutrientes para favorecer a digestão anaeróbia, pois estes já estão presentes.

8.5.3. Composição do biogás

Segundo Cassini (2003), o biogás é majoritariamente composto por CH₄ e CO₂, podendo também estar presentes em H₂S, H₂, N₂, CO, NH₃, vapor d'água, entre outros gases em baixas concentrações. A tabela 3 mostra a composição percentual média dos constituintes do biogás.

Metano (CH ₄)	50 a 75%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 a 40%
Hidrogênio (H ₂)	1 a 3%
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5%
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1%
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0,1 a 0,5%
Amônia (NH ₃)	0,1 a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1%
Vapor d'água	Variável

Tabela 3 - Composição média do biogás. Fonte: Cassini (2003)

8.5.4. Agrotóxicos e Biogás

Um estudo de Hu et al (2019) investigou a interferência do fipronil, inseticida utilizado para controlar pragas em granjas, na produção de biogás a partir de esterco de galinha e palha de milho. Neste trabalho, foram adicionadas diferentes concentrações do agrotóxico a uma mistura dos materiais supracitados com um teor de 8% de sólidos totais a uma temperatura de $35 \pm 1^\circ\text{C}$.

O trabalho inferiu, então, que o fipronil teve uma forte influência na produção de biogás. Quando em baixa concentração (10 mg/kg), a produção de biogás aumentou e o tempo de degradação diminuiu, devido a um aumento na atividade da enzima urease. Porém, em maior concentração (20 mg/kg), o inseticida provocou um efeito inibitório na produção de biogás devido à inativação das enzimas celulase e urease.

Por outro lado, o estudo de Czarny et al (2019) analisou o efeito dos herbicidas aniônicos ácido 4-cloro-2-metilfenoxiacético (MCPA) e ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) em forma de sais sódicos, bem como em conjunção com os cátions benzalcônio (BA) e didecilmetilamônio (DDA). Estes compostos foram introduzidos em bioreatores de 2 L cada em concentrações 1, 20, 40, 60, 80, 100 e 125 mg/L juntamente com 1 kg de lodo advindo de uma planta de biogás abastecido com resíduos agrícolas e 100 g/L de permeado de soro como fonte de carbono. Os reatores foram dispostos em banho-maria a 37°C e agitados várias vezes ao dia a fim de manter a mistura homogênea. Cada experimento foi realizado em triplicata, e a concentração inicial de matéria seca foi de 76 g/L. A partir de cálculos baseados na substância ativa (MCPA ou 2,4-D), foi obtida uma concentração de 125 mg/L para ambos herbicidas capaz de inibir completamente a produção de biogás.

Com isso, o trabalho determinou as concentrações que reduziram a produção de biogás em 50% (EC50) para cada herbicida, considerando que os bioreatores tomados como branco (sem herbicidas) produziram, em média, 260 mL CH_4/kg de matéria seca do lodo sedimentado. Também foram determinadas as concentrações residuais dos compostos iônicos no sobrenadante e no lodo. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Herbicida	EC50 (mg/L)	Sobrenadante		Lodo	
		Cátion (mg/L)	Ânion (mg/L)	Cátion (mg/L)	Ânion (mg/L)
(DDA) (MCPA)	38,6	$4,1 \pm 1,4$	$44,3 \pm 6,9$	$52,5 \pm 6,5$	$2,8 \pm 1,6$
(DDA) (2,4-D)	59,8	$2,4 \pm 1,6$	$37,4 \pm 5,2$	$40,6 \pm 4,6$	$6,4 \pm 3,6$
(BA) (2,4-D)	55,7	$3,3 \pm 2,3$	$45,4 \pm 8,7$	$5,2 \pm 2,1$	$1,7 \pm 0,9$
(BA) (MCPA)	40,2	$0,4 \pm 0,3$	$45,0 \pm 9,3$	$42,0 \pm 2,1$	$7,3 \pm 2,8$
MCPA	45,7	-	$38,6 \pm 6,8$	-	$9,3 \pm 5,3$
2,4-D	65,8	-	$48,6 \pm 7,9$	-	$6,2 \pm 4,6$

Tabela 4 - EC50 e concentrações residuais dos herbicidas analisados por Czarny et al (2019).

Os dados obtidos apontam que o MCPA é mais tóxico para os micro-organismos que o 2,4-D. Contudo, considerando uma concentração inicial de 50 mg/L de herbicida adicionado (valor calculado com base no princípio ativo), pode-se concluir que os compostos não foram biodegradados, e que a queda na concentração existente no sobrenadante deve-se à adsorção de parte deles pelo lodo, sendo que a quantidade da parte aniônica adsorvida foi muito inferior à quantidade que continuou dissolvida no líquido.

Mesmo com os resultados dos artigos mencionados, ainda há poucos trabalhos realizados sobre os efeitos dos agrotóxicos na produção de biogás, tanto inibitórios, quanto estimulantes. Logo, é necessária uma maior investigação sobre o assunto.

Este estudo, então, propõe uma revisão dos trabalhos realizados sobre o tema e como eles contribuíram para enriquecer o conhecimento sobre a relação agrotóxicos-digestão anaeróbia-produção de biogás.

9. Metodologia

Para a verificação do estado-da-arte do tema, foi utilizado o método bibliométrico Proknow-C (Knowledge Development Process - Construction), estruturado por Ensslin et al (2010).

O método consiste na seleção de artigos a partir de três etapas:

- definição dos eixos de pesquisa;
- seleção dos artigos que comporão o portfólio bibliográfico;
- análise bibliométrica dos trabalhos selecionados.

O método Proknow-C pode ser explicado através do fluxograma mostrado abaixo, na Figura 2:

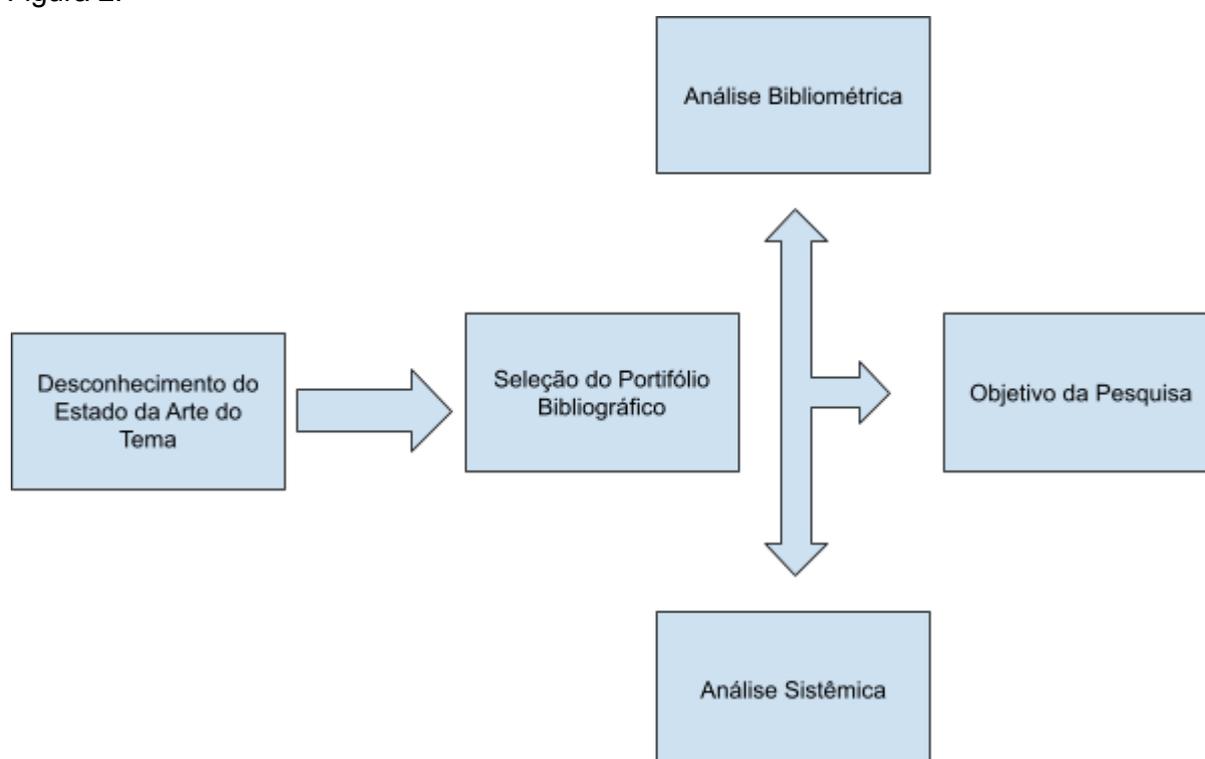


Figura 2 - Fluxograma das etapas do método Proknow-C. Adaptado de Lacerda et al, 2022

Para pesquisar os trabalhos, foi utilizada a base de dados SciVerse Scopus, administrada pela Elsevier, uma das principais editoras do ramo científico. A fim de realizar a mais abrangente pesquisa possível, não foi definido um intervalo de tempo específico para os artigos retornados, por isso o portfólio retornado pela base reuniu trabalhos de 1993 (o mais antigo encontrado) a 2024 (ano da pesquisa). Os resultados foram exportados para uma planilha do software Microsoft Office Excel em formato CSV (*comma-separated values*) para manipulação dos dados e seleção dos artigos.

A pesquisa na base de dados Scopus foi feita em três eixos definidos - agroquímico OU pesticida E esgoto OU água residuária E biogás OU metano - e retornou 88 artigos para o portfólio bruto. Destes, 31 foram selecionados após leitura dos títulos e resumos. Como os dados de citações para cada trabalho que estão registrados na base Scopus referem-se

apenas às citações vinculadas à base (com a URL da Scopus), foi feita uma busca para cada estudo no site *Google Scholar* para obter o número total de citações em todas as bases em que estes artigos estão hospedados.

Após essas etapas, os trabalhos selecionados foram ordenados pelo número de citações em ordem decrescente e foi aplicada a Regra de Pareto - que estabelece uma relação causa-efeito onde 80% dos resultados obtidos são o produto de apenas 20% do esforço (Larissa et al, 2017) - para determinar o número de artigos que representam 80% do número total de citações, sendo então classificados 9 trabalhos (que detém 81,31% das citações acumuladas).

Na sequência, foram selecionados entre os trabalhos menos citados os mais recentes, considerando como tal as publicações a partir de 2022, o que resultou em mais 8 artigos integrados ao portfólio bibliográfico.

Por fim, foram listados os autores considerados mais reconhecidos e citados, cujos trabalhos foram selecionados pela Regra de Pareto, e comparados com os dos trabalhos que não passaram pelas etapas anteriores - ou seja, publicações que não são consideradas recentes, não foram muito citados, mas que foram redigidos por autores reconhecidos. Porém, apenas um único trabalho adicional passou por esse último crivo, permanecendo o número final de 18 artigos compondo o portfólio bibliográfico selecionado.

Após definido o portfólio final, foi utilizado o software VOSviewer para visualização das redes de coautoria e de conexão entre palavras-chave.

10. Resultados e Discussão

A tabela 5 mostra a seleção final de artigos para o portfólio bibliográfico:

ID	Autores	Título	Ano	Fonte	Cited by
15	Hu D.; Liu L.; Liu W.; Yu L.; Dong J.; Han F.; Wang H.; Chen Z.; Ge H.; Jiang B.; Wang X.; Cui Y.; Zhang W.; Zhang Y.; Liu S.; Zhao L.	Improvement of sludge characteristics and mitigation of membrane fouling in the treatment of pesticide wastewater by electrochemical anaerobic membrane bioreactor	2022	Water Research	40
18	Zhang T.; Ni J.; Xie D.	Severe situation of rural nonpoint source pollution and efficient utilization of agricultural wastes in the Three Gorges Reservoir Area	2015	Environmental Science and Pollution Research	38

21	Nayana K.; Vidya D.; Rao A.S.; Periyasamy C.; Kumar K.S.; Kumar K.A.; Rao P.V.S.	Valorization of Wastes Using Microalgae: A Glance	2024	Algal Biotechnology: Applications for Industrial Development and Human Welfare	0
22	Avila R.; García-Vara M.; López-García E.; Postigo C.; López de Alda M.; Vicent T.; Blánquez P.	Evaluation of an outdoor pilot-scale tubular photobioreactor for removal of selected pesticides from water	2022	Science of the Total Environment	11
24	Avila R.; Peris A.; Eljarrat E.; Vicent T.; Blánquez P.	Biodegradation of hydrophobic pesticides by microalgae: Transformation products and impact on algae biochemical methane potential	2021	Science of the Total Environment	61
32	Porwal J.; Bhonsle A.K.; Yusuff A.S.; Atray N.	Conversion of sewage sludge to biofuels	2022	Development in Waste Water Treatment Research and Processes: Treatment and Reuse of Sewage Sludge: An Innovative Approach for Wastewater Treatment	0
33	Wang Y.; Chen Z.; Hu D.; Jiang L.; Cui S.; Zhuang S.; Yan J.; Dong J.; Han F.; Jiang B.; Ge H.; Liang Z.	Optimization of ethylene thiourea, cyanide, and heavy metals removal and gas production enhancement in organosulfur pesticide wastewater using ferromagnetic biochar in anaerobic membrane bioreactor	2024	Chemical Engineering Journal	1
35	Lopez J.; Monsalvo V.M.; Puyol D.; Mohedano A.F.; Rodriguez J.J.	Low-temperature anaerobic treatment of low-strength pentachlorophenol-bearing wastewater	2013	Bioresource Technology	27
36	Koul B.; Sharma K.; Shah M.P.	Phycoremediation: A sustainable alternative in wastewater treatment (WWT) regime	2022	Environmental Technology and Innovation	68

38	García-Mancha N.; Monsalvo V.M.; Puyol D.; Rodriguez J.J.; Mohedano A.F.	Enhanced anaerobic degradability of highly polluted pesticides-bearing wastewater under thermophilic conditions	2017	Journal of Hazardous Materials	36
43	Monroy-Licht A.; Carranza-Lopez L.; De la Parra-Guerra A.C.; Acevedo-Barrios R.	Unlocking the potential of Eichhornia crassipes for wastewater treatment: phytoremediation of aquatic pollutants, a strategy for advancing Sustainable Development Goal-06 clean water	2024	Environmental Science and Pollution Research	1
45	Wu M.; Tang X.; Li Q.; Yang W.; Jin F.; Tang M.; Scholz M.	Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei Province, China	2013	Water, Air, and Soil Pollution	71
53	Khan N.; Ganie A.S.; Anwer A.H.; Khan M.Z.; Rahman M.M.	Bioremediation of chlorophenols for the production of biogas: A green alternative	2022	Relationship between Microbes and the Environment for Sustainable Ecosystem Services: Microbial Tools for Sustainable Ecosystem Services: Volume 3	1
54	Yan J.; Chen Z.; Hu D.; Ge H.; Jiang B.; Dong J.; Han F.; Zhuang S.; Liang Z.; Wang Y.; Cui S.	Anaerobic degradation of pesticide wastewater: Improving sludge characteristics and reducing membrane fouling with combined tandem UASB+membrane system with high velocity settlers	2024	Water Research	2
57	Ji J.; Kakade A.; Yu Z.; Khan A.; Liu P.; Li X.	Anaerobic membrane bioreactors for treatment of emerging contaminants: A review	2020	Journal of Environmental Management	77
63	Balasundaram G.; Tyagi V.K.; Lo S.-L.	Biogas production from sewage sludge—Advances in thermal pretreatment	2024	Environmental Materials and Waste: Circular Economy and Pollution Abatement	1

64	Devda V.; Chaudhary K.; Varjani S.; Pathak B.; Patel A.K.; Singhania R.R.; Taherzadeh M.J.; Ngo H.H.; Wong J.W.C.; Guo W.; Chaturvedi P.	Recovery of resources from industrial wastewater employing electrochemical technologies: status, advancements and perspectives	2021	Bioengineered	59
72	Donlon B.A.; Razo-Flores E.; Field J.A.; Lettinga G.	Toxicity of N-substituted aromatics to acetoclastic methanogenic activity in granular sludge	1995	Applied and Environmental Microbiology	159

Tabela 5 - Portifólio bibliográfico final

Cada um dos trabalhos selecionados pertence a autores diferentes, logo não foi possível construir uma rede de coautoria. Porém, algumas palavras-chave se destacaram entre os artigos, sendo “*anaerobiosis*” a que mais foi mencionada, com 4 ocorrências. Para ilustrar essa correlação entre os trabalhos, foi feito, então, o mapa bibliométrico de palavras-chave do portfólio com o auxílio do software VOSviewer. Visualizando o mapa mostrado na Figura 3, podemos constatar que a palavra “*anaerobiosis*” também é a palavra com mais conexões com outras palavras-chave (um total de 4 conexões):

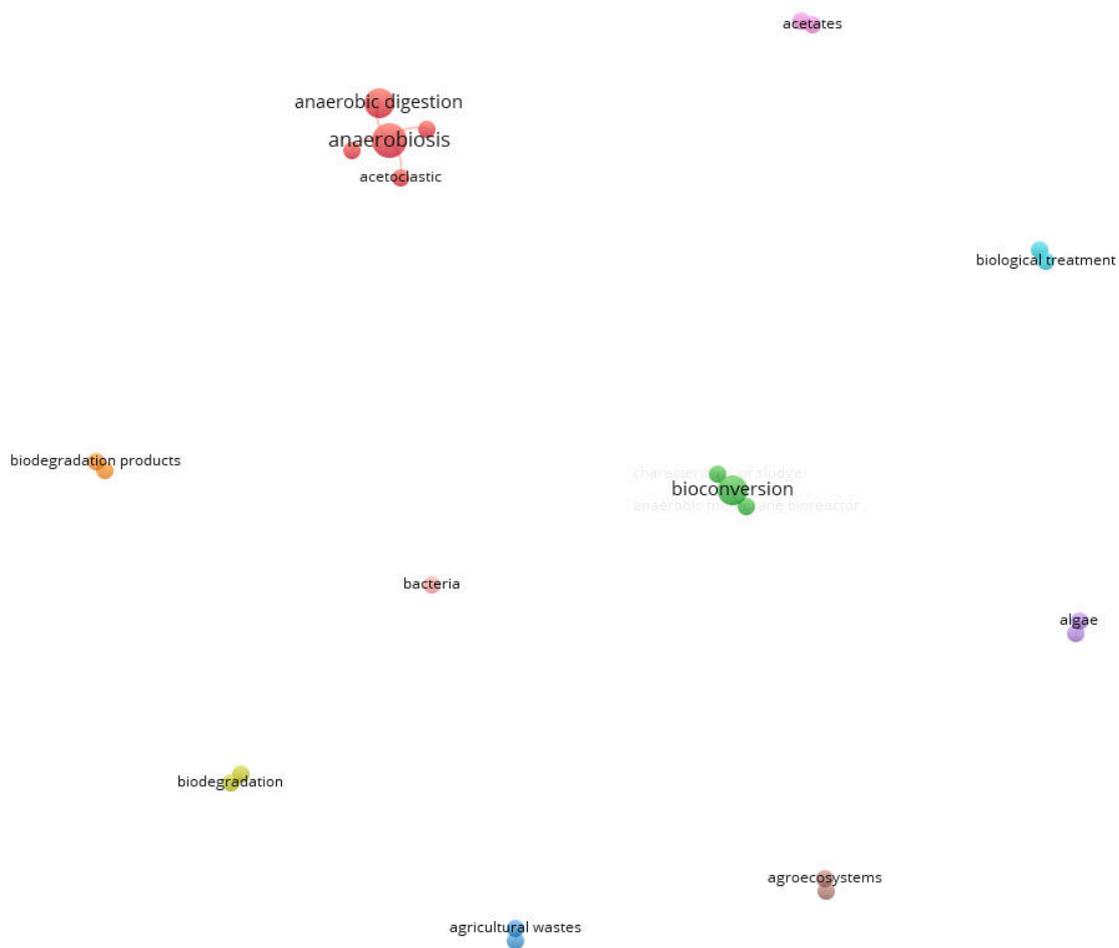


Figura 3 - Mapa bibliométrico de palavras-chave.

Os artigos selecionados também foram analisados quanto a seus países de origem, resultando nos dados mostrados no Gráfico 3:

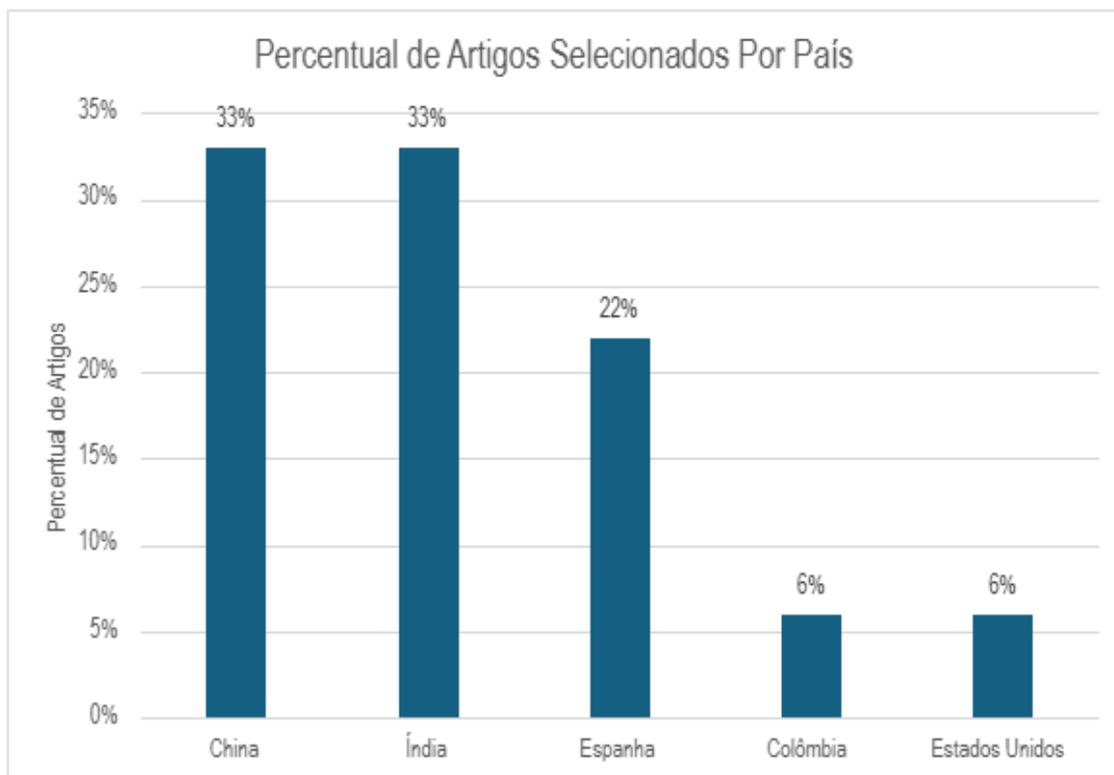


Gráfico 4 - Percentual dos artigos selecionados por país.

Chama a atenção o fato de não terem sido encontrados sequer na pesquisa trabalhos brasileiros sobre o tema, visto que o Brasil - como visto no item 5.2 - é o maior consumidor de agrotóxicos do mundo atualmente. Por outro lado, já era esperado que China e Índia fossem os países com mais estudos sobre o assunto, devido a seu histórico de uso do biogás como fonte energética.

Particularmente, a região da província de Hubei foi alvo de especial atenção dos pesquisadores, visto que dois dos estudos selecionados foram feitos na localidade, conhecida por sua alta produtividade agrícola e pela presença da Usina de Três Gargantas, a maior usina hidrelétrica do planeta.

Segundo o artigo de Yang et al apud Zhang et al (2015), a população em torno da barragem cresceu muito após sua inauguração, ao mesmo tempo em que diminuiu a disponibilidade de terras agricultáveis, o que fez crescer significativamente o consumo de agrotóxicos (crescimento de 9% entre 2003 e 2012) e fertilizantes (crescimento de 42% no mesmo período) e a produção de resíduos, esta acarretada principalmente pelo aumento na criação de animais. O aporte dessas substâncias na usina devido ao carregamento destas pela chuva provocou vários focos de proliferação de algas e contaminação da água, tornando a denominada poluição rural difusa um sério problema, tanto para o funcionamento da hidrelétrica, quanto para o abastecimento da comunidade. Esse estudo e o de Wu et al (2013) apontam o potencial de vários métodos para tratamento dos resíduos causadores dessa poluição, incluindo as plantas de biogás. Segundo Lu et al (2021), em 2017, existiam cerca de 40,577 milhões de plantas em território chinês produzindo anualmente 9,758 Gm³ de biogás. Um único digestor anaeróbico doméstico pode ser capaz

de tratar 230,65 kg de DQO; 146,87 kg de DBO; 38 kg de nitrogênio total e 11,84 kg de fósforo total (Yang et al apud Zhang et al, 2015).

Vários estudos têm sido feitos também a fim de encontrar métodos eficientes para remover e/ou degradar agroquímicos presentes em esgotos sem gerar substâncias ainda mais tóxicas que possam inibir a produção de biogás tanto quanto ou mais que as originais. Por exemplo, um bioreator anaeróbico de membranas convencional consegue remover a maioria dos agrotóxicos em concentrações maiores de 50%, porém a taxa de remoção de dietiltoluamida (utilizada como repelente e inseticida) é menor que 20% (Ji et al, 2020).

Hu et al (2022) analisou o desempenho de um reator anaeróbico de membranas eletroquímico (E-AnMBR) e comparou com o de um reator de membranas convencional (C-AnMBR), além de propor medidas para melhorar as características do lodo resultante - como concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) e de biopolímeros extracelulares - e diminuir o efeito de *fouling* (entupimento) das membranas, o que aumenta sua vida útil, diminui os custos de manutenção do reator e aumenta seu rendimento energético. Para isto, ambos os reatores foram abastecidos com esgoto bruto - na concentração operacional de 10.365 ± 142 mg/L - advindo de uma fábrica de agrotóxicos localizada em Dalian, na China. Este esgoto continha:

- entre 12.000 e 23.000 mg/L de DQO;
- entre 9 e 31 mg/L de Fósforo Total;
- e entre 140 e 370 mg/L de Nitrogênio Total.

Também foi constatada a presença dos seguintes agrotóxicos:

- 2,2,3,3-tetrametilciclopropano;
- 1,2-pentanodiol;
- Ácido 2,3-dimetil-2-butenocarboxílico acetato de etila;
- Ácido benzoico 2-dimetilaminoetiléster acetona;
- Dimetilbenzeno;
- Tetrametiletileno;
- Fenol;
- Cianeto.

Na Figura 4, extraída diretamente do artigo, o autor mostra em gráficos a produção de biogás, sua porcentagem de metano e seu rendimento produtivo correlacionados ao tempo de retenção hidráulica dentro do reator.

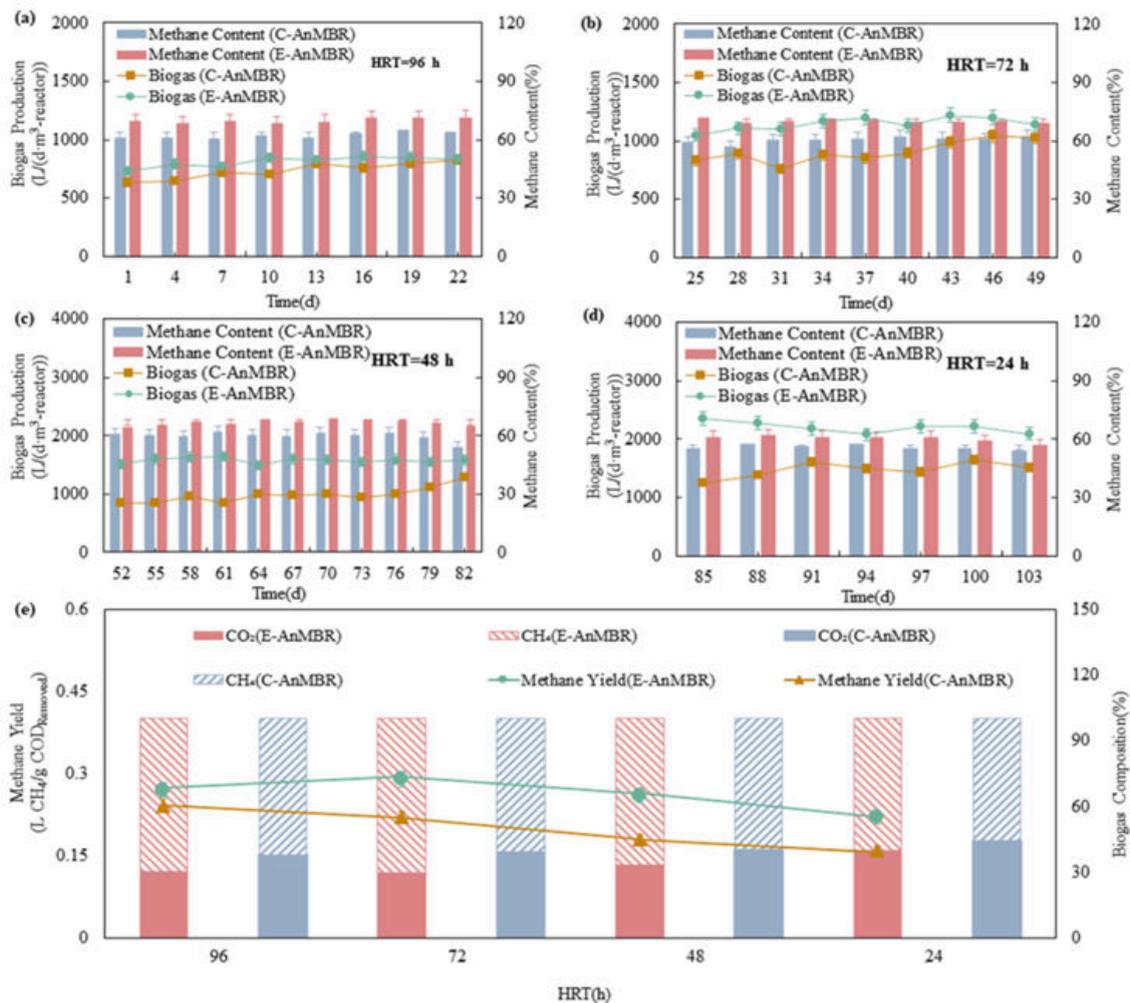


Figura 4 - Gráficos da produção de biogás e rendimento de metano dos reatores eletroquímico e convencional. Fonte: Hu et al (2022)

Traduzido do inglês:

- Biogas production: produção de biogás (em L/(d * m³ reator));
- Methane content: quantidade de metano (%);
- Time: tempo (em dias);
- HRT: tempo de retenção hidráulica (em horas);
- Methane Yield: rendimento de metano (em L CH₄/g DQO removida);
- Biogas composition: composição do biogás.

Também foi possível constatar que o E-AnMBR reduziu a produção de lodo em $41,2 \pm 6,7\%$ e aumentou o rendimento de metano em $34,4 \pm 17,4\%$ em comparação com o C-AnmBR. Além disso, a quantidade de biopolímeros extracelulares no lodo suspenso e no

sedimentado foi reduzida em $41,8 \pm 3,3\%$ e $77,4 \pm 14,5\%$, respectivamente. Isto fez com que a taxa de *fouling* fosse retardada de 31 a 38,5%.

Apesar dessas vantagens, o estudo mostra que ambos reatores necessitam de longos períodos de tempo para atingir seu potencial máximo de produção e não há uma discussão sobre seus custos.

O estudo de Yan et al (2024) também propôs um método de tratamento visando diminuir o *fouling* das membranas e melhorar o rendimento do tratamento de efluentes. Para isto, foi comparado o desempenho de um reator UASB com sistema de membranas (R1) com o de um mesmo reator, porém com a adição de decantadores de alta velocidade - caracterizados por lamelas de fibra de vidro paralelas umas às outras em ângulo de 45° com 10 cm de distância entre elas - na zona de decantação do separador trifásico (R2), ambos tratando o efluente de uma fábrica de agrotóxicos contendo atrazina, fipronil, anilina e cianeto. Os resultados mostraram um acréscimo na produção de biogás no R2 em relação ao R1 de 28%, 19% e 33% para tempos de retenção de 48, 72 e 96 horas, respectivamente.

Tempo de Retenção (horas)	Produção de Biogás (L/d*m ³ reator)		Porcentagem de metano no biogás (%)	
	R1	R2	R1	R2
48	1033,1 ± 108,2	1325,6 ± 105,9	54,3 ± 2,1	59,9 ± 2,4
72	901,7 ± 65,3	1068,7 ± 48,3	60,5 ± 1,3	67,7 ± 1,3
96	648,9 ± 95,3	860,4 ± 54,1	62,9 ± 1,2	70,9 ± 1,1

Tabela 6 - Produção de biogás e porcentagem de metano produzido pelos reatores R1 e R2. Adaptado de Yan et al (2024).

Com isso, constata-se que, embora a produção de biogás seja inversamente proporcional ao tempo de retenção do lodo no reator, seu percentual de metano aumenta seguindo o mesmo fator. Isso pode ser explicado pela maior eficiência de R2 na degradação de DQO e produção de ácidos graxos voláteis em tempo de retenção adequado para que estes também sejam degradados a metano, fazendo com que a acidez do meio fique controlada.

Outra proposta estudada por pesquisadores como Kumar et al (2022), Avila et al (2021), Peris et al (2021) e Sharma et al (2021) é o uso de microalgas para degradação não só de pesticidas possivelmente presentes nos esgotos, como também resíduos de tintas, surfactantes, antibióticos, substâncias de origem petroquímica, entre outros contaminantes emergentes (Kumar et al, 2022). O uso desses organismos também promove a assimilação de nitrogênio, fósforo e outros nutrientes e produz biomassa que pode ser utilizada como biofertilizante.

O estudo de Avila et al (2021) avaliou o desempenho de um consórcio de microalgas verdes unicelulares *Chlorella sp.* e *Scenedesmus sp.* na degradação de três agrotóxicos hidrofóbicos e o potencial de produção de metano: os inseticidas clorpirifós e cipermetrina, e

o herbicida oxadiazona. O trabalho foi executado em frascos Erlenmeyer de 250 mL contendo 100 mL do consórcio, coletado de um fotobioreator semiaberto tubular de 1 m³. Os frascos foram agitados orbitalmente a 100 rpm em temperatura de 25 ± 1°C. Soluções em metanol de cada agrotóxico analisado foram adicionadas em concentração final de 1 mg/L. Adicionalmente, foram analisados frascos com o papel de controle utilizando biomassa de microalgas mortas (autoclavada a 121°C por 20 minutos) para determinar a remoção de analito por sorção. Um reator sem a adição dos pesticidas foi utilizado como branco para obter o efeito químico do crescimento endógeno do consórcio, que foi estimado pelo consumo de oxigênio dissolvido. Outras influências foram analisadas por um controle abiótico com os pesticidas e sem as microalgas. As concentrações residuais dos pesticidas nas fases líquida e sólida foram determinadas após 2 e 7 dias do início do experimento, enquanto a detecção de subprodutos advindos dos analitos na fase líquida foi feita a 0, 2 e 7 dias. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos pelo estudo para remoção dos contaminantes.

Fenômenos (%)	Clorpirifós	Cipermetrina	Oxadiazona
Remoção da fase líquida	97,3	73,9	88,4
Adsorção para fase sólida	61,9 ± 5,8	60,1 ± 11,1	32,8 ± 12,7
Degradação total	35,4 ± 7,1	13,8 ± 2,7	55,5 ± 15,6
Fotodegradação e outros fatores abióticos	16,3 ± 4,5	27,1 ± 12,0	0,0
Biodegradação	19,1	-	55,5

Tabela 7 - Biodegradação dos agrotóxicos pelo consórcio de microalgas. Fonte: Adaptado de Avila et al (2021)

Segundo o estudo, a remoção abiótica da cipermetrina foi maior que a degradação total, portanto a biodegradação não pôde ser quantificada. Enquanto isso, o estudo obteve uma maior biodegradação para oxadiazona e uma maior adsorção para o clorpirifós. Contudo, este último teve uma maior quantidade removida da fase líquida.

A evolução da concentração de biomassa nos reatores de microalgas pode ser um indicador da toxicidade e da inibição da atividade biológica causada pelo analito. Porém, conforme mostrado no gráfico da Figura 5 (extraído do próprio estudo), a concentração de biomassa nos reatores aumentou em 8%, 19% e 15% para o clorpirifós, a cipermetrina e a oxadiazona, respectivamente. Isto mostra que esses agrotóxicos não apresentaram toxicidade para as microalgas.

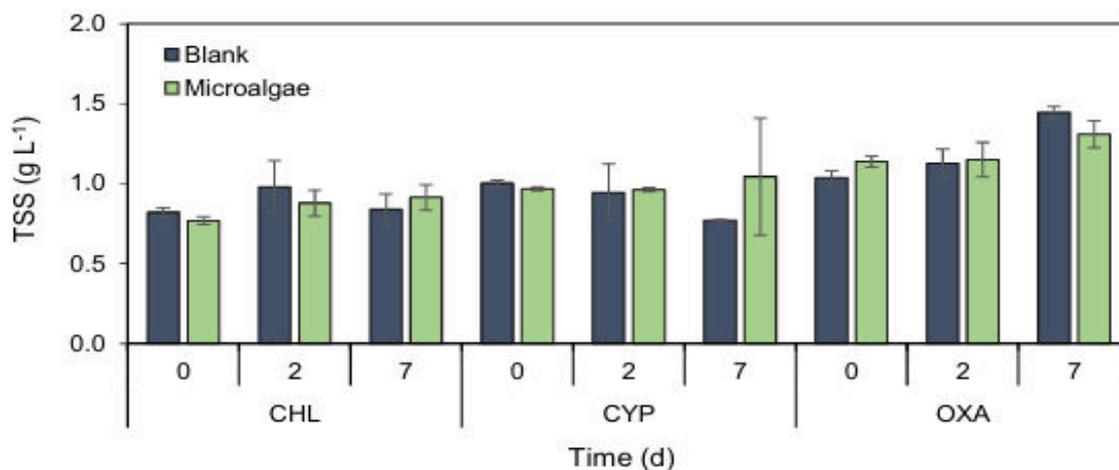


Figura 5 - Gráfico da concentração de biomassa para cada analito após 0, 2 e 7 dias do início dos experimentos (TSS: Sólidos Suspensos Totais; Blank: Branco; Microalgae: microalgas; CHL: Clorpirifós; CYP: Cipermetrina e OXA: Oxadiazona). Fonte: Avila et al (2021)

Para avaliar o potencial de produção de metano, foram realizados testes de potencial bioquímico de metano utilizando soluções de microalgas em suspensão advindas das análises de degradação dos agrotóxicos. Volumes de 500 mL de solução dos frascos foram deixados em repouso durante 12 horas para decantação. Na sequência, os sobrenadantes foram removidos, e 250 mL das soluções de biomassa decantada foram utilizadas como substrato.

Foi utilizado como inóculo lodo advindo de reatores da ETE Riu Sec em Barcelona, Espanha. O lodo foi incubado a 37°C durante 13 dias, para reduzir a produção de biogás por crescimento endógeno. Os ensaios foram conduzidos em garrafas de vidro de 120 mL contendo o substrato, o inóculo e água de diluição para atingir um volume de 80 mL, a 37°C e em triplicata. Cada garrafa foi preenchida com N₂ para promover condições anaeróbias. Como branco, foram utilizadas garrafas contendo apenas o inóculo, para medir a produção de biogás devido ao crescimento endógeno. O experimento foi finalizado após cessar a geração de biogás. A produção resultante foi calculada subtraindo a geração do branco da das garrafas contendo substrato. Por fim, a quantidade de metano produzida foi determinada por cromatografia a gás. Os resultados foram expressos como o volume em mililitros de metano gerado por massa de sólidos voláteis (SV) do substrato em condições normais de temperatura e pressão (CNTP; 273,15 K e 1,0133 bar).

A Tabela 8 mostra os principais resultados dessa parte do estudo:

Agrotóxico	Quantidade de Metano (%)	Rendimento de Metano (NmL CH ₄ /g SV)
Clorpirifós	77	4.557,9 ± 231,2
Cipermetrina	77	4.879,6 ± 50,0
Oxadiazona	78	2.919,1 ± 246,8

Tabela 8 - Potencial de produção de metano para o substrato contendo concentrações residuais dos agrotóxicos analisados. Adaptado de Avila et al (2021).

Este estudo, então, evidencia o potencial da biorremediação por microalgas para a degradação de pesticidas, e que a persistência de 2,7% de clorpirifós, 26,1% de cipermetrina e 11,6% de oxadiazona não inibiram a produção de biogás. Isto representa um método promissor para remover quantidades excessivas de agrotóxicos do esgoto que poderiam possivelmente inibir a produção de biogás

Por outro lado, o estudo de Donlon et al (1995) verificou a toxicidade de diversos compostos aromáticos nitrogenados - utilizados na fabricação de agroquímicos, bem como tintas, remédios e explosivos - e sua influência na produção de biogás utilizando como inóculo o lodo de um reator UASB do sistema de tratamento de efluentes químicos de uma unidade da petrolífera Shell, na Holanda; e um substrato contendo as seguintes substâncias:

Substância	Concentração (mg/L)
NaHCO ₃	5.000
NH ₄ Cl	280
CaCl ₂ . 2H ₂ O	10
K ₂ HPO ₄	250
MgSO ₄ . 7H ₂ O	100
Extrato de levedura	100
H ₃ BO ₃	0,05
FeCl ₂ . 4H ₂ O	0,05
ZnCl ₂	0,05
MnCl ₂ . 4H ₂ O	0,05
CuCl ₂ . 2H ₂ O	0,05
(NH ₄)SeO ₃ . 5H ₂ O	0,05
AlCl ₃ . 6H ₂ O	2
NiCl ₂ . 6H ₂ O	0,05
Na ₂ SeO ₃ . 5H ₂ O	0,1
EDTA	1
Resazurina	0,2
HCl 36% (mL/L)	0,001

Tabela 9 - Substrato utilizado no estudo de Donlon et al (1995).

Como resultados, foram obtidas as concentrações que inibiram 20, 50 e 80% da atividade metanogênica do lodo em micromolares (μM). Os compostos menos tóxicos verificados foram: benzeno, benzoato, fenol e as aminas aromáticas. Já os mais tóxicos aferidos foram o nitrobenzeno, os nitrofenóis e as nitroanilinas. Na Tabela 10, são listados os compostos utilizados no estudo e os resultados obtidos. Compostos com toxicidade acima de 70.000 μM foram considerados não tóxicos.

Substância	Massa molar (M)	Log P	Concentração inibitória da atividade microbiana (μM)		
			20%	50%	80%
Benzeno	78	1,95	10.580	20.500	insolúvel acima de 24.000 μM
Anilina	93	0,9	5.000	9.670	14.100
Nitrobenzeno	123	1,85	41	81	210
2-Nitroanilina	138	1,83	7	14	70
3-Nitroanilina	138	1,37	7	30	212
2-Fenilenodiamina	108	0,15	9.760	18.920	27.500
3-Fenilenodiamina	108	0,03	29.500	67.500	Não tóxico
Fenol	94	1,46	7.140	13.830	20.510
2-Aminofenol	109	0,57	1.650	3.210	4.920
3-Aminofenol	109	0,16	9.700	18.810	27.100
4-Aminofenol	109	0,104	7.330	14.220	21.100
2,4-Diaminofenol	124	Não disponível	146	283	510
2-Nitrofenol	139	1,79	46	89	200
3-Nitrofenol	139	2	40	115	295
4-Nitrofenol	139	1,91	31	61	180
2,4-Dinitrofenol	184	1,67	22	43	130
2,5-Dinitrofenol	184	1,8	6	114	270
Ácido benzoico	122	1,87	34.900	Não tóxico	Não tóxico
Ácido 2-aminobenzoico	137	1,21	31.100	67.000	Não tóxico

Ácido 3-aminobenzoico	137	0,2	Não tóxico	Não tóxico	Não tóxico
Ácido 4-aminobenzoico	137	0,68	Não tóxico	Não tóxico	Não tóxico
Ácido 2-nitrobenzoico	167	1,28	277	538	980
Ácido 3-nitrobenzoico	167	1,83	50	96	140
Ácido 4-nitrobenzoico	167	1,89	30	120	250
2,4-Dinitrotolueno	182	2,0	5	27	59

Tabela 10 - Concentrações inibitórias dos compostos estudados. Adaptado de Donlon et al, 1995.

11. Conclusões

A aplicação de forma desordenada e sem um manejo apropriado de pesticidas pode levar ao carreamento dessas substâncias para os corpos d'água, além de sua presença em alimentos para consumo humano torná-lo possível de ser encontrado nos esgotos, causando diversos problemas ambientais e de saúde animal e humana, mesmo em concentrações de ordem micro ou nano. O fato de esses compostos não serem eliminados pelo tratamento convencional de água e efluentes torna o problema mais significativo. Por isso, os métodos apresentados são de grande relevância atualmente e devem ser avaliados de acordo com sua eficiência e custo-benefício para sua implantação em larga escala e, assim, aumentar a utilização do biogás como fonte energética alternativa e aumentar os ganhos ambientais relacionados. Contudo, ainda há poucos estudos relacionados à toxicidade causada pelos agrotóxicos aos micro-organismos que promovem a digestão anaeróbia - e, por conseguinte, a produção de biogás.

11.1. Recomendações Para Trabalhos Futuros

Como mencionado nos resultados, não foram encontrados estudos brasileiros sobre o assunto, mesmo sendo o maior consumidor de agrotóxicos do mundo. Então recomenda-se realizar estudos para cada um dos agrotóxicos listados no item 5.2, por serem os mais utilizados no país, com destaque para o glifosato, que merece uma atenção especial por ter um grande potencial de eutrofização de corpos d'água, devido ao fósforo contido em sua fórmula química.

Recomenda-se também expandir o estudo bibliométrico para outras bases de dados, como Web of Science, SciELO, entre outras possíveis de se acessar pelo Portal de Periódicos da CAPES.

Outra recomendação é analisar as metodologias apresentadas quanto aos seus custos de implantação e operação, algo que faltou ao conteúdo dos artigos selecionados.

12. Referências

- ADÍLIO, J. et al. Campus de São Carlos. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-30042019-154335/publico/Tese_Penna_JorgeA_v1.pdf>. Acesso em: 18 de novembro de 2024.
- AQUINO, S. F. et al. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 12, n. 2, p. 192–201, jun. 2007. Acesso em 9 de novembro de 2024.
- AZEVEDO, R. C. DE; ENSSLIN, L.; JUNGLES, A. E. A Review of Risk Management in Construction: Opportunities for Improvement. Modern Economy, v. 05, n. 04, p. 367–383, 2014. Acesso em 28 de dezembro de 2024.
- BÁRBARA BERMUDEZ SIQUEIRA; THAIANY S. C. BRESSIANI. O uso de agrotóxicos e os impactos na saúde do trabalhador rural: uma revisão sobre o herbicida glifosato. v. 25, n. 2, 26 maio 2023. Acesso em 14 de novembro de 2024.
- BUFFON, P.; DE, T. PROKNOW-C: DA SELEÇÃO DE UM PORTFÓLIO DE ARTIGOS A ANÁLISE SISTÊMICA SOBRE POLÍTICAS PÚBLICAS E INCENTIVOS FISCAIS VOLTADOS À INOVAÇÃO E AO EMPREENDEDORISMO. Revista Reuna, v. 28, n. 2, p. 84–103, 2023. Acesso em 24 de dezembro de 2024.
- CAVALEIRO, A.; ALVES, M. Digestão anaeróbia. Revista de Ciência Elementar, v. 8, n. 1, 30 mar. 2020.. Acesso em 18 de outubro de 2024.
- Censo Demográfico 2022 Características dos domicílios Resultados do universo. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3106/cd_2022_domicilios.pdf>. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- COSTA, David Freire. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-18062024-143823/pt-br.php> . Acesso em 11 de outubro de 2024.
- CZARNY, J. et al. The Toxic Effect of Herbicidal Ionic Liquids on Biogas-Producing Microbial Community. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 16, n. 6, p. 916, 14 mar. 2019. Acesso em 16 de janeiro de 2025.
- DA CONCEIÇÃO SOARES, Rainy. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO USO DE BIOGÁS COMO COMBUSTÍVEL. SILVA, v. 2, p. 2. Acesso em 25 de agosto de 2024.
- DE SOUZA COSTA, E.; BARBOSA, O.; GANDHI, F. COLETÂNEA EM SANEAMENTO AMBIENTAL - SÉRIE TEMÁTICA: TECNOLOGIAS AMBIENTAIS - REATORES ANAERÓBIOS DE MANTA DE LODO (UASB): Uma abordagem

concisa. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<http://www.coamb.eng.uerj.br/download/coamb-TA-Volume5.pdf>>. Acesso em 11 de outubro de 2024.

- DONLON, B. et al. Toxicity of N-substituted aromatics to acetoclastic methanogenic activity in granular sludge. v. 61, n. 11, p. 3889–3893, 1 nov. 1995. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- DU, W. et al. Biomass as residential energy in China: Current status and future perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 186, p. 113657–113657, 1 out. 2023. Acesso em 2 de janeiro de 2025.
- EDUARDO PACHECO JORDÃO; CONSTANTINO ARRUDA PESSÔA. Tratamento de esgotos domésticos. Rio de Janeiro: Ed. Do Autor, 2005. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- FAOSTAT. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP/visualize>>. Acesso em 4 de janeiro de 2025.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. How to feed the world in 2050. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf>. Acesso em 4 de janeiro de 2025.
- GEST; PROD; SÃO, C. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho A bibliometric analysis of strategy and performance measurement. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/gp/a/sKh5wfCCGv68fdRP8GStLXC/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 29 de dezembro de 2024.
- HU, D. et al. Improvement of sludge characteristics and mitigation of membrane fouling in the treatment of pesticide wastewater by electrochemical anaerobic membrane bioreactor. *Water Research*, v. 213, p. 118153–118153, 2 fev. 2022. Acesso em: 30 de dezembro de 2024.
- Hu, X. et al. Effect of fipronil on biogas production performance during anaerobic digestion of chicken manure and corn straw. *J Environ Sci Health B*. 2019;54(6):449-458. doi: 10.1080/03601234.2019.1592639. Epub 2019 Apr 2. PMID: 30939985. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- IMPRENSA NACIONAL. DECRETO No 10.846, DE 25 DE OUTUBRO DE 2021 - DOU - Imprensa Nacional. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.846-de-25-de-outubro-de-2021-354622848>>. Acesso em 22 de outubro de 2024.

- JI, J. et al. Anaerobic membrane bioreactors for treatment of emerging contaminants: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 270, p. 110913, 15 set. 2020. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- KUMAR, N. et al. Valorization of wastewater through microalgae as a prospect for generation of biofuel and high-value products. *Journal of Cleaner Production*, p. 132114, maio 2022. Acesso em 2 de janeiro de 2025.
- L12114. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12114.htm>. Acesso em 22 de outubro de 2024.
- L13576. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm>. Acesso em 22 de outubro de 2024.
- LARISSA. Causas Patológicas Na Construção Civil: Estudo De Caso Em Uma Construtora Do Município De Juazeiro Do Norte. *Academia.edu*, 20 ago. 2019. Acesso em 17 de janeiro de 2025.
- LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. DE. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. *Saúde em Debate*, v. 42, n. 117, p. 518–534, jun. 2018. Acesso em 22 de outubro de 2024.
- LU, J.; GAO, X. Biogas: Potential, challenges, and perspectives in a changing China. *Biomass and Bioenergy*, v. 150, p. 106127, jul. 2021. Acesso em 17 de janeiro de 2025.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE RESOLUÇÃO Nº 430/2011. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627>. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- NBR 9648 - Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário - Copyright © 1986, ABNT–Associação. Disponível em: <<https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-de-santa-catarina/hidraulica/nbr-9648-estudo-de-concepcao-de-sistemas-de-esgoto-sanitario/17149466>>. Acesso em: 5 de janeiro de 2025.
- Painel do Agronegócio. Disponível em: <<https://dee.rs.gov.br/painel-agro>>. Acesso em 5 de junho de 2024.
- PASSAMANI, F. VITÓRIA 2012 UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL ANA CAROLINA GUEDES LIMA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO REATOR UASB DA ETE-UFES. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://ambiental.ufes.br/sites/ambiental.ufes.br/files/field/anexo/avaliacao_do_pote>

ncial_energetico_do_biogas_produzido_no_reator_uasb_da_ete-ufes_reduzido.pdf>. Acesso em 9 de novembro de 2024.

- PERES, L. J. S. et al. EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO DE COMUNIDADES RURAIS POR MEIO DE FOSSA SÉPTICA BIODIGESTORA. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, , v. 7, n. 1, p. 020-036, jan./mar. 2010. Acesso em: 5 de janeiro de 2025.
- PIB RS Anual. Disponível em: <<https://dee.rs.gov.br/pib-anual>>. Acesso em 5 de junho de 2024.
- PULSHEN, A. et al. Tratamento biológico de efluentes sanitários em ETE mista. Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento De Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, v. 3, 2013. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- Resultados do PIB Trimestral do Rio Grande do Sul - 4.º trimestre de 2022. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.estado.rs.gov.br/upload/arquivos//pib-trimestral-rs-4-trim-2022-nt-dee-73.pdf>>. Acesso em 5 de junho de 2024.
- Revista DAE - Artigo - Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. Disponível em: <<https://revistadae.com.br/site/artigo/1173-Fatores-que-influenciam-a-digestao-anaerobia>>. Acesso em 23 de outubro de 2024.
- SISTEMAS, F. P. Fundamentos do Processo de Digestão Anaeróbia. Disponível em: <<https://energiaebiogas.com.br/fundamentos-do-processo-de-digestao-anaerobia>>. Acesso em 18 de outubro de 2024.
- TCHOBANOGLIOUS, G. Wastewater engineering: treatment and resource recovery. New York, NY: McGraw-Hill Education, p. 1, 2014. Acesso em 5 de janeiro de 2025.
- TECNOLOGIA, I. PIB do Agronegócio Brasileiro - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 5 de junho de 2024.
- UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ -UNIOESTE CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA VIABILIDADE DO USO DO BIOGÁS DA BOVINOCULTURA E SUINOCULTURA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E IRRIGAÇÃO EM PROPRIEDADES RURAIS ANDERSON COLDEBELLA CASCAVEL -Paraná -Brasil. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2841/1/Anderson%20Coldebella.pdf>>. Acesso em 9 de novembro de 2024.
- VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Editora UFMG, 2005. Acesso em 5 de janeiro de 2025.

- World Population Prospects. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://digitallibrary.un.org/record/4053940?v=pdf>>. Acesso em 4 de janeiro de 2025.
- YAN, J. et al. Anaerobic degradation of pesticide wastewater: improving sludge characteristics and reducing membrane fouling with combined tandem UASB+membrane system with high velocity settlers. Water Research, v. 263, p. 122174–122174, 29 jul. 2024. Acesso em 2 de janeiro de 2025.
- ZILOTTI, H. A. R.. POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE CASCAVEL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CASCAVEL PARANÁ -BRASIL FEVEREIRO -2012. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www5.unioeste.br/portalunioeste/arq/files/PPGEA/Dissertacao_Helcio_A_Zilotti.pdf>. Acesso em 25 de agosto de 2024.