

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA VEGETAL E
BIOPROCESSOS

DISSERTAÇÃO

**Meta-análise da eficiência de pré- tratamentos aplicados ao substrato na
produção de biogás**

Thuane Mendes Anacleto

2020

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências da Saúde
Curso de Pós-Graduação em Biotecnologia Vegetal e Bioprocessos

**META-ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE PRÉ- TRATAMENTOS APLICADOS AO
SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

THUANE MENDES ANACLETO

Sob a orientação dos professores

Alex Enrich Prast

Vinícius Peruzzi de Oliveira

Dissertação submetida ao Curso de Pós-graduação em Biotecnologia Vegetal da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Biotecnologia vegetal.

Rio de Janeiro

Agosto de 2020

A todos os marginalizados, que tiveram suas forças exauridas na corrida desigual em busca de seu direito constitucional, a educação.

Dedico e ofereço

AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar minha imensa gratidão a toda família biogeoquímica que, pacientemente, me acolheu dentro do universo científico me dando suporte e carregando junto comigo todas as angustias que assolam essa trajetória.

À Tiphane, que participou ativamente de toda a minha iniciação científica e que, mais do que eu mesma, acreditou no meu potencial para realizar o mestrado, tomando a frente à responsabilidade de me conduzir durante todo o processo seletivo, me apoiando e me auxiliando até no menor dos detalhes.

Aos meus orientadores, Professor Alex e Professor Vinícius que por diversas vezes se colocaram à disposição para atuar além da posição de orientadores acadêmicos, assumindo papel de terapeutas/conselheiros. Pelo esforço e confiança dedicado a mim para me assegurar o aproveitamento máximo de todas as oportunidades e experiências de valor, para tornar minha formação a mais completa possível. A ambos, ressalto meu imenso agradecimento em poder ter tão próximo e acessível o exemplo de profissional como vocês, a quem admiro e me espelho na pretensão de que, com o apoio de vocês, um dia possa me tornar.

A minha mãe que, apesar de ainda insatisfeita por eu não ter cursado administração, não mediu esforços para garantir que eu seguisse a trajetória profissional definida desde a infância, a ciência.

Aos meus amigos, Neiva, Gleidson, Beatriz, Hugo, Humberto, Ju, João, Sula e Diego que tem sido minha rede de apoio, estando ao meu lado em todas as situações, compartilhando alegrias, frustrações e terapias holísticas.

Por fim, mas não menos importante, ao grupo de pesquisa em biogás da Universidade de Linköping onde eu tive a oportunidade de imergir no mundo do biogás e se bombardeada, de forma positiva, por aprendizados teóricos e práticos referentes a essa área.

RESUMO

O biogás é produzido durante a digestão anaeróbica, configurando-se como uma fonte de energia limpa capaz de proporcionar a reutilização de vários compostos ao tratar diferentes resíduos orgânicos. A hidrólise é o primeiro passo e principal fator limitante na digestão anaeróbica e vários pré-tratamentos físicos, químicos e biológicos são aplicados a uma ampla gama de substratos, a fim de melhorar a degradação da matéria orgânica e consequentemente aumentar o rendimento de metano. Realizamos uma revisão sistemática com meta-análise incluindo mais de mil artigos, a fim de avaliar a eficiência desses pré-tratamentos isoladamente e combinados em uma ampla gama de substratos orgânicos. Os resultados indicaram que a eficiência do pré-tratamento é determinada pela composição química do substrato. O rendimento de metano foi maior quando: a) o substrato proteico foi submetido ao pré-tratamento biológico: b) substrato lignocelulósico ao pré-tratamento químico e suas respectivas combinações e c) os substratos com alta concentração de lignina foram submetidos a uma combinação de pré-tratamentos químicos. A escolha correta do pré-tratamento fornece a degradação máxima do substrato, o que implica uma conversão maior e mais rápida em metano, evitando gastos com pré-tratamentos baixos ou ineficientes e reduzindo custos e tempo de produção de biogás, melhorando a eficiência da produção de biogás. Uma avaliação detalhada dos pré-tratamentos mais apropriados para as culturas mais relevantes em todo o mundo mostra que a aplicação de produtos químicos combinados com pré-tratamentos físicos poderia aumentar o rendimento de biogás dos resíduos agrícolas em mais de 200%, produzindo mais energia limpa que poderia substituir uma enorme quantidade de combustíveis fósseis que contribui muito para a descarbonização da sociedade, um compromisso internacional acordado no Acordo de Paris.

ABSTRACT

Biogas is produced during anaerobic digestion, being a truly clean energy source that also provides the reutilization of several elements while treating different organic waste sources. Hydrolysis is the first step and main limiting factor of Anaerobic Digestion and several physical, chemical, biological pretreatments have been applied to a wide range of substrates in order to improve organic matter degradability and consequently increase methane yield. We performed a systematic review with meta-analysis including more than thousand papers in order to evaluate the efficiency of these pre-treatments alone and combined on a wide range of organic substrates. Here we show that the efficiency of pretreatment is determined by substrate chemical composition. Methane yield was higher when: a) protein substrate has been subjected to biological pretreatment: b) lignocellulosic substrate to chemical pre-treatment and their respective combinations and c) lignin dominated substrates were subjected to a combination of chemical pretreatments. The correct choice of pre-treatment provides maximum substrate degradation which implies in a larger and quicker conversion to methane, preventing the outlay of money in low or inefficient pretreatments and reducing costs and biogas production time, improving Biogas production efficiency. A detailed evaluation of the most appropriated pre-treatments to the globally most relevant crops shows that the application of chemical combined with physical pre-treatments could increase the biogas yield from agriculture waste in more than 200%, producing more clean energy that could replace a huge amount of fossil fuels highly contributing to societal decarbonization, an international commitment agreed in the Paris Agreement.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Biogás	15
1.1.1 Metano	17
1.2 Processo operacional de Biometano	18
1.2.1 Seleção e coleta do substrato	18
1.2.2 Pré-tratamento	19
1.2.3 Digestão anaeróbica	22
1.2.4 Purificação	24
1.3 Meta-análise	25
2. OBJETIVOS.....	26
2.1 Objetivo Geral	26
2.2 Objetivos Específicos	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 Delineamento experimental.....	27
3.2 Triagem de estudos e extração de dados	28
3.3 Classificação química dos substratos	29
3.4 Análises estatísticas e interpretação dos dados.....	29
4. RESULTADOS	31
4.1 Detalhamento dos dados coletados	31
4.1.1 Análise dos artigos	32
4.2 Quantificação em percentagem de metodologias de pré-tratamentos incluídas na meta-análise.....	33
4.3 Perfil das categorias de pré-tratamento	34
4.4 Análise da eficácia dos pré-tratamentos	40
4.5 Averiguação do desempenho dos métodos mais eficientes.....	44
4.5.1 Substrato Lignocelulósico	44
4.5.2 Substrato Proteico	48
4.5.3 Substrato Lipídico.....	49
5. DISCUSSÃO.....	52

5.1	Uso de dados publicados como solução para o preenchimento de lacunas persistentes na literatura	52
5.2	Substratos define a eficiência do pré-tratamento	53
5.3	Implicações no aspecto científico, ambiental, econômico e social	57
6.	CONCLUSÃO	58
7.	REFERÊNCIAS	59
8.	ANEXO	67
8.1.	Conversor auxiliar para interpretação do $\ln(R)$ como valores percentuais	67
8.2	Metodologias de pré-tratamento por categorias	68
8.2.1	Pré-tratamentos químicos	68
8.2.2	Pré-tratamentos físicos	70
8.2.3	Pré-tratamento químico-físico	72
8.2.4	Pré-tratamentos biológicos	76
8.2.5	Pré-tratamentos de combinações biológicas	80
8.3	Listagem de artigos	82
8.4	Planilha de coleta de dados com descrição dos pré-tratamentos	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. Dados da operação de produção de biogás no Brasil em maio de 2020. Disponível em: https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/	17
Figura 2. Destino final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil (T/ano) ABRELPE, 2018/2019.....	19
Figura 3. Participação do pré-tratamento no processo de hidrólise, primeiro estágio da digestão anaeróbica. Adaptado de ASGHER et al., 2014.	20
Figura 4. Fluxograma das etapas da digestão anaeróbica. Adaptado de REA, J. 2014. ...	23
Figura 5. Tecnologias de purificação de biogás (Adaptado WARREN et al., 2012).	24
Figura 6. Fluxograma com as etapas da revisão sistemática para meta-análise da informação com as diferentes fases de uma revisão sistemática.	26
Figura 7. Fluxograma das etapas de seleção, triagem e análise dos artigos. Adaptado de CALDEIRA D. et al., 2014.....	33
Figura 8. Representação das metodologias incluídas em cada categoria de pré-tratamento com quantificação percentual das metodologias utilizadas individualmente.	34
Figura 9. Distribuição quantitativa das categorias de pré-tratamentos utilizados entre 1945 e 2018. Exclusivamente físicos em aplicação individual ou duas a três combinações metodológicas (verde); Exclusivamente biológicos em aplicação individual ou em misturas enzimáticas (vermelho); Exclusivamente químicos em aplicação individual ou duas a três combinações metodológicas (cinza); Combinações metodológicas químico-físicas (roxo); Combinações biológicas com duas a três metodologias química ou física (azul).....	35
Figura 10. Quantificação de metodologias de pré-tratamentos unicamente químicos de aplicação individual ou combinada para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.....	36
Figura 11. Quantificação de metodologias de pré-tratamentos unicamente físicos de aplicação individual ou combinada para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.....	37
Figura 12. Quantificação de metodologias de combinações físico químicas de pré-tratamento para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.....	38
Figura 13. Quantificação de metodologias de pré-tratamento biológicos para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.	39

Figura 14. Quantificação de metodologias de pré-tratamento biológico com combinações químicas e/ou físicas para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.	40
Figura 15. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de ln(R) do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato lignocelulósico. A) Substrato Lignocelulósico (Lignina<10%) é composto de biomassa vegetal com baixa concentração de lignina. B) Substrato Lignocelulósico (Lignina 10-25%) concentração que corresponde representativamente a maioria da biomassa vegetal. C) Substrato Lignocelulósico (Lignina>25%) é composto de biomassa com alta concentração de lignina.	41
Figura 16. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de ln(R) do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato O substrato proteico, composto por resíduos animais, microalgas ou qualquer fonte de proteína majoritária.	42
Figura 17. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de ln(R) do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato O substrato lipídico é representado por resíduos de óleo industrial, vegetais oleaginosos e águas residuais de matadouros.	43
Figura 18. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de ln(R) do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato O substrato misto não tem predominância de nenhum composto químico, é uma fonte quimicamente variada composta por codigestão, resto de alimentos e esgoto.	44
Figura 19. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de químicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou inferior a 10% de lignina.	44
Figura 20. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físicos em substrato lignocelulósico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	45
Figura 21. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou inferior a 10% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	45
Figura 22. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-químicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou inferior a 10% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	46

Figura 23. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-químicos em substrato lignocelulósico com concentração 10-25% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.....	46
Figura 24. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de químicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou superior a 25% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.....	47
Figura 25. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou superior a 25% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.....	48
Figura 26. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato predominantemente proteico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	49
Figura 27. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-biológicos em substrato predominantemente proteico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	49
Figura 28. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de químicos em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	50
Figura 29. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-químico em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	50
Figura 30. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	51
Figura 31. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físicos em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

Abrelpe	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANOVA	Análise de variância
ANP	Agencia Nacional do Petróleo
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COP21	21ª Conferência das Partes
COP22	22ª Conferência das Partes
DA	Digestão Anaeróbica
EPE	Empresa de pesquisa energética
GEE	Gases de efeito estufa
H ₂	Gás hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
HMF	Hidroximetilfurfural
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
lnR	Natural Log Response Ratio (Taxa de resposta do Log Natural)
MME	Ministério de Minas e Energia
N ₂	Gás nitrogênio
ODS	Objetivos de desenvolvimento sustentável
PCI	Poder calorífico inferior
pH	Potencial Hidrogeniônico

PRISMA	Itens de relatório preferenciais para análises sistemáticas e meta-análises
PSA	Adsorção por oscilação de pressão
RPM	Rotação por minuto
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TWh	Terawatt-hora

1. INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis detiveram por muitos anos o monopólio de fonte de energia primária global. A participação deste recurso em importantes acontecimentos como a Revolução Industrial atesta sua imensurável contribuição para o desenvolvimento do cenário globalizado que temos hoje (CARVALHO, J. F. 2008).

À medida que a exploração deste recurso se intensificou alguns aspectos negativos começaram a ser pontuados, tais como, a reserva finita, disposição geográfica fixa deste recurso que inviabiliza uma distribuição homogênea quanto a custo e tempo, as atividades exploratórias que podem gerar contaminação ao meio ambiente através da emissão de gases tóxicos, vazamento de solventes orgânicos e emissão de calor, ocasionando desequilíbrio na fauna e flora dos ecossistemas (FARIAS, L. M., SELLITTO, M. A., 2011).

O conjunto desses fatores danosos somado ao aumento da demanda energética global impulsionou a exploração de fontes de energia limpa, sobretudo, com o avanço vigoroso de políticas ambientais incentivadoras. Entre essas iniciativas podemos citar o Protocolo de Kyoto (1997), que propôs medidas rigorosas para limitar a emissão de gases de efeito estufa (GEE), por meio de aliança entre as nações (KUH, K. F. 2018). Em continuidade a esse tratado, foi implementado recentemente o Acordo de Paris (COP 21) e a Agenda 2030, ao qual, seguindo a linha da política antecessora, estabelecem responsabilizações na mitigação da emissão de GEE, desenvolvendo rotas que mantenham o desenvolvimento socioeconômico de forma sustentável.

De acordo com TOLMASQUIM M. T. et al., (2007), na trajetória do cenário brasileiro energético narrado pelos dados da EPE, as energias renováveis exibiam um declínio em sua representação na matriz energética nacional entre 1970 e 2005 que pode ser justificada pelo desequilíbrio entre o aumento da demanda interna e baixo incentivo a exploração de novas fontes e/ou tecnologias. Todavia, mesmo dentro deste cenário redutivo no setor energético, a década de 70 foi marcada pela promulgação de uma forte política nacional, o Proálcool- Programa Nacional do Álcool (1975), que vislumbrava o aumento da produção de etanol por meio de incentivo ao desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias capazes de atender a demanda interna e assim reduzir a dependência ao petróleo (ANDRADE et al.,

2009). Os resultados promissores desta política são notados atualmente, posicionando o Brasil como segundo maior produtor e consumidor mundial de biocombustíveis que, em conjunto com a bioeletricidade representam 18% na matriz energética nacional (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018).

Ademais, novas políticas nacionais vêm sendo implementadas para atender ao cumprimento dos acordos internacionais firmados, como o Renovabio, política nacional de biocombustíveis (Lei nº 13.576/2017), que estimula a expansão desta fonte na matriz energética nacional pautando-se no desenvolvimento social e econômico visando, sempre, o equilíbrio com o meio ambiente.

Neste contexto, compreendem-se como biocombustíveis, de acordo com a ANP, o etanol, o biodiesel e o biogás/ biometano. Dentre as três fontes citadas, o biogás tem sido cotado como mais promissor devido a sua flexibilidade em atender a demandas térmica, elétrica e automotiva.

1.1 Biogás

O biogás é uma fonte energética renovável produzida via digestão anaeróbica (DA) a partir da atividade de bactérias metanogênicas responsáveis pela degradação de matéria orgânica. A digestão anaeróbica, comparada às demais tecnologias de tratamento de resíduos, como compostagem e incineração é a mais eficiente tanto no aspecto ambiental, como ferramenta redutora do efeito poluidor de rejeitos, quanto econômico, devido à quantidade de energia recuperada (SURENDRA, K. C. et al. 2014).

Os principais constituintes do biogás são o metano (CH_4) (60-80% v/v) e o dióxido de carbono (CO_2) (20-40% v/v); outros gases, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO), também podem compor o biogás, porém em menores concentrações (SOUZA et al., 2010).

O gás bruto gerado pode passar por um processo de purificação que consiste na separação entre metano e demais gases, originando o biometano. A inclusão dessa etapa tem por objetivo aumentar a qualidade do recurso energético produzido, já que o potencial energético do biogás detém-se ao metano. Estima-se que cerca de 90% da energia do substrato é retido em metano (KOTHARI et al., 2010).

A eficiência do biogás não está contida apenas no seu potencial de produção energética, mas também nos efeitos indiretos resultantes da utilização dessa

tecnologia, tais como, a capacidade de descarbonização, reduzindo 10-13% das emissões atuais de gases de efeito estufa no mundo, potencial para gerar de 10.100 a 14.000 TWh (Terawatt-hora), e substituir até 10% do consumo de energia primária do mundo ou 23-32% do consumo mundial de carvão (WORLD BIOGAS ASSOCIATION, 2019), além de possuir aplicabilidade em setores variados.

A biomassa, matéria-prima responsável pela produção de biogás, é qualquer resíduo orgânico, podendo ter origem urbana, agrícola, pecuária e/ou de setores industriais, etc. (KOTHARI et al., 2010). A gama de setores de origem favorece a distribuição homogênea e descentralizada de energia, além disso, o biometano pode ser injetado diretamente nas redes de gás natural existentes, viabilizando o avanço no transporte deste produto para suprir a demanda de outros locais, estimulando assim uma aplicabilidade mais flexível, mesmo para uso não energético, como na substituição de metano fóssil por biometano usado na indústria química (STEPHAN, 2013).

No Brasil, em contraste a União Europeia, China e EUA, a exploração do biogás caminha a passos mais lentos. A produção de biogás no território nacional (Figura 1) é bem pequena se comparada à disponibilidade de recurso e ao tamanho do território. Entretanto, a valorização através de políticas nacionais tem estimulado o aumento da exploração dessa fonte promissora. O sudeste e o sul exibem uma representação significativa no setor operacional de biogás, como evidenciado nos dados da EPE (2020). Somando as duas regiões obtêm-se quase a totalidade das operações de produção de biogás nacional.

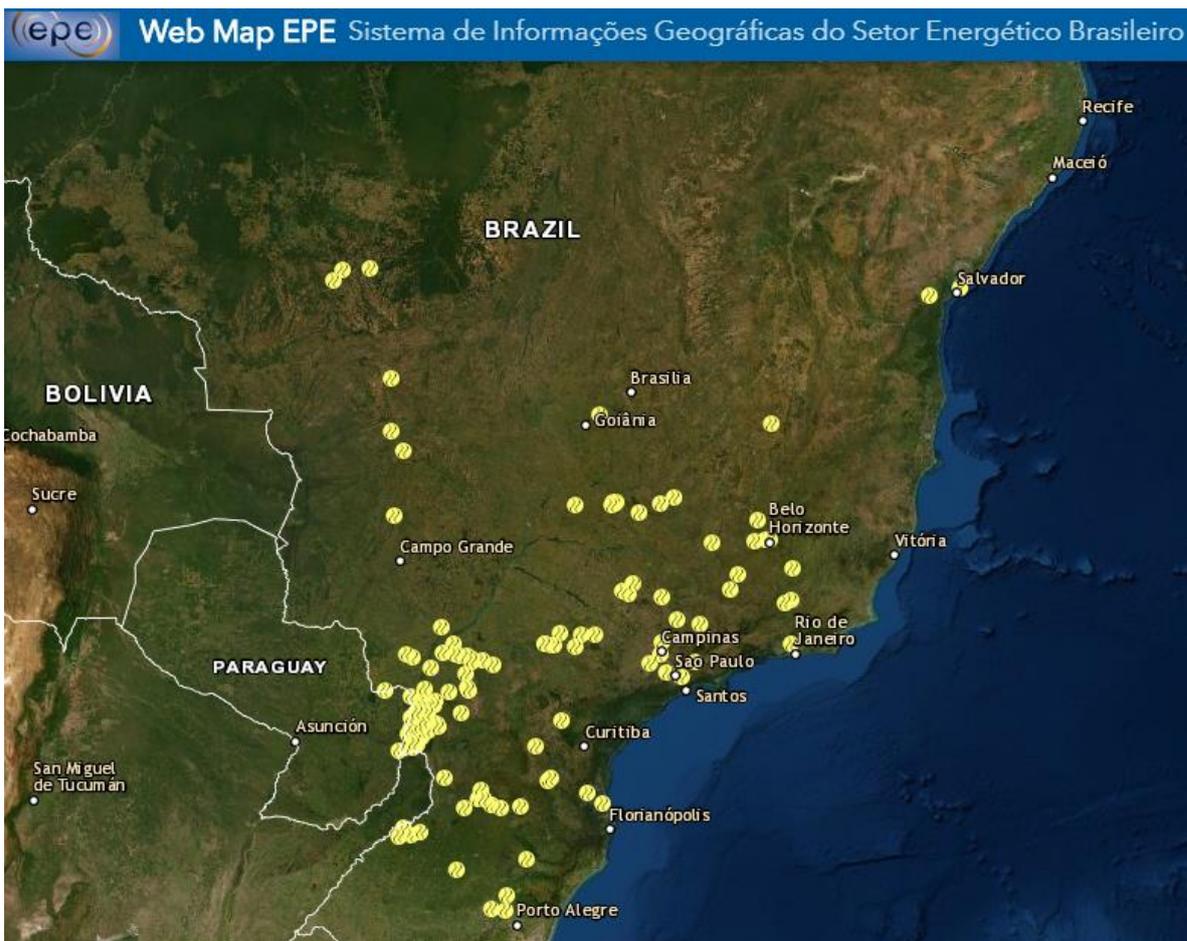


Figura 1. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. Dados da operação de produção de biogás no Brasil em maio de 2020. Disponível em: <https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>

De acordo com o RenovaBio, a Política Nacional de Biocombustíveis, o biogás/ biometano distingue-se positivamente dos demais biocombustíveis pela sua importante atuação na economia circular, valorizando economicamente os resíduos sólidos descartados através de sua conversão em recursos úteis (CHANG et al., 2011). Além disso, contribui fortemente para a implementação da Agenda 2030, adapta-se a quase todos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que se referem ao desenvolvimento socioeconômico e ambiental sustentável.

1.1.1 Metano

O metano (CH₄) é um gás gerado naturalmente a partir de processos fermentativos de ruminantes e da decomposição de matéria orgânica. É conhecido pela sua relevante contribuição em conjunto com o dióxido de carbono (CO₂) na intensificação do aquecimento global. A contribuição do metano destaca-se pelo

seu potencial de efeito estufa que é cerca de ~34 vezes mais potente que o dióxido de carbono (BEAULIEU et al, 2019). Uma medida passível a mitigação da emissão de CH₄ é o emprego de sua matéria geradora na produção energética.

O metano é um gás incolor, altamente combustível e não produz fuligem (CERVI et al., 2010). A qualidade do biogás está diretamente relacionada à concentração de metano presente no mesmo, quanto maior a sua contração maior será a eficiência energética do biogás. O poder calorífico inferior (PCI) é responsável pela determinação da quantidade de energia presente no combustível. O PCI do biometano pode passar de 465 para 11.661 kcal.kg⁻¹ quando a concentração de CO₂ é reduzida de 90 para 10% no biogás. (BILOTTA P. & ROSS, B. Z. L., 2016). A redução de CO₂ resulta da etapa de purificação durante o processo de geração de biometano.

1.2 Processo operacional de Biometano

O processo de geração de biometano fundamenta-se em quatro etapas: I. seleção e coleta do substrato, II. pré-tratamento, III. digestão anaeróbica e IV. purificação do biogás.

1.2.1 Seleção e coleta do substrato

O substrato compreende qualquer resíduo orgânico que esteja disponível, variando com os recursos e padrão de consumo de cada região. De acordo com Ministério do Meio Ambiente (2017), os resíduos orgânicos representam mais da metade dos resíduos sólidos totais coletados no Brasil. Compreende-se como substrato todo e qualquer resto orgânico sejam em escala doméstica, industrial ou rejeitos agropecuários.

Estima-se que no Brasil, são coletadas 183,5 mil toneladas de resíduos sólidos por dia em 90% do total de domicílios. A matéria orgânica representa 51,4% do lixo diário, e apenas 31,9% é composto de material reciclável inorgânico (IPEA, 2012).

Os últimos dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais- Abrelpe (2018/2019) mostram o crescimento na destinação adequada dos resíduos no país (Figura 2). Essa atitude denota um grande avanço e permite perspectivas otimistas quanto à valorização econômica dessa fonte energética com grande potencial de exploração em nosso território.

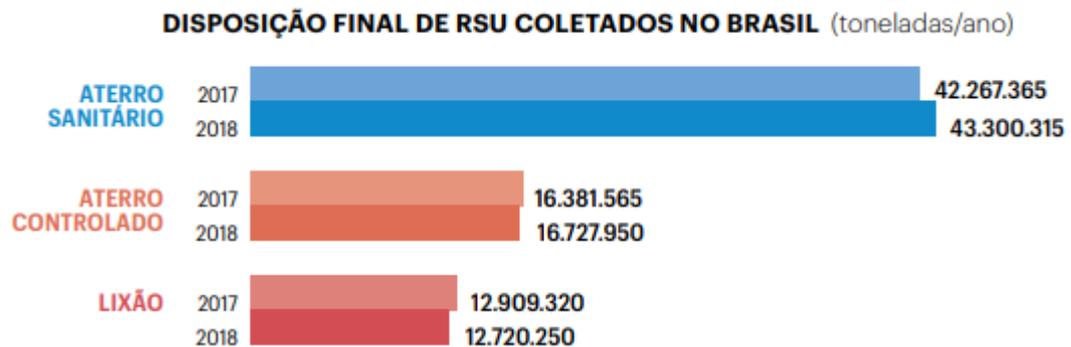


Figura 2. Destino final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil (T/ano) ABRELPE, 2018/2019.

É possível utilizar os resíduos como substrato de maneira individual ou em combinação, o que é denominado codigestão. Sempre considerando o balanceamento energético, em caso de codigestão com recursos em disposição geográfica diferentes, para que não haja um desbalanceamento em relação à geração/gasto de energia.

1.2.2 Pré-tratamento

O pré-tratamento é a etapa crucial na otimização da DA, atuando principalmente na etapa de hidrólise que, sob condições ideais, promove o aumento do rendimento de metano (ALVIRA et al., 2010). A influência do pré-tratamento no rendimento do produto final é amplamente descrita na literatura e têm demonstrado que o efeito do uso de diferentes tipos de pré-tratamentos em um mesmo substrato provoca impactos distintos no rendimento final do biometano (TAHERZADEH et al., 2008).

Os parâmetros que regulam o desempenho da atuação dos pré-tratamentos ainda apresentam algumas lacunas na literatura. Sabe-se que fatores como, pH, temperatura e umidade podem influenciar na geração de biogás (SCHNÜRER & JARVIS 2009), no entanto, apenas esses fatores não são suficientes para estimar o comportamento do pré-tratamento em um dado substrato.

O pré-tratamento pode atuar através da alteração da estrutura física do substrato, como na redução de tamanho do particulado (Figura 3), na alteração da composição química (KUMAR et al., 2009), por meio de rearranjos moleculares e

formação de novos compostos ou por meio de efeito combinado de ambas intervenções.

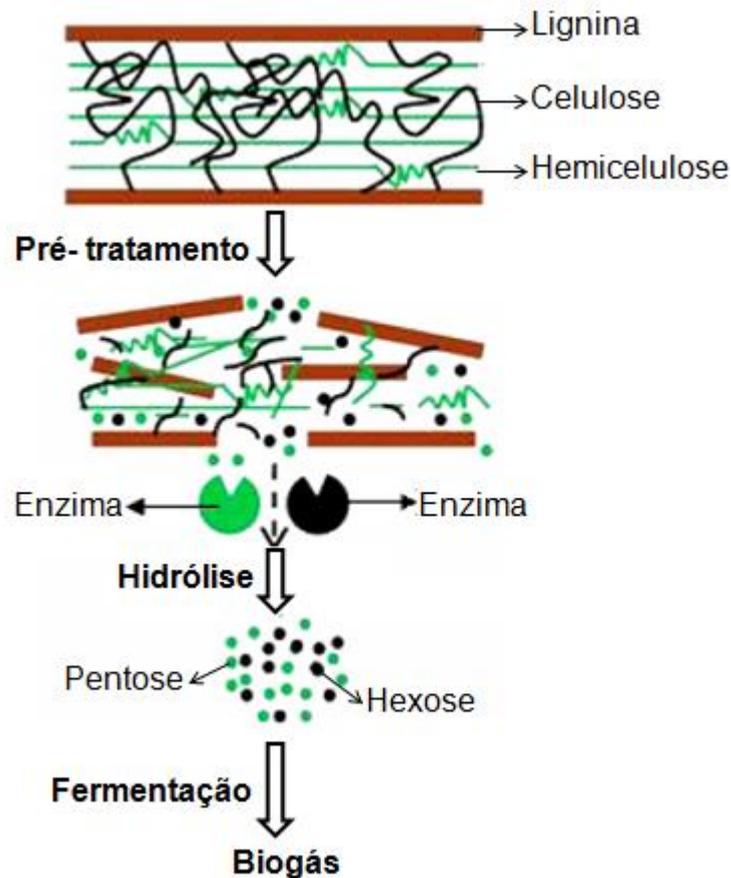


Figura 3. Participação do pré-tratamento no processo de hidrólise, primeiro estágio da digestão anaeróbica. Adaptado de ASGHER et al., 2014.

A investigação acerca do comportamento de degradação da matéria orgânica exposta a metodologias de pré-tratamentos descritas na literatura permite compreender e delinear os parâmetros fundamentais para conseguir maior assertividade na escolha do pré-tratamento.

Podemos classificar os pré-tratamentos em: físico, químico, biológico e combinações entre os mesmos (Material Suplementar- Tabela 8.2), de acordo com as diferentes forças ou energias consumidas no processo (ALVIRA et al., 2010).

- Físico

Este pré-tratamento é caracterizado pela alteração da estrutura física do substrato, seja por redução ou por degradação parcial das partículas, favorecendo

o aumento de superfície de contato para a etapa de hidrólise. As técnicas aplicadas no pré-tratamento físico (Material Suplementar- Tabela 8.2.2) incluem cominuição (moer, triturar, esmagar, cortar), térmico (explosão a vapor, temperatura, hidrotermólise), extrusão e irradiação (ultrassom e micro-ondas) (ZHENG et al., 2014).

A redução de tamanho do substrato permite o contato com toda a área do particulado, facilitando a atuação das enzimas provenientes de bactérias durante o processo de digestão anaeróbica. Ademais, essa redução de substrato promove uma diminuição drástica do desperdício de material potencial, além de influenciar no aceleração da velocidade do processo.

- Químico

Entre as três categorias de pré-tratamento discutidas, o pré-tratamento químico recebeu o maior interesse de pesquisa (ZHENG et al., 2014). Neste pré-tratamento a estrutura química do substrato é alterada, podendo haver nova conformação molecular e/ou formação de compostos químicos. Compreende-se como técnicas nesta categoria (Material Suplementar- Tabela 8.2.1) a oxidação, ozonificação, alcalinização, acidificação etc.

O rearranjo da estrutura química da matéria pode potencializar a degradação máxima dos componentes contidos no substrato. No que se refere a substratos agrícolas/ lignocelulósicos, por exemplo, sabe-se que sua configuração molecular consiste em partes com maior e menor densidade celulósica. Essa densidade define o grau de cristalinidade da matéria que, por sua vez, influencia na biodegradação. O pré-tratamento químico induz a redução da cristalinidade resultando no aumento do rendimento de biogás (ZHENG et al., 2014).

- Biológico

O pré-tratamento biológico (Material Suplementar- Tabela 8.2.4) distingue-se dos demais pelo uso de microrganismos, geralmente fungos. Algumas vantagens importantes são destacadas neste tratamento, tais como, baixo uso de produtos químicos e energia (YANG & WYMAN, 2008). O baixo investimento na produção torna, portanto, o pré-tratamento biológico mais rentável no aspecto econômico, além de possuir menor risco quanto à resíduo tóxico.

Contudo, a lentidão do processo de degradação da biomassa, a necessidade de um controle cuidadoso das condições de crescimento e um grande espaço para executar conferem grandes desvantagens (BEHERA et al., 2014).

1.2.3 Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica é um processo natural biológico que ocorre na ausência de oxigênio mediada por microrganismos, tendo como finalidade a degradação da matéria orgânica. Essa biodegradação, quando aplicada em forma de tecnologia de tratamento, resulta em produtos como o biofertilizante, de elevado valor estratégico para a produção agrícola, e o biogás, combustível gasoso potencialmente utilizável para a geração de energia elétrica, térmica ou automotiva (MME, 2016). Ademais, contribui na perspectiva socioambiental como alternativa para o tratamento de resíduos, permitindo a redução do potencial poluidor e dos riscos sanitários dos dejetos (AMARAL et al., 2004).

No que se refere à produção de biometano, o processo de digestão anaeróbica ocorre em um biodigestor sob condições ambientais monitoradas e controladas quanto a temperatura, podendo atuar em condições mesofílicas (37°C) ou termofílicas (55°C), pH, nível de amônia e carga de compostos orgânicos, o que afeta a estabilidade geral do processo (KARAKASHEV et al., 2005).

A conversão do substrato à metano é um processo complexo (Figura 4), dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (WEILAND et al., 2009).

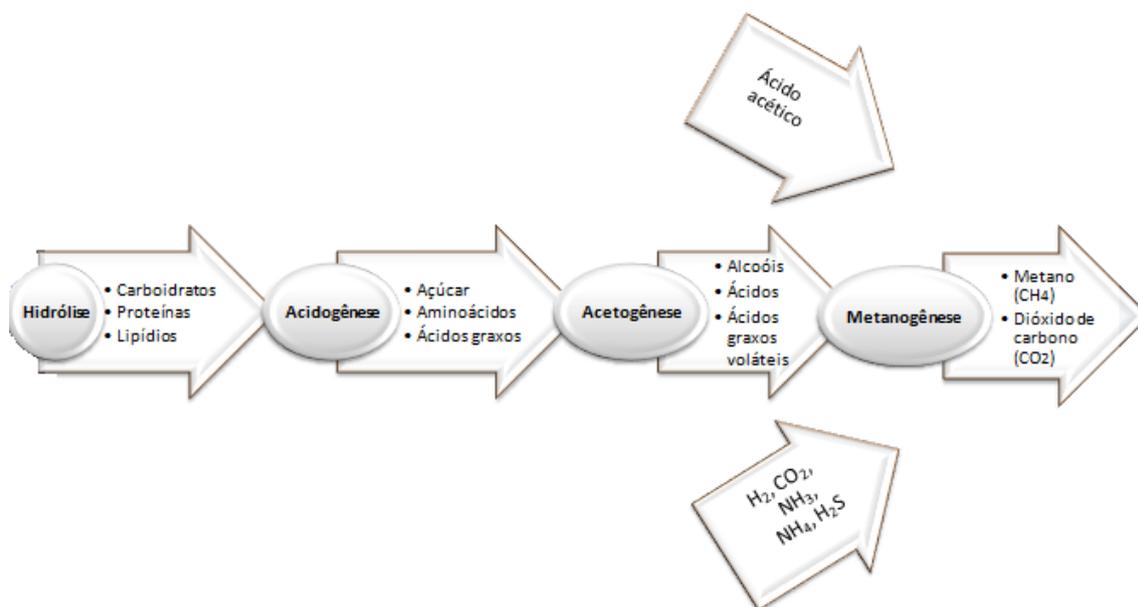


Figura 4. Fluxograma das etapas da digestão anaeróbica. Adaptado de REA, J. 2014.

A hidrólise ocorre através da ação de enzimas extracelulares, produzidas por microrganismos, e, como o próprio nome sugere, promove a quebra (lise) de polímeros orgânicos complexos por ação da água (hidro), reduzindo-os à orgânicos simples (ZHENG et al., 2014).

A fragmentação do substrato é necessária para convertê-lo a tamanhos e formas aptos a atravessarem as paredes celulares bacterianas para seu uso como fontes de energia ou nutrientes (KIM et al., 2003). A conversão em monômeros solúveis possibilita a fermentação que ocorre na etapa seguinte, a acidogênese, realizada a partir de vários anaeróbios e aeróbios facultativos. Durante esta etapa, ocorre a degradação desses compostos resultando na produção de dióxido de carbono, gás hidrogênio, álcoolis, ácidos orgânicos, alguns compostos de nitrogênio orgânico e alguns compostos orgânicos com enxofre (GERARDI, 2003).

Na acidogênese, o produto de interesse é o ácido acético/ acetato, os demais compostos formados seguem para etapa de acetogênese, no qual, são convertidos a acetato. Por fim temos a metanogênese, nesta etapa há formação de metano através de moléculas de acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. Essa transformação é mediada por bactérias metanogênicas.

1.2.4 Purificação

A purificação do biogás consiste no isolamento do metano através da remoção de CO₂ e demais gases. O gás bruto produzido na digestão anaeróbica é composto por 45-75% CH₄ e 25-50% CO₂ e outros compostos, incluindo H₂S, água e outros gases residuais (ZHAO et al., 2010). Esse procedimento é necessário, pois o potencial calorífico do gás é proporcional à concentração de metano do mesmo (BILOTTA, P. & ROSS, B. Z. L., 2015). O biogás após processo de purificação denomina-se biometano.

De acordo com WARREN et al (2012), as técnicas para purificação do biogás são (Figura 5): adsorção (adsorção por oscilação de pressão), absorção (água, física e química), tecnologia de membrana (permeação de alta pressão e baixa pressão) e criogênica.

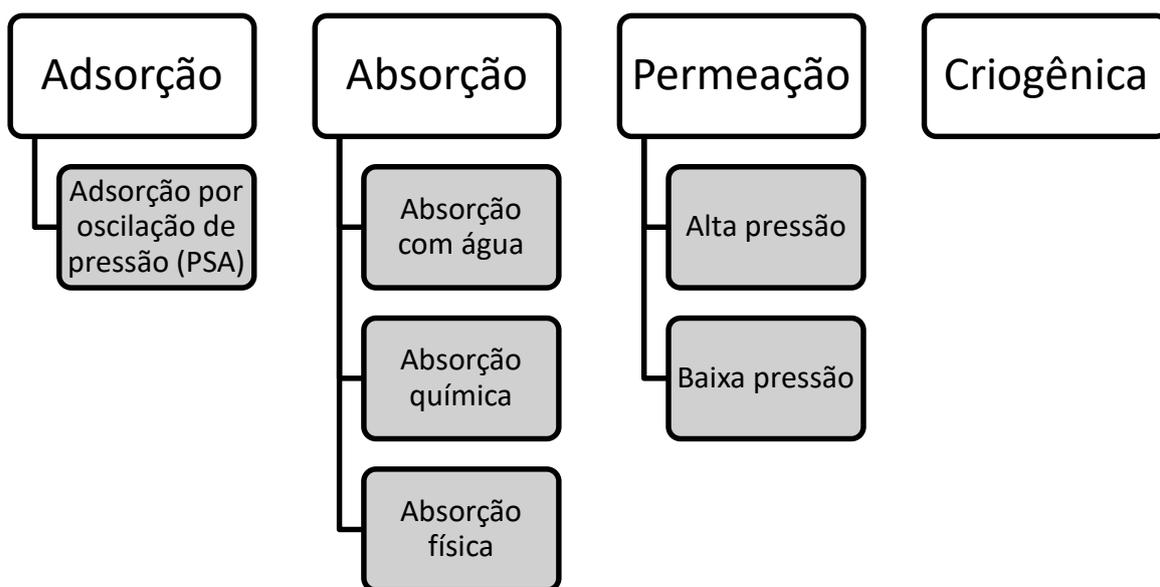


Figura 5. Tecnologias de purificação de biogás (Adaptado WARREN et al., 2012).

A adsorção por oscilação de pressão (PSA) realiza a purificação através da separação dos gases usando o ar retirado do ambiente atmosférico e comprimido em gás de alta pressão (BASU, S. & DEBNATH, A. K. 2019). A purificação via absorção ocorre a captação do CO₂ através da transferência do composto gasoso para fase líquida, sendo a absorção física operada em alta pressão e baixa

temperatura e a química via ligação covalentemente às moléculas do líquido (ABDEEN et al., 2016). Na criogenia, a tecnologia promove a remoção de CO₂ através da destilação de CH₄-CO₂ com funcionamento em baixas temperaturas e altas pressões (RUZZA, L. D. 2019).

1.3 Meta-análise

A meta-análise pode ser descrita como uma abordagem sistemática para identificar, avaliar, sintetizar e combinar os resultados de estudos já dispostos na literatura com o objetivo de obter resultados conclusivos acerca de uma hipótese (STROUP D. F., 2000).

O tamanho da amostra é uma importante variável, capaz de determinar a confiabilidade do resultado obtido. A realização de experimentos suficientes para construir um “n amostral” robusto, em muitas ocasiões, demanda elevado investimento de tempo e recursos que, por diversas vezes são limitados. A técnica de meta-análise propõe-se a sanar essa problemática baseando-se na aplicação de análises estatísticas a uma enorme quantidade de dados já publicados e previamente triados, garantindo conclusões confiáveis.

Para efeito, algumas etapas obrigatórias compõem o processo (Figura 6), são elas, **consolidação da hipótese definição das palavras-chaves e da plataforma de pesquisa a serem utilizadas, triagem dos artigos (inclusão e exclusão), coleta dos dados de interesse, aplicação de análise estatística.**

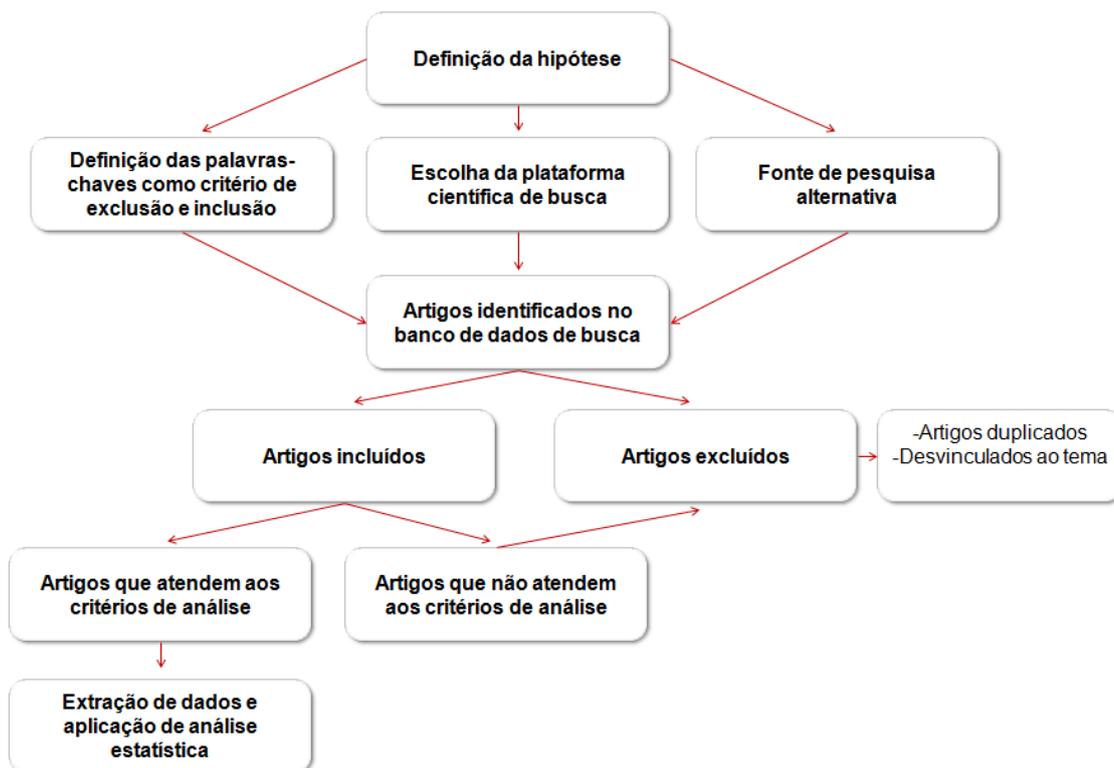


Figura 6. Fluxograma com as etapas da revisão sistemática para meta-análise da informação com as diferentes fases de uma revisão sistemática.

Apropriando-se da eficiência da técnica descrita acima, busca-se compreender como o desempenho do pré-tratamento é determinado. Até o presente momento, há ampla descrição na literatura de metodologia de pré-tratamentos aplicados a substratos massivamente explorados como, resíduo de agricultura, animal, alimentício e esgoto. Entretanto, com os dados atuais, é difícil estimar quais influências regulam as variações no rendimento de metano dentro de uma mesma categoria sendo, portanto, uma limitação na exploração de substratos novos ou pouco explorados e até mesmo uma perda de aproveitamento do potencial de substratos já intensamente utilizados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência de diferentes pré-tratamentos no desempenho da digestão anaeróbica, bem como sua influência, no rendimento de metano.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma busca sistemática para investigar a resposta dependente de determinados métodos de pré-tratamentos condicionada à composição química do substrato.
- Inferir o desempenho do pré-tratamento no aumento do rendimento de metano a partir da identificação da caracterização química do substrato.
- Investigar o efeito regulador de pré-tratamentos químicos na atividade inibidora de DA da lignina no rendimento de metano.
- Comparar a acurácia dos métodos de pré-tratamento biológico a diferentes fontes de substrato proteico.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Delineamento experimental

A revisão sistemática foi conduzida a partir da formulação da questão principal do estudo, no qual investigou a resposta dependente da produção de biogás a composição química do substrato.

A busca de estudos foi delimitada a partir das palavras-chaves: “hydrolysis”, “anaerobic digestion”, “methane” e “pretreatment”, na plataforma científica Web of Science, no intervalo de tempo de 1975 a 2018.

Todos os artigos incluídos na revisão foram submetidos ao PRISMA (Itens de relatório preferenciais para análises sistemáticas e meta-análises) que fornece um roteiro para auxiliar na condução da meta-análise (MOHER et al., 2015) e a um protocolo de triagem (seção 4.3), obedecendo a critério pré-definidos, para assegurar a qualidade dos dados utilizados.

A formulação do código de busca (Tabela 1) fundamentou-se através da determinação das palavras-chaves, restrição de seleção do tipo de documento para apenas em formato de artigo e seleção do inglês como único idioma.

Tabela 1. Código de busca utilizado para a seleção de artigos

((Tópico: ((Hydrolysis*AND anaerobic digestion) AND methane) AND Idioma: (English)) AND Tipos de documento: (Article))

Refinado por: [excluding]: WEB OF SCIENCE CATEGORIES: (COMPUTER SCIENCE CYBERNETICS OR AUTOMATION CONTROL SYSTEMS OR RADIOLOGY NUCLEAR MEDICINE MEDICAL IMAGING OR ACOUSTICS OR PUBLIC ENVIRONMENTAL OCCUPATIONAL HEALTH OR POLYMER SCIENCE OR MECHANICS OR NUTRITION DIETETICS OR CHEMISTRY MULTIDISCIPLINARY OR MEDICINE RESEARCH EXPERIMENTAL OR FISHERIES OR CHEMISTRY MEDICINAL OR CHEMISTRY PHYSICAL) AND TOPIC: (pre*treatment)

Os artigos elegíveis na busca foram submetidos a uma pré-seleção individual através da leitura de título e resumo para averiguar sua concordância com a hipótese proposta. Em sequência, os artigos selecionados nesta etapa seguiram para outra triagem, conduzida de forma mais refinada.

3.2 Triagem de estudos e extração de dados

Na etapa de triagem realizou-se a avaliação e, por conseguinte, a exclusão de artigos elegíveis que não contemplassem algumas características imprescindíveis para solução da hipótese proposta da revisão. Sendo estas:

- Presença de controle para comparação aos pré-tratamentos, ou seja, substratos não tratados;
- Dados quantitativos de metano excluindo a presença de outros gases;
- Possuir unidade métrica de rendimento de metano comparável
- Descrição detalhada do pré-tratamento aplicado ao substrato;

Por fim, após aprovação nos critérios estabelecidos, os artigos foram incluídos em uma tabela de Excel (Material Suplementar- Tabela 8.3) com categorias pré-definidas para que a extração de informações dos artigos fosse

conduzida de forma detalhada e padronizada para, posteriormente, serem aplicadas a meta-análise.

Para os artigos que disponibilizaram os dados exclusivamente em forma gráfica, foi utilizado o programa Web Plot Digitizer v4.2 para extração de dados dos pontos.

3.3 Classificação química dos substratos

Os resíduos foram agrupados de acordo com a sua similaridade química independente do seu setor de origem. O substrato foi classificado em proteico, lignocelulósico, lipídico e misto. Sendo, substrato proteico qualquer biomassa com expressivo teor de proteína em sua massa total, de aproximadamente 50% do seu conteúdo.

O substrato lignocelulosico foi dividido em três faixas de concentração de lignina. A lignina foi selecionada como a variável independente devido a sua ampla descrição na literatura como uma das principais barreiras na degradação do conteúdo lignocelulosico (NAKAGAME et al., 2011). O substrato lignocelulósico foi classificado em: 0-10%, 10-25% e 25-40% de lignina da massa seca total do conteúdo lignocelulosico.

O substrato lipídico é composto por resíduos ricos em óleos e gordura de origem vegetal e animal. O substrato misto possui composição química equilibrada seja de maneira manipulada, com finalidade corretiva, como a codigestão, ou fonte naturalmente mista, como o resíduo de alimentos.

3.4 Análises estatísticas e interpretação dos dados

Baseado em HEDGES et al. (1999), dados de rendimento de metano foram normalizados para taxa de resposta por meio de logaritmo natural $\ln(R)$ (Natural Log Response Ratio) devido a significativa variação, dentre os artigos utilizados, das unidades métricas para medição de gás.

Sendo assim, o efeito do pré-tratamento foi comparado ao controle por $\ln(R)$. Seguindo a equação:

$$\ln R = \ln(R) = \ln\left(\frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}\right) = \ln(\bar{X}_1) - \ln(\bar{X}_2).$$

Onde,

$\ln(X_1)$ são os dados experimentais.

$\ln(X_2)$ são os dados de controle.

A comparação entre a variável pré-tratamentos, a seus respectivos rendimentos de metano, foi obtida através da análise de variância (ANOVA one-way).

Através da ANOVA (one-way) estimou-se a interação entre uma variável quantitativa dependente e uma variável qualitativa independente, sendo:

✓ *Variável qualitativa independente:* Pré-tratamento

Físico

Químico

Biológico

Químico+Químico

Químico+Físico

Químico+Biológico

Físico+Físico

Físico+Biológico

Físico+Físico+Físico

Físico+Físico+Biológico

Físico+Físico+Químico

Químico+Químico+Físico

Químico+Químico+Físico+Físico

Químico+Físico+Biológico

✓ *Variável quantitativa dependente:* Rendimento de metano

Os dados de rendimento de metano são fornecidos pelos artigos em forma de média (\bar{X}) de uma amostra em duplicata ou triplicata, portanto, o “N amostral” representado nos gráficos refere-se a $N=\sum \bar{X}$.

A partir deste teste estatístico, foi analisado se há diferença significativa entre as médias dos grupos analisados. Definida a existência da diferença estatística entre os grupos, aplica-se o teste post-hoc Tukey-HSD (Unequal N) no qual avalia precisamente quais categorias estão diferindo.

Para isto, considera-se como estatisticamente significativos os valores ($p<0,05$). O software utilizado nas análises foi o STATISTICA 7®.

4. RESULTADOS

4.1 Detalhamento dos dados coletados

A busca conduzida na plataforma de pesquisa Web of Science foi refinada em três etapas. A primeira busca gerou um total de 1337 artigos, através do código contendo as palavras-chaves hidrólise, digestão anaeróbica e metano, restrito a documentos apenas em formato de artigo em inglês e português no período de 1945 a 2018.

1º REFINAMENTO:

1.337 (TS=((Hydrolysis* AND anaerobic digestion) AND methane)) AND IDIOMA: (English OR Portuguese) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (Article)
Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Tempo estipulado=1945-2018

Na segunda triagem, algumas categorias incompatíveis com a área de interesse tais como, saúde, ciência da computação e ciências sociais foram excluídas da pesquisa a fim de melhorar a qualidade dos artigos elegíveis, reduzindo o resultado para 1303 artigos.

2º REFINAMENTO:

1.303 (TS=((Hydrolysis* AND anaerobic digestion) AND methane)) AND IDIOMA: (English OR Portuguese) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (Article)
Refinado por: [excluindo] CATEGORIAS DO WEB OF SCIENCE: (AUTOMATION CONTROL SYSTEMS OR COMPUTER SCIENCE CYBERNETICS OR ACOUSTICS OR NUTRITION DIETETICS OR PUBLIC ENVIRONMENTAL OCCUPATIONAL HEALTH OR MEDICINE RESEARCH EXPERIMENTAL OR CHEMISTRY MEDICINAL OR FISHERIES OR POLYMER SCIENCE OR RADIOLOGY NUCLEAR MEDICINE MEDICAL IMAGING OR MECHANICS)
Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Tempo estipulado=1945-2018

Para efeito mais acurado, a palavra-chave “pré-tratamento”, que é o interesse principal de estudo, foi incluída na busca final após código já aprimorado. Totalizando em 668 artigos.

3º REFINAMENTO:

668 (TS=((Hydrolysis* AND anaerobic digestion) AND methane)) AND IDIOMA: (English OR Portuguese) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (Article)
Refinado por: [excluindo] CATEGORIAS DO WEB OF SCIENCE: (AUTOMATION CONTROL SYSTEMS OR COMPUTER SCIENCE CYBERNETICS OR ACOUSTICS OR NUTRITION DIETETICS OR PUBLIC ENVIRONMENTAL OCCUPATIONAL HEALTH OR MEDICINE RESEARCH EXPERIMENTAL OR CHEMISTRY MEDICINAL OR FISHERIES OR POLYMER SCIENCE OR RADIOLOGY NUCLEAR MEDICINE MEDICAL IMAGING OR MECHANICS) AND TÓPICO: (pre*treatment)
Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Tempo estipulado=1945-2018

4.1.1 Análise dos artigos

A busca de artigos gerou resultado final de 668 artigos elegíveis (Figura 7). Deste total, 381 artigos continham dados satisfatórios e aptos para análise estatística, enquanto 287 foram excluídos, pois não atendiam aos critérios definidos. Os 381 artigos analisados geraram um total de 3077 dados.

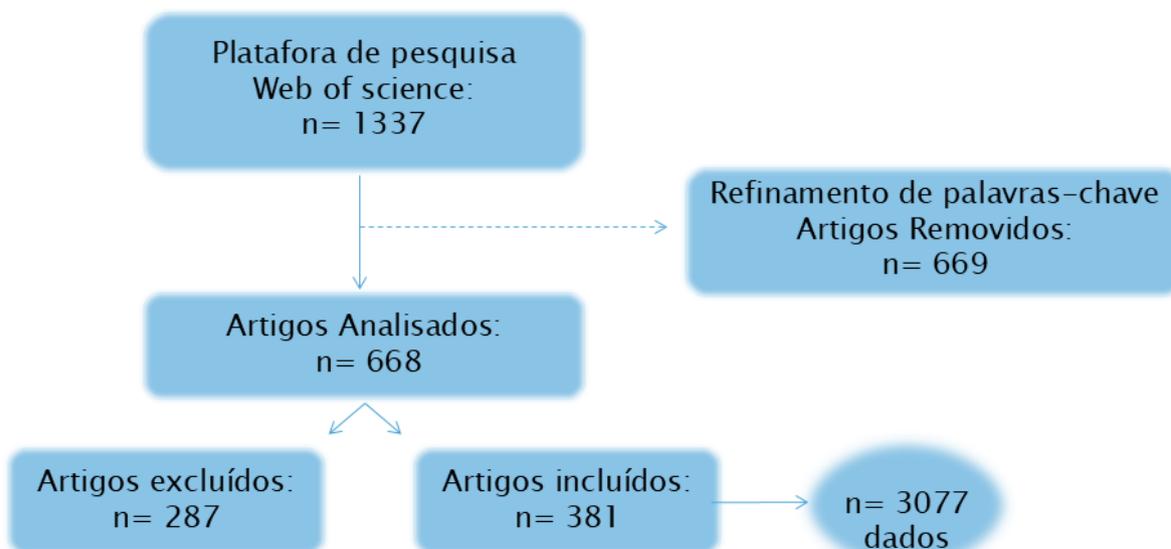


Figura 7. Fluxograma das etapas de seleção, triagem e análise dos artigos. Adaptado de CALDEIRA D. et al., 2014.

4.2 Quantificação em percentagem de metodologias de pré-tratamentos incluídas na meta-análise

Os pré-tratamentos podem ser aplicados individualmente ou em combinações para viabilizar um melhor desempenho na degradação da matéria orgânica. Há uma gama de métodos dentro de cada categoria (Figura 8), com aplicação não uniforme, tendo sua frequência de uso regulada pela facilidade de operação, viabilidade de instalações, custos de construção e operação, economia de escala e acordos contratuais (BADRUZZAMAN et al., 2019).

Uma maior variedade de métodos pode ser observada em relação ao pré-tratamento químico, se comparado a outras categorias. Porém, apesar da quantidade de alternativas de metodologias, há uma heterogeneidade na distribuição de utilização, com forte tendência para o uso do método alcalino, que contribui com 52% de toda a categoria. Excluindo a metodologia alcalina, a aplicação das demais metodologias é mais uniforme e não possui desequilíbrio acentuado.

A heterogeneidade na distribuição de aplicação de metodologias persiste no pré-tratamento físico, com predominância no método térmico, sendo composto majoritariamente de tratamentos acima dos 100°C. Enquanto isso, o pré-tratamento

biológico exibe uma distribuição mais uniforme, constituído integralmente por enzimas com amplitude de origens.

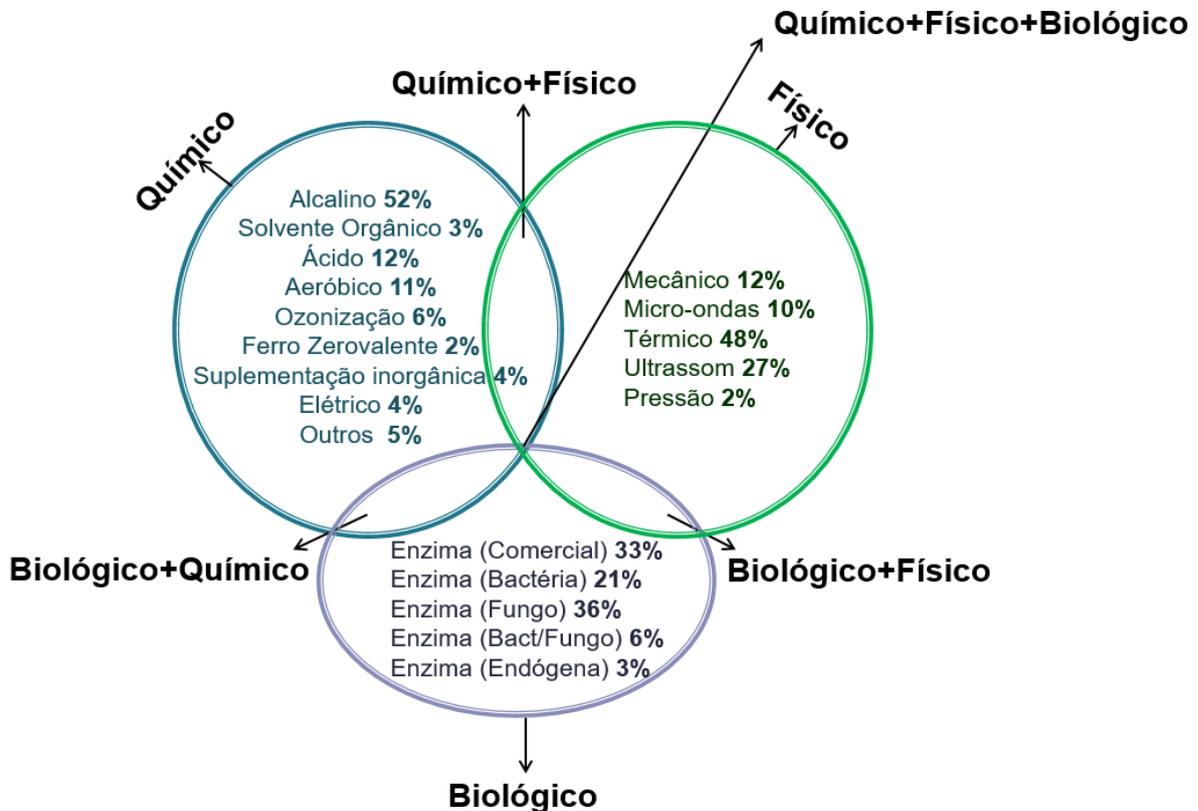


Figura 8. Representação das metodologias incluídas em cada categoria de pré-tratamento com quantificação percentual das metodologias utilizadas individualmente.

4.3 Perfil das categorias de pré-tratamento

A distribuição percentual das categorias de pré-tratamento utilizadas para aumento do rendimento de metano de substratos orgânicos entre 1975 e 2018 (Figura 9) exibe expressiva aplicação de metodologias físicas, representando quase metade do total geral com cerca de $\approx 42\%$, considerando apenas o uso individual de métodos físicos. Todavia, somada as participações em combinações com pré-tratamentos químicos e biológicos, a participação dos métodos físicos aumenta para $\approx 65\%$ do resultado total.

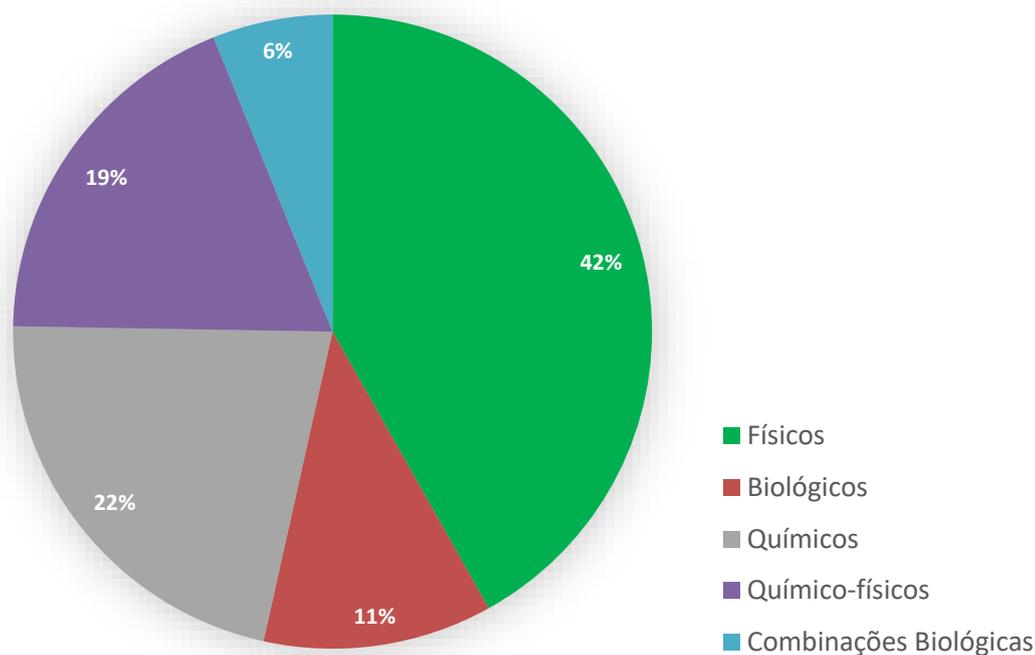


Figura 9. Distribuição quantitativa das categorias de pré-tratamentos utilizados entre 1945 e 2018. Exclusivamente físicos em aplicação individual ou duas a três combinações metodológicas (verde); Exclusivamente biológicos em aplicação individual ou em misturas enzimáticas (vermelho); Exclusivamente químicos em aplicação individual ou duas a três combinações metodológicas (cinza); Combinações metodológicas químico-físicas (roxo); Combinações biológicas com duas a três metodologias química ou física (azul).

A categoria de pré-tratamentos químicos (Figura 10) é composta por metodologias com aplicação de aditivos individualmente ou combinados, ou seja, “químico” e “químico+químico” (Material Suplementar- Tabela 8.2.1). A utilização de metodologias com um único aditivo é massivamente explorada e representa mais que 90% do total. O método alcalino é o mais utilizado, correspondendo a 50%, seguido por 12% e 11% de ácido e aeróbico, respectivamente. A combinação químico+químico soma apenas 6% do total, dentre eles o “alcalino+alcalino” sobressai-se correspondendo a 2% do total geral da categoria que, se comparado apenas dentro do grupo químico+químico, representa mais de 30%.

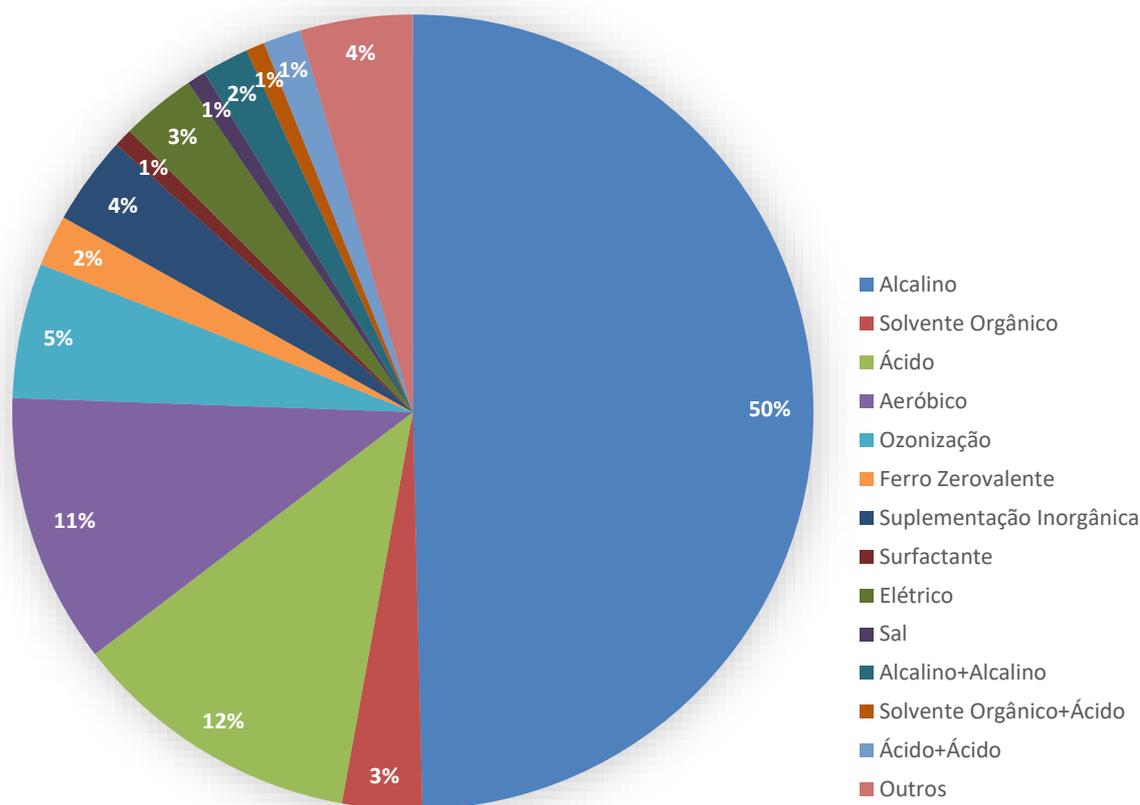


Figura 10. Quantificação de metodologias de pré-tratamentos unicamente químicos de aplicação individual ou combinada para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.

A figura 11 é composta por pré-tratamento “físico”, “físico+físico” e “físico+físico+físico”. Os dados observados (Material Suplementar- Tabela 8.2.2) indicam utilização massiva, cerca de $\approx 48\%$ do total, da combinação térmico + pressão (físico+físico), que inclui os métodos: explosão de vapor, hidrotérmico e autoclave. Com exceção da metodologia combinada citada anteriormente, os métodos individuais exibem maior fração representativa, sendo, térmico, ultrassom e mecânico, com 27%, 14% e 6%, respectivamente.

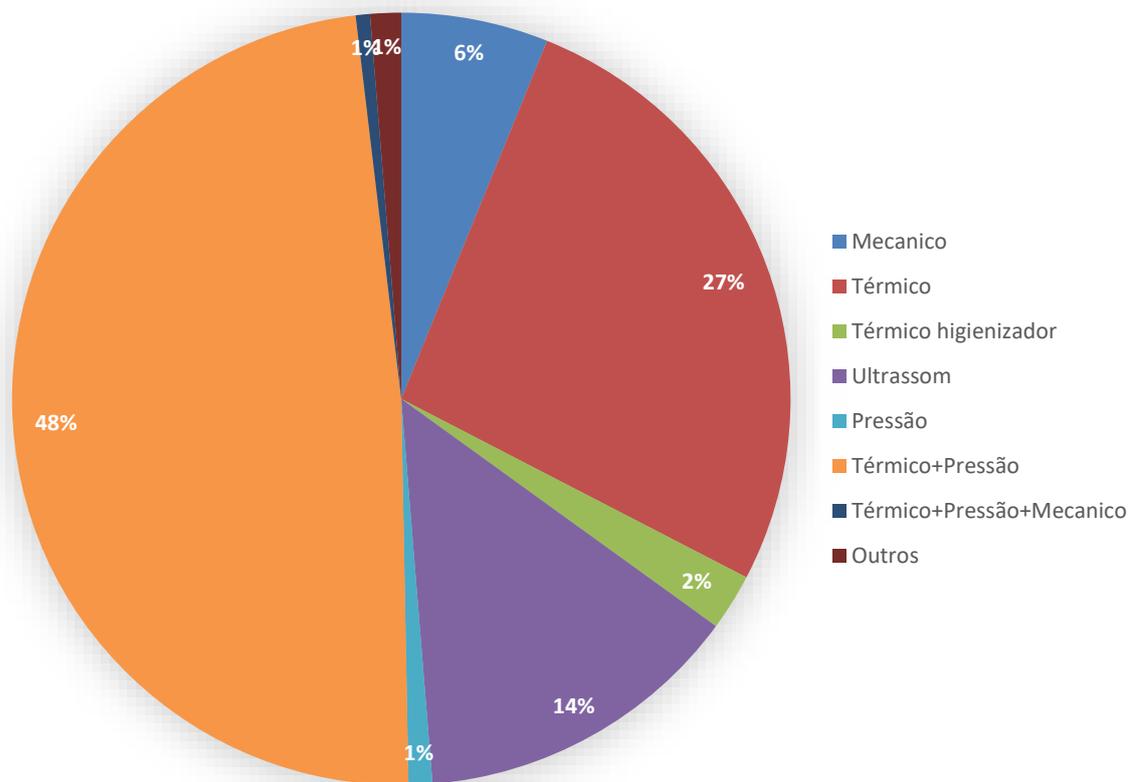


Figura 11. Quantificação de metodologias de pré-tratamentos unicamente físicos de aplicação individual ou combinada para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.

Na figura 12, a categoria químico-físico exibe uma gama de métodos (Material Suplementar- Tabela 8.2.3), sendo representada por “químico + físico”, “químico + físico + físico”, “químico + químico + físico” e “químico + químico + físico + físico”. Assim como nas demais categorias, há uma predominância de utilização de um único método. Neste caso, o Térmico + Alcalino, que compreende cerca de 50% do total da categoria. Nota-se que o grupo químico + físico representa a maior fração da categoria, havendo apenas, dentro dos resultados observados, dois métodos fora desse grupo com representação superior a 1%, o Ácido + Solvente Orgânico + Térmico (4%) e o Ácido + Solvente Orgânico + Térmico + Pressão (2%).

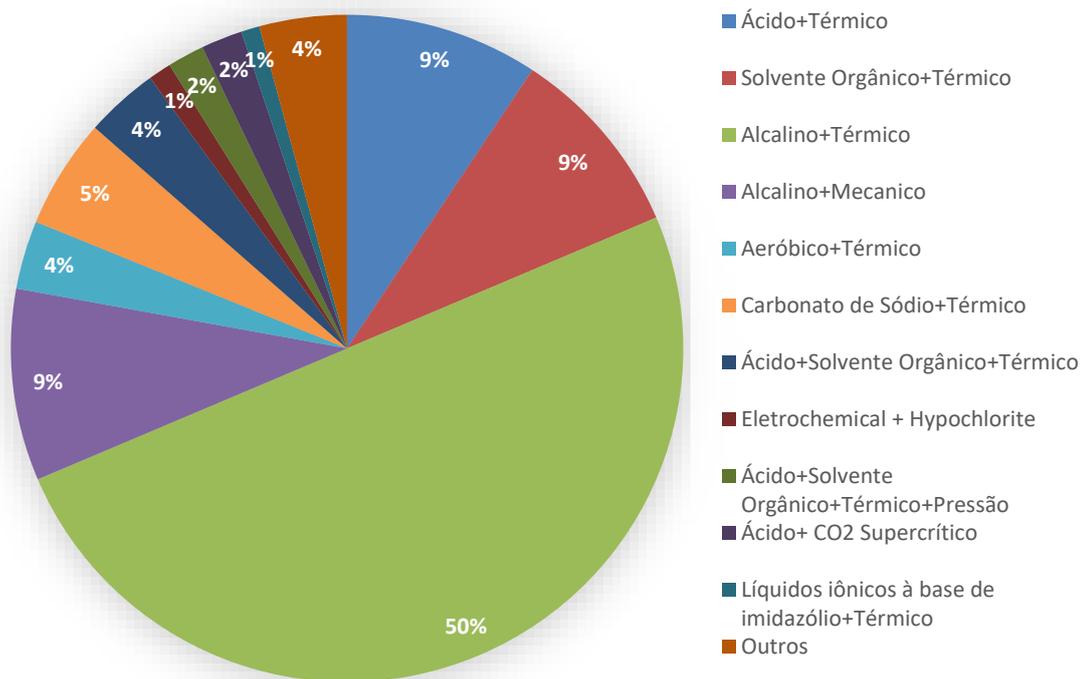


Figura 12. Quantificação de metodologias de combinações físico químicas de pré-tratamento para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.

O pré-tratamento biológico (Figura 13) é o que apresenta maior diversidade de metodologias e homogeneidade em sua aplicação. Os métodos partem da atividade enzimática, variando apenas no tipo de enzima atuante e na sua origem (Material suplementar- Tabela 8.2.4). De forma geral, há predominância de aplicação em um único tipo de enzima. A mistura enzimática, líquido ruminal, consórcio microbiano, pasta de fungos e fermentação são exemplos de combinações enzimáticas que somados representam 46% do total.

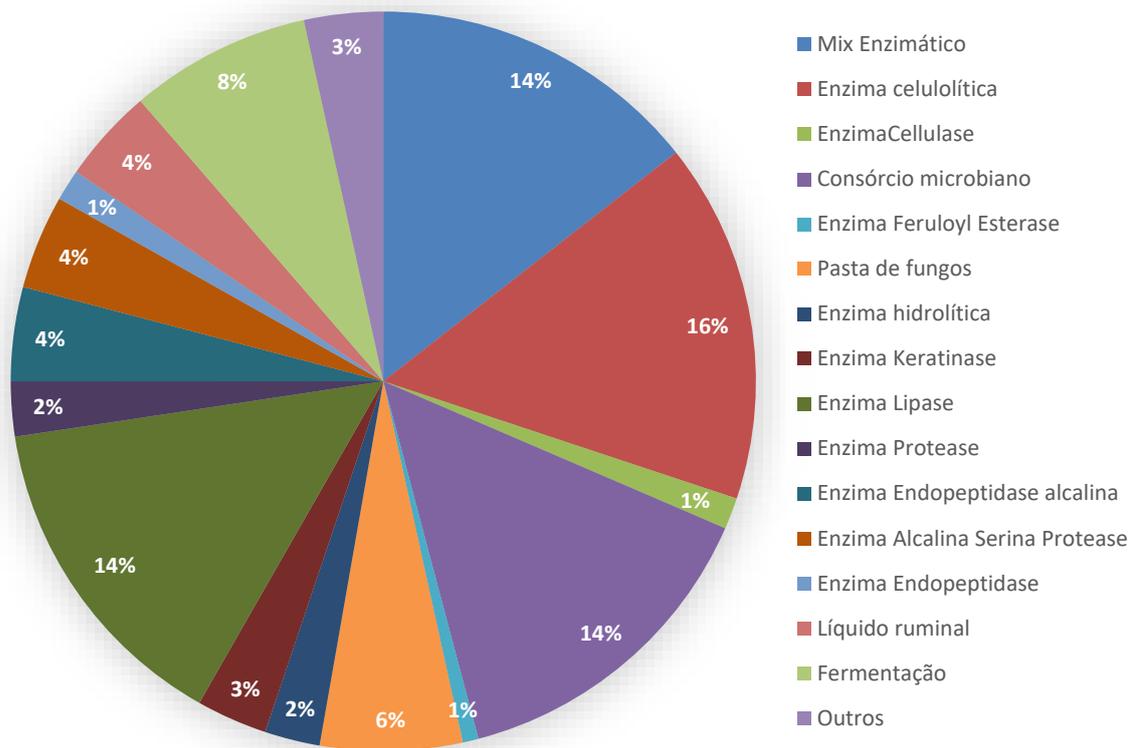


Figura 13. Quantificação de metodologias de pré-tratamento biológicos para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.

As combinações biológicas (Figura 14) podem ser descritas em “biológico + físico”, “biológico + físico + físico”, “biológico + químico” e “biológico + químico + físico” (Material Suplementar- Tabela 8.2.5). Os métodos físicos compreendem mais de 60% do total observado, com ênfase na combinação térmico + pressão (44%) que exibem larga vantagem em relação as demais metodologias. A tripla combinação é representada por apenas uma metodologia, o Térmico + Aeróbico + Micro-organismos (12%). A combinação química mais expressiva é fungo + umidade (12%), seguido de aeróbico + enzima (4%).

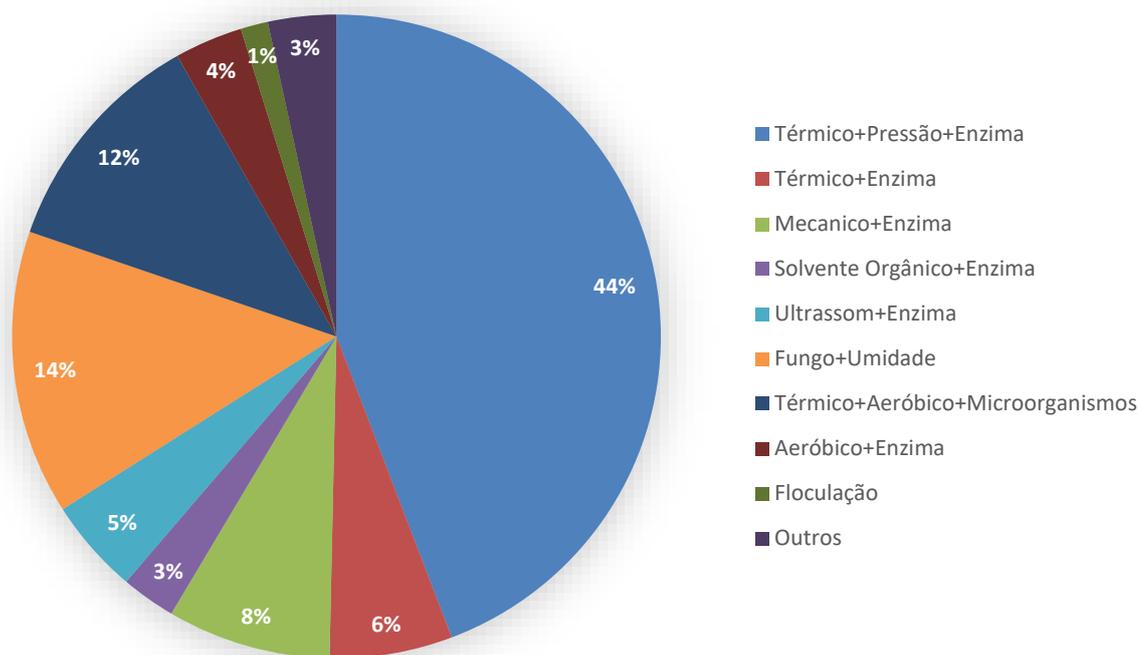


Figura 14. Quantificação de metodologias de pré-tratamento biológico com combinações químicas e/ou físicas para otimizar a degradação da matéria-prima e melhorar o desempenho da digestão anaeróbica.

4.4 Análise da eficácia dos pré-tratamentos

O substrato foi dividido em lignocelulósico, proteico, lipídico e misto. A avaliação da diferença significativa entre as categorias de pré-tratamento foi definida a partir da ANOVA (one-way), seguida de teste post-hoc Tukey para identificar quais pré-tratamentos estão distinguindo um dos outros. Os agrupamentos de substrato $p < 0,05$ demonstram diferença entre as categorias de pré-tratamento.

O substrato lignocelulósico com concentração de lignina igual ou inferior a 10% (Figura 15.a) exibe performance positiva em todas as categorias de pré-tratamento e, apesar do destaque do químico+químico $\ln(R) = 0.462$, não houve diferença significativa entre eles. Já na faixa de 10 a 25% de lignina (Figura 15.b), que consta N amostral mais expressivo por representar a concentração comum a maioria da biomassa vegetal terrestre, persiste o comportamento em destaque positivo das combinações de pré-tratamento químico, dessa vez com significância atestada. O pré-tratamento “químico + químico + físico + físico” $\ln(R) = 0.649$ e “químico + químico + físico” $\ln(R) = 0.525$ destoam de todos, sendo determinados

como os mais rentáveis da categoria. Entre as 12 categorias testadas neste substrato, seis possuem presença do método químico e deste total todos demonstram bom com significância igual aos dois pré-tratamentos mais rentáveis. Em contraste, a adição de métodos físicos parece decair a rentabilidade de metano.

Na faixa de concentração mais alta de lignina, acima de 25% (Figura 15.c), nota-se um resultado mais delineado e afunilado, apenas dois pré-tratamentos são elegíveis como mais rentáveis, o químico+químico $\ln(R)=1.59$ e o químico+biológico $\ln(R)= 0.814$.

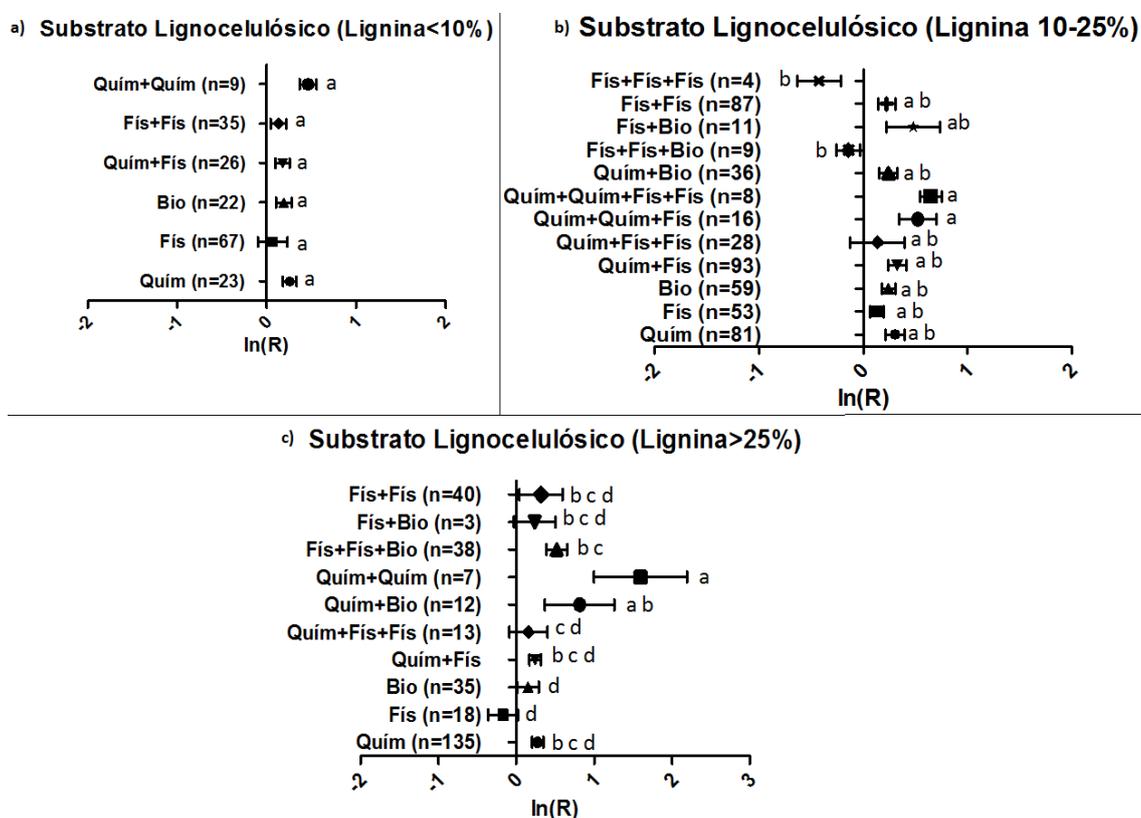


Figura 15. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de $\ln(R)$ do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato lignocelulósico. A) Substrato Lignocelulósico (Lignina < 10%) é composto de biomassa vegetal com baixa concentração de lignina. B) Substrato Lignocelulósico (Lignina 10-25%) concentração que corresponde representativamente a maioria da biomassa vegetal. C) Substrato Lignocelulósico (Lignina > 25%) é composto de biomassa com alta concentração de lignina.

A resposta do rendimento de metano do substrato proteico (Figura 16) exposto à diferentes categorias de pré-tratamentos é bem definida. Devido à formação espontânea de compostos inibidores da digestão anaeróbica proveniente de proteínas, esse substrato requer metodologias que interajam com a estrutura química do composto de forma a facilitar a degradação adicionando o menos possível de componentes tóxicos. Nestas condições, o biológico $\ln(R) = 1.145$ bem com suas combinações $\ln(R) = 0.839$ exibe destaque notório, sendo elencado, indiscutivelmente, como o mais eficiente para degradação de proteínas e conversão a metano.

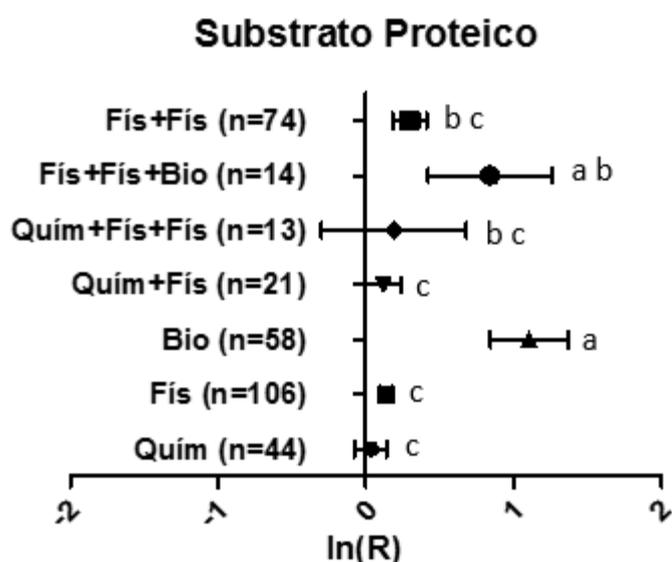


Figura 16. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de $\ln(R)$ do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato O substrato proteico, composto por resíduos animais, microalgas ou qualquer fonte de proteína majoritária.

O substrato lipídico (Figura 17), não apresenta diferença entre os métodos de pré-tratamentos observados. Há uma tendência negativa, exibida pelo IC, de rendimento de metano em todas as categorias. Esses resultados demonstram que, talvez, sob perspectiva do balanço-energético, o investimento em pré-tratamentos para substrato lipídico torna-se desvantajoso.

Substrato Lipídico

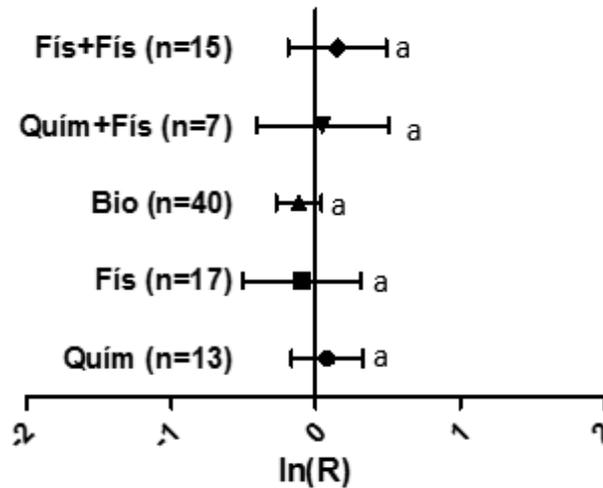


Figura 17. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de $\ln(R)$ do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato O substrato lipídico é representado por resíduos de óleo industrial, vegetais oleaginosos e águas residuais de matadouros.

O substrato misto (Figura 18) se comporta de maneira similar quando exposto a maioria dos pré-tratamentos. Dentre as nove categorias observadas apenas uma diferenciou-se das demais, a combinação “químico + físico + físico” com $\ln(R) = -0.068$. Todas as demais categorias de pré-tratamento obtiveram $\ln(R) > 0$.

Substrato Misto

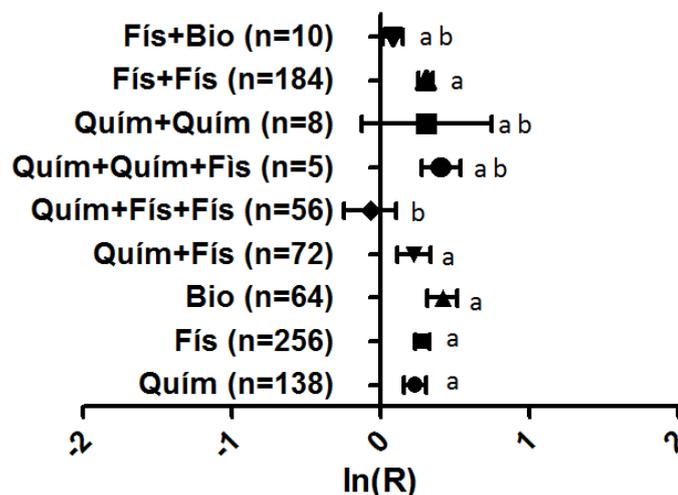


Figura 18. Plotagem representando os intervalos de confiança de 95% para a taxa de resposta de $\ln(R)$ do rendimento de metano, comparando o desempenho dos pré-tratamentos Fís= Físico, Quím= Químico e Bio = Biológico e suas combinações em substrato O substrato misto não tem predominância de nenhum composto químico, é uma fonte quimicamente variada composta por codigestão, resto de alimentos e esgoto.

4.5 Averiguação do desempenho dos métodos mais eficientes

Os métodos com maior rentabilidade eleitos na análise anterior foram selecionados para investigação esmiuçada de sua composição. Sendo possível observar a média de rentabilidade de cada tipo de intervenção.

4.5.1 Substrato Lignocelulósico

O substrato lignocelulósico com concentração de lignina igual ou inferior a 10% obteve aumento de rendimento de metano em todos os pré-tratamentos aplicados, no entanto, não apresentou diferença significativa de desempenho entre seus métodos observados.

[Químicos] Substrato Lignocelulósico (Lignina<10%)

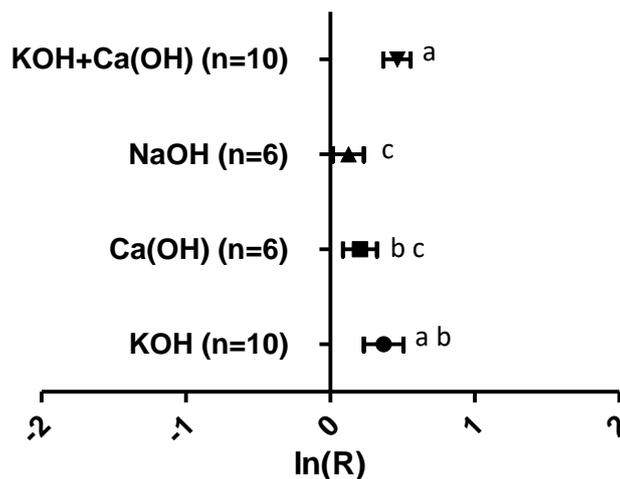


Figura 19. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de químicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou inferior a 10% de lignina.

[Físicos] Substrato Lignocelulósico (Lignina<10%)

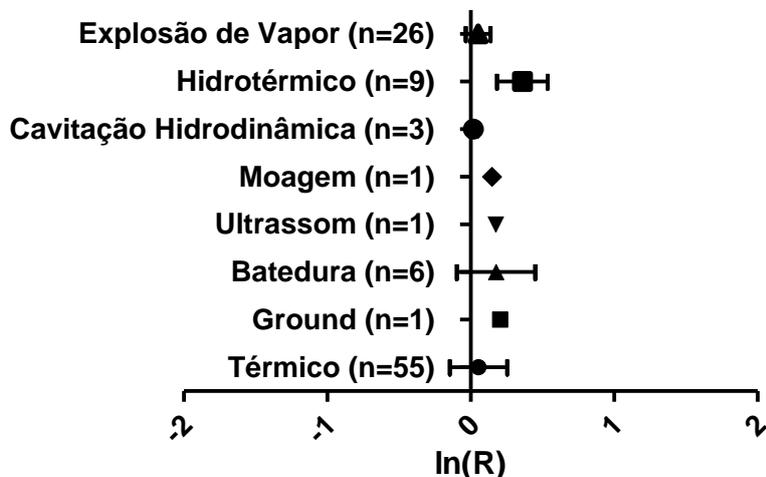


Figura 20. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físicos em substrato lignocelulósico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

[Biológico] Substrato Lignocelulósico (Lignina<10%)

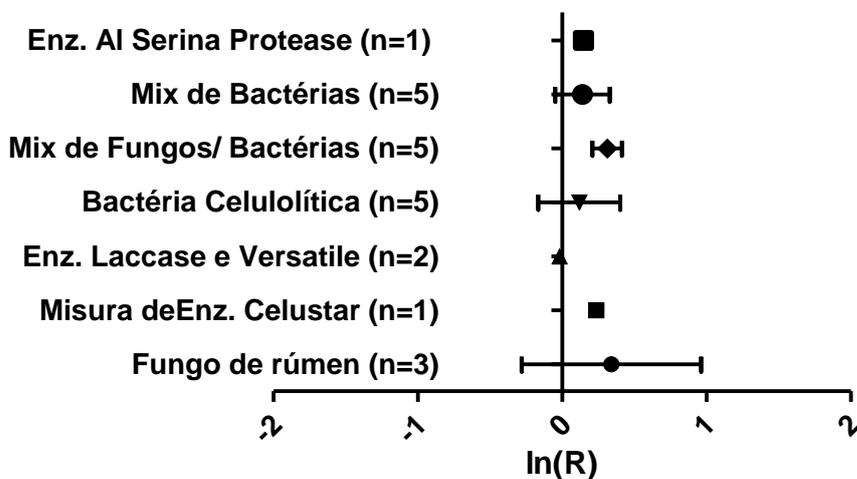


Figura 21. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou inferior a 10% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

[Físico-químicos] Substrato Lignocelulósico (Lignina <10%)

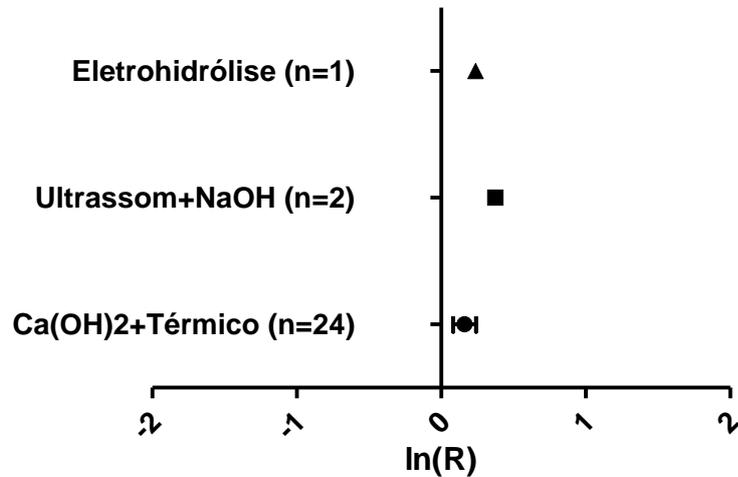


Figura 22. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-químicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou inferior a 10% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

Em substratos com concentração de lignina de 10 a 25%, a eficácia do pré-tratamento físico-químico foi integral. Os dois métodos que compreendem esse grupo obtiveram rendimento superior a $\ln(R) = 0.5$, o que corresponde a um aumento superior a 70% em relação ao controle.

[Físico-químico] Substrato Lignocelulósico (Lignina 10-25%)

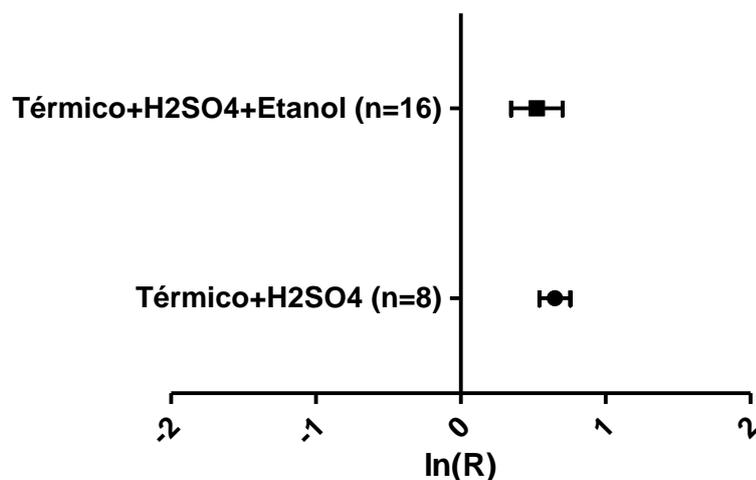


Figura 23. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-químicos em substrato lignocelulósico com concentração 10-25% de lignina. *A

análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

O substrato com alta concentração de lignina, igual ou superior a 25% do conteúdo lignocelulósico total, possui resposta positiva ao pré-tratamento mais seletiva. Dentre as três faixas de concentração de lignina determinadas para análise do substrato, essa é a mais rigorosa na atuação do pré-tratamento para aumentar o rendimento de metano.

Na análise de 10 métodos de pré-tratamento, observa-se cinco métodos com IC com tendência negativa. Os pré-tratamentos químicos e biológicos foram eleitos com melhor desempenho para aumentar a rentabilidade de metano, em intervenção química os ganhos chegam a mais de 100%, nota-se que não são aditivos aplicados individualmente, mas sim de forma combinada com destaque positivo para a combinação de ácido com solvente orgânico. Em pré-tratamento biológico, todos os métodos testados são combinados a aditivos químicos, os ganhos nesta categoria também atingiram aumento de rentabilidade superior a 100% em alguns ensaios experimentais.

[Químicos] Substrato Lignocelulósico (Lignina>25%)

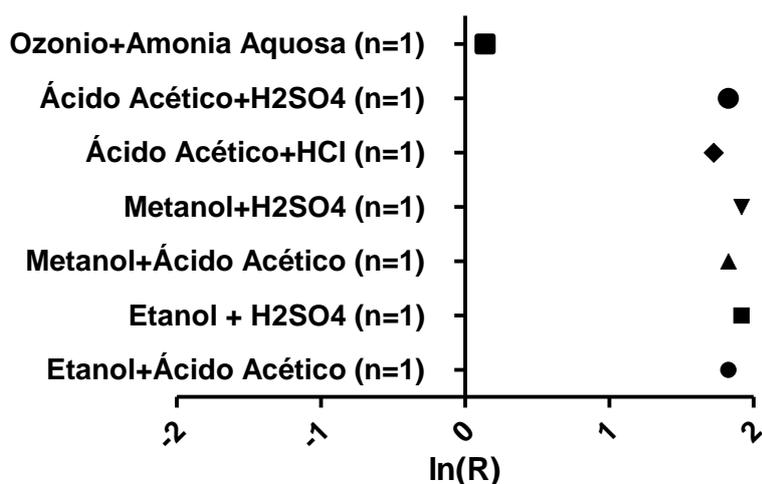


Figura 24. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de químicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou superior a 25% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

[Biológicos] Substrato Lignocelulósico (Lignina>25%)

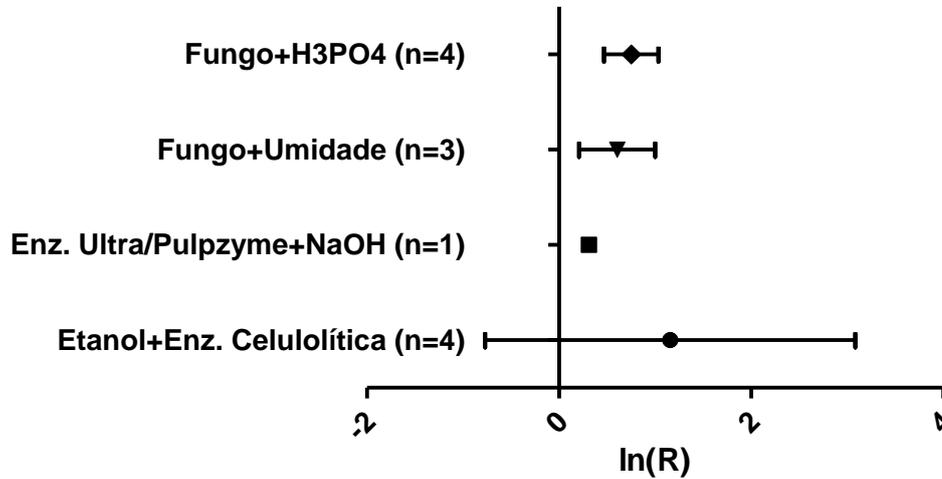


Figura 25. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato lignocelulósico com concentração igual ou superior a 25% de lignina. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

4.5.2 Substrato Proteico

A resposta dos métodos de pré-tratamentos biológicos ao substrato predominantemente proteico foi bem definida. Nota-se uma alta eficiência das enzimas no aumento do rendimento de metano. O método utilizando enzima alcalina endopeptase resultou em $\ln(R)= 2.69$, o que corresponde em um aumento superior a 100%. O único método nesta categoria que obteve rendimento negativo foi o produto líquido bacteriano $\ln(R)= -0.35$.

[Biológico] Substrato Proteico

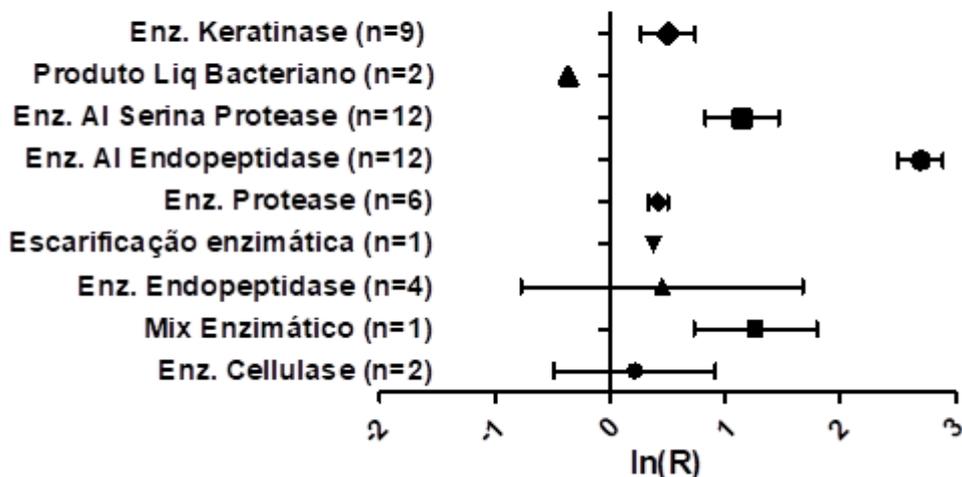


Figura 26. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato predominantemente proteico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

[Físico-Biológico] Substrato Proteico

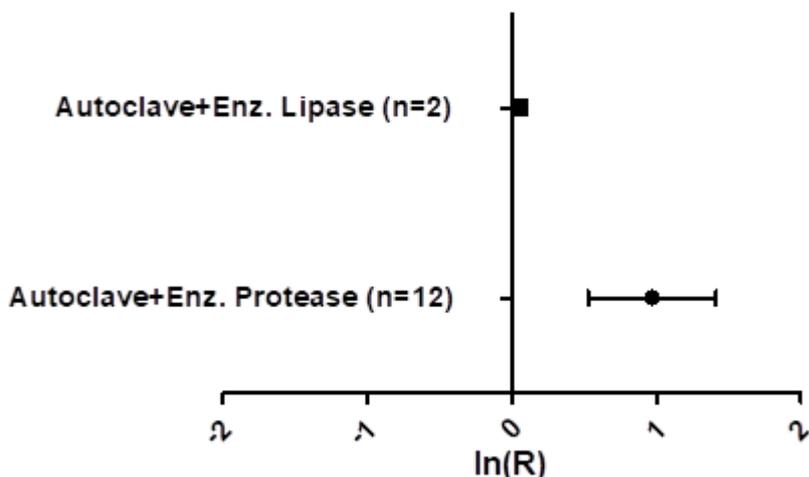


Figura 27. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-biológicos em substrato predominantemente proteico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

4.5.3 Substrato Lipídico

A análise comparativa da eficácia das intervenções em substrato lipídico, além de não agregar aumento de rentabilidade de metano, interferiu negativamente na operação gerando resultados inferiores aos passíveis de serem alcançados em substratos sem nenhum tratamento.

[Químico] Substrato Lipídico

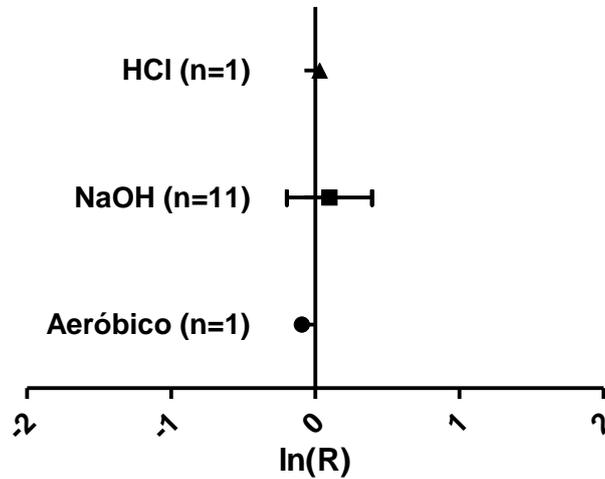


Figura 28. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de químicos em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

[Físico-químico] Substrato Lipídico

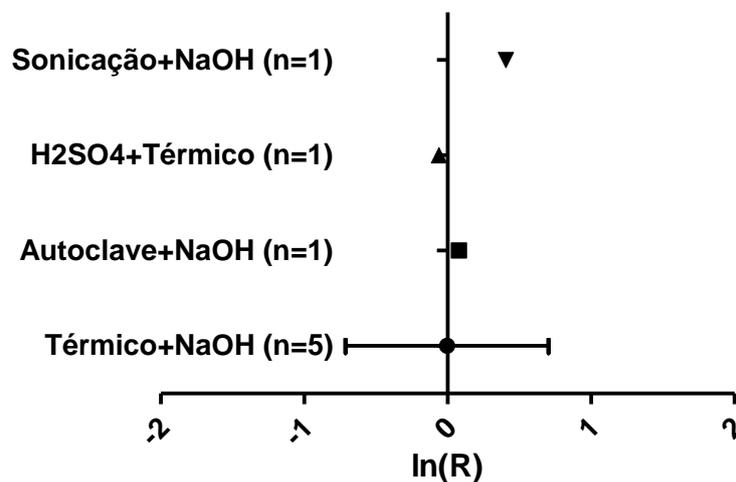


Figura 29. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físico-químico em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

[Biológico] Substrato Lipídico

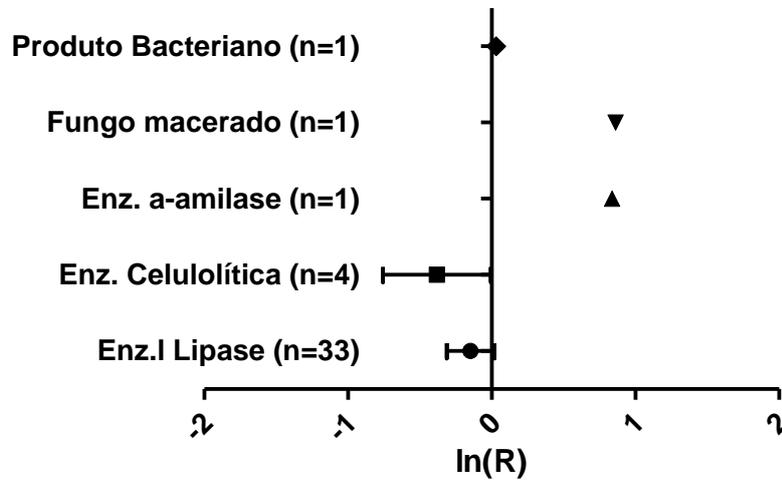


Figura 30. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de biológicos em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

[Físicos] Substrato Lipídico

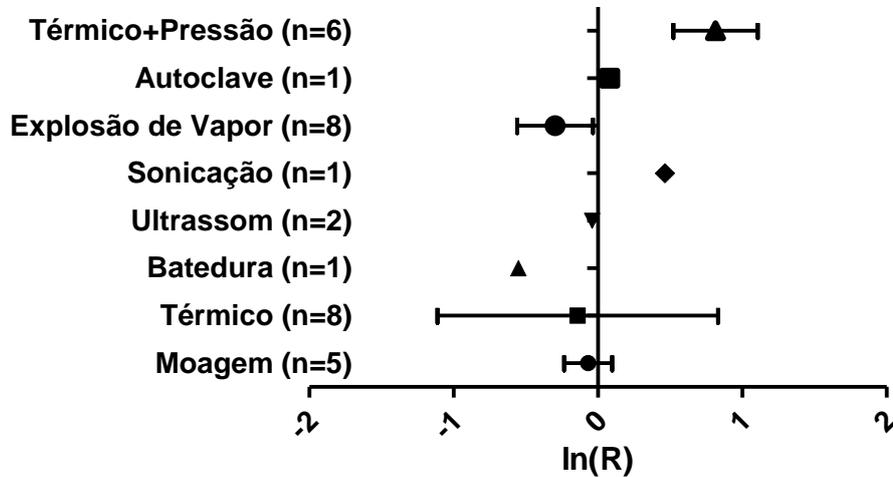


Figura 31. Efeito dos métodos de pré-tratamento com melhor desempenho da categoria de físicos em substrato lipídico. *A análise estatística não foi realizada devido ao N amostral abaixo do requisitado para garantir confiabilidade.

5. DISCUSSÃO

5.1 Uso de dados publicados como solução para o preenchimento de lacunas persistentes na literatura

A meta-análise tem sido amplamente empregada em pesquisas da área médica (ZEGGINI et al., 2008), com o objetivo de elucidar o efeito de terapias e/ou medicamentos. O uso dessa técnica nesta área reforça seu elevado grau de confiabilidade, considerando a responsabilidade social a qual se expõe. Todavia, sua aplicação vem ganhando espaço em outras áreas de pesquisa como ecologia e bioenergética (WOODCOCK et al., 2019; MIRANDA et al., 2016; MENTEN et al., 2013).

Neste cenário, apropriando-se da eficiência da técnica descrita acima, busca-se compreender como o desempenho do pré-tratamento na produção de biogás é determinado. Essa análise foi realizada uma vez que a degradação máxima do substrato provida pela etapa de pré-tratamento, implica em uma conversão a biometano mais ágil e com menor formação de produtos tóxicos e, portanto, com uma etapa de purificação menos custosa. Além disso, quanto maior a degradação da matéria orgânica, menor será a quantidade de material residual após digestão disponível para contribuir com emissão de gases poluentes. Todos esses fatores corroboram a assertividade do pré-tratamento como um redutor de investimento de tempo e capital.

A investigação na literatura possibilitou a obtenção de um N amostral = 3077 dados, que permitiu identificar e quantificar os métodos de pré-tratamentos usados na DA. Os resultados indicam que a maior fração de pré-tratamentos, cerca de $\approx 42\%$ do total, é representado pela categoria física, tal prevalência pode ser justificada pelo uso do método térmico higienizador obrigatório em alguns substratos como produtos de origem animal e esgotamento sanitário (EDSTRÖM et al., 2003; LIU et al., 2018). A avaliação individual da categoria de pré-tratamento físico reforça essa afirmação, que é composta em aproximadamente 50% do total da categoria.

Em sequência, há expressiva utilização de metodologias de pré-tratamentos químico, $\approx 22\%$ do total.

A investigação acerca dessa categoria é impulsionada, principalmente, pelos bons resultados em resíduos agrícolas (CHEN et al., 2017; ZHENG et al., 2014), que detém grande representação entre as biomassas empregadas ao processo de DA. Há predominância nessa categoria dos métodos alcalinos, que como descritos na literatura, possuem efeito menos tóxicos comparados aos métodos ácidos, por exemplo (KIM et al., 2015).

A aplicação de pré-tratamentos biológicos requer maior controle e atenção das condições ambientais, devido à utilização de micro-organismos, o que torna esse processo mais sensível a instabilidades. Essa pode ser uma das explicações pelo qual uma menor fração dessa categoria foi encontrada. O uso de métodos combinados também necessita de maior zelo, já que as condições operacionais precisam atender a ambos os métodos aplicados.

Dentre as três categorias de pré-tratamento, o químico foi o mais explorado quanto a diversidade de metodologias empregadas (ZHENG et al., 2014). A prevalência do número de trabalhos utilizando essa categoria pode causar um olhar tendencioso quanto a sua efetividade comparada aos demais pré-tratamentos, contudo, os resultados apontados nesse estudo demonstram que a eficácia das metodologias químicas está condicionada a composição química do substrato, portanto, não se adequa a qualquer resíduo de forma indiscriminada.

5.2 Substratos define a eficiência do pré-tratamento

Microalgas, resíduos animais e alguns grãos alimentícios são resíduos comumente alocados em grupos distintos, determinados de acordo com o seu setor de origem, sendo, biomassa aquática, produto animal e resíduo agrícola, respectivamente (BIOSANTECH et al., 2013). No entanto, para definir a configuração adequada a se conduzir a operação de DA, considera-se o comportamento da matéria orgânica em meio ao processo bioquímico. Sendo assim, a composição química do substrato pode ser eleita como uma variável crucial capaz de estimar os tipos de componentes tóxicos e/ou inibidores formados e o potencial de geração de biogás. Por isso, neste estudo, a organização do substrato foi realizada de acordo com a predominância da composição química para elucidar o desempenho dependente dos pré-tratamentos condicionada a específicos

componentes químicos. Os resíduos citados anteriormente foram agrupados de acordo com a sua similaridade química e definido por substrato proteico.

O êxito do pré-tratamento biológico em aumentar a produção de metano do substrato proteico destacou-se de todas as outras categorias observadas, com capacidade de elevar em mais de 100% a produção em relação ao substrato controle, ou seja, não tratado. Todas as metodologias inclusas no pré-tratamento biológico partem de atividade enzimática. Dentre as nove metodologias observadas, com exceção do produto líquido bacteriano, todas as demais geraram efeito positivo. O sucesso da aplicação de enzimas deve-se a sua atividade catalizadora e capacidade de atuação em sistemas aquosos tamponados (OLIVEIRA et al., 2009), tornando-as bem adaptadas ao meio no qual é conduzido a digestão anaeróbica. Nota-se que a adição de enzimas com atividade especializada, tais como, lipases, queratinases e celulases, viabiliza uma atuação mais apurada na degradação do substrato, potencializando a produção de metano.

O aprimoramento na produção de metano sob uso de atividade enzimática combinada a autoclave também foi observado, e, apesar de exibir desempenho positivo, o investimento na adição de uma metodologia térmica parece dispensável, visto que a combinação obteve resultado inferior à aplicação individual de enzimas. O decréscimo na produção pode ser associado à exposição de proteína a altas temperaturas, o que resulta em sua desnaturação, acarretando na redução de aminoácidos disponíveis que, neste caso, é o produto interesse convertido a metano.

Ainda assim, apesar da diminuição ocasionada pelo efeito dos pré-tratamentos físicos, que são majoritariamente térmicos, vê-se uma resposta positiva a esse método, atribuída possivelmente a essa capacidade redutiva de amônia da autoclave (HU et al., 2014). A amônia é um dos compostos gerados naturalmente durante a degradação proteica e principal limitante da DA. A instabilidade gerada pela concentração desse composto proveniente do próprio substrato torna-o mais sensível a adições químicas, essa resposta é observada através dos resultados de pré-tratamentos químicos, no qual, com unanimidade, reduziram a capacidade de produção para além do que o substrato renderia sem nenhuma intervenção de tratamento, causando prejuízo.

Em substratos lignocelulósicos, a concentração de lignina provou ser um indicador de viabilidade de degradação, onde a sua quantidade é inversamente proporcional a facilidade de degradação (MULAT et al., 2018). Substratos com lignina igual ou inferior a 10% exibiram baixa especificidade de resposta às metodologias aplicadas. Nesta condição, há predominância de celulose e hemicelulose que possuem elevada capacidade de biodegradação devido à baixa influencia supressora da lignina (TRIOLO et al., 2011) e, portanto, não carecem de complexas intervenções de pré-tratamento, reagindo positivamente a todas as metodologias, sem variações significativas de eficácia entre elas.

Na faixa de 10-25% de lignina, onde está contida uma expressiva fração dos vegetais terrestres (ANWER et al., 2014), nota-se o refinamento da sensibilidade de resposta aos pré-tratamentos. Todos os pré-tratamentos químicos exibiram boa performance, não havendo diferença significativa entre eles. Entretanto, as combinações de metodologias termal/ hidrotermal, ácido e solvente orgânico obtiveram o melhor desempenho. O pré-tratamento térmico altera as ligações químicas da lignina, resultando em sua dissociação parcial com a hemicelulose e separação da parede celular (CHEN et al., 2016) o rearranjo dessas ligações facilita o acesso ao material biodegradável. Em sequência, a hidrólise das ligações de lignina é continuada por meio da adição de solvente orgânico, que provoca o aumento da porosidade do substrato configurando maior superfície de contato (HESAMI et al., 2015). Essas intervenções facilitam a impregnação do ácido adicionado, que apesar de formar compostos inibidores como ácido carboxílico, hidroximetilfurfural (HMF) e fenólicos, dados experimentais atestam a capacidade de remoção de quase 100% da hemicelulose com o uso de H₂SO₄ (MERKLEIN et al., 2016), a remoção expõe os açúcares aptos a conversão, tornando a aplicação vantajosa mesmo com efeitos negativos.

O resultado da atuação combinada dessas metodologias sugere que priorizar o rompimento das resistências do material, neste caso, é mais relevante do que adicionar intensificadores de atividade enzimática, como enzima celulase, visto que os compostos de interesse dispõem-se inacessível naturalmente como forma de proteção justamente por sua suscetibilidade a ataques. Portanto, fica evidente a

ação contribuinte de cada método para a quebra máxima dos componentes formadores de barreira, sendo insuficientes se aplicados individualmente.

Sob teor de lignina igual ou acima de 25%, o bom desempenho restringiu-se a apenas duas categorias de pré-tratamento. Persiste, para essa faixa de concentração, a eficácia da combinação dos métodos térmico, ácido e solvente orgânico, como elucidado anteriormente. Desta combinação de eficácia consolidada, ramifica-se uma nova, com inclusão de enzimas e/ou fungos. Ambos são vantajosos e asseguram um processo ambientalmente amigável, sem geração de compostos tóxicos/ inibidores, de baixo consumo energético e economicamente viável (SINDHU et al., 2016), entretanto, distinguem-se em seu modo de funcionamento. As enzimas garantem atuação mais direcionada, via celulasas, lacases, peroxidases etc, às quais alvejam alvos restritos, enquanto os fungos, dotados naturalmente de um sistema lignolítico (WAN et al., 2012), operam, frequentemente, empossados do conteúdo enzimático integral disponível do microrganismo, variável de acordo com cada espécie. Sugere-se, portanto, que a escolha da metodologia biológica depende de alguns parâmetros, tais como, conhecimento prévio da concentração dos compostos químicos do substrato, nível de assertividade que se almeja obter e capital de investimento disponível.

A condução de DA utilizando substrato lipídico individualmente é pouco frequente devido a sua alta resistência a biodegradação consequente da elevada sensibilidade das bactérias anaeróbicas a substâncias ricas em lipídios e aos compostos intermediários do processo de degradação (KAYA et al., 2020). Entretanto, a capacidade de produção de biogás do substrato lipídico, como codigestão, sobressai-se quando comparado a substratos ricos em carboidrato e proteína (OHEMENG-NTIAMOAH et al., 2018), sugerindo ou inferindo que a valoração desse composto orgânico está sujeita a forma de manuseio, ou seja, como e quais tipos de intervenção serão aplicadas. A configuração do substrato determina o nível de potencial alcançado. Os resultados observados neste estudo sugerem que as categorias de pré-tratamentos testadas, para essa configuração de substrato, não obtiveram diferença significativa de desempenho entre si, havendo tendência do IC para rendimento de metano negativo quando submetido a análise mais abrangente. No entanto, quando a averiguação das análises é refinada a

comparação das metodologias contidas nas categorias de pré-tratamento, tem-se uma inclinação positiva a combinação de temperatura + pressão.

Como bem elucidado na literatura, cada componente químico responde de maneira singular e previsível a biodegradação durante o processo de DA, sendo possível estimar a partir de sua composição química, o potencial de geração de biogás e os tipos de compostos intermediários formados. Desta forma, as intervenções no processo como os pré-tratamentos, agem de forma corretora operando assertivamente nas lacunas previstas. Em situações onde o substrato encontra-se em equidade com seus componentes químicos, ou seja, não há predominâncias de um único componente na composição, todas as categorias de pré-tratamentos tendem a um aumento do rendimento de metano indiscriminadamente, sem resultados destoantes. Esse resultado indicando que, em situações nas quais o equilíbrio da composição é procedido para efeito aprimorador, como a codigestão, este equilíbrio já atua como um tipo de intervenção potencializada.

O substrato misto compreende qualquer matéria orgânica que não possui predominância química de determinado composto, ou seja, a composição química não apresenta alta variação na concentração entre seus componentes. Estão contidos neste agrupamento, resíduo alimentício (carnes e vegetais), codigestão e esgotamento sanitário. Nesse substrato não há nenhuma categoria de pré-tratamento que desponte positivamente, a eficácia dos métodos estabilizam-se a um rendimento mediano sem diferir um dos outros. Tal resultado inconclusivo reafirma a eficácia do pré-tratamento condicionada à composição química da matéria, visto que, sem predominância de um dado componente químico, a resposta gerada é inespecífica, portanto, a atuação assertiva na degradação do substrato é drasticamente reduzida resultando em uma baixa influência do pré-tratamento no aumento de rentabilidade de metano.

5.3 Implicações no aspecto científico, ambiental, econômico e social

A determinação da composição química do substrato como parâmetro regulador da eficiência de pré-tratamentos garante, em larga escala, melhor direcionamento na escolha do modelo operacional adequado para uma dada configuração, acarretando em maior chance de êxito no planejamento e funcionamento de uma

usina de biogás. Além disso, a definição desse fator-chave regulador traz à luz a possibilidade de inferir a capacidade de potencializar substratos ainda não testados, sendo possível estimar, a partir dos resultados presentes neste estudo, a viabilidade de exploração de uma nova matéria-prima.

A exploração dos métodos de pré-tratamentos aplicados à digestão anaeróbica implica, no âmbito ecológico, na redução do conteúdo poluidor seja pelo manejo especializado do resíduo ou pela possibilidade de substituição de pré-tratamentos com compostos tóxicos nocivos ao meio ambiente. A compreensão acerca da tecnologia reduz os riscos de prejuízos por erro operacional, o que torna os biogás gerado pela DA, atrativo economicamente refletindo positivamente em benefícios para a sociedade através do tratamento de conteúdo com risco sanitário, redução de emissão de GEE, substituição de fontes de energia fóssil por alternativas limpas e cumprimento de políticas e metas ambientais.

6. CONCLUSÃO

A inserção de pré-tratamentos ao processo de DA otimiza a degradação, aumenta o rendimento de metano e reduz a fração residual da operação com potencial emissor de GEE. A eficácia dos pré-tratamentos exhibe forte dependência a composição química do substrato. A escolha adequada das metodologias resulta em uma resposta acurada, aumentando a geração de metano em mais de 200% em relação ao substrato não tratado. Em substratos lignocelulosicos, as metodologias químicas exibem melhor desempenho. O aumento da concentração de lignina no substrato responde proporcionalmente ao aumento da complexidade de atuação dos pré-tratamentos, demandando ações de metodologias combinadas.

A biodegradação das moléculas constituintes do substrato predominantemente proteico responde negativamente a todas as intervenções acometidas por metodologias químicas. Em contraste, o pré-tratamento biológico apresenta resposta positiva destoante de todas as demais categorias de pré-tratamento, exibindo capacidade de potencializar metodologias não biológicas com rendimento comprovadamente inferior quando combinados ao mesmo. Nota-se, entretanto, que a mesma produtividade não é observada em substratos lignocelulosicos, lipídicos e mistos, o que reafirma sua efetividade condicionada à caracterização química.

O desempenho dos pré-tratamentos em substrato lipídico exibem, de forma unanime, inclinação negativa com rendimento de metano inferior a substratos não tratados. Enquanto isso, substratos de composições balanceadas quimicamente, não exibem nenhuma tendência de melhor desempenho para qualquer categoria observada. Esses resultados confirmam que a eficácia das categorias de pré-tratamento é condicionada pela predominância química do substrato. Os efeitos reguladores dessa intervenção são mais expressivos em substratos desequilibrados, ou seja, com predominância de componentes, por haver maior carência de correções.

7. REFERÊNCIAS

ABDEEN, F. R. H., MEL, M., JAMI, M. S., IHSAN, S. I., & ISMAIL, A. F. A review of chemical absorption of carbon dioxide for biogas upgrading. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(6), 693–702. 2016.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: 22 de dezembro de 2018.

ALVIRA, P., TOMÁS-PEJÓ, E., BALLESTEROS, M., & NEGRO, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851–4861, 2010.

AMARAL, CECÍLIA MARIA COSTA DO ET AL. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. *Cienc. Rural* [online]. vol.34, n.6, pp.1897-1902, 2004.

ANDRADE, E. T., CARVALHO, S. R. G., SOUZA, L. F. Programa Do Proálcool E O Etanol No Brasil. *Engevista*, V. 11, n. 2. p. 127-136, dezembro 2009.

ANP. Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis>> Acesso em: 20 de dezembro de 2018.

ANWAR, Z., GULFRAZ, M., & IRSHAD, M. Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2), 163–173. 2014.

ASGHER, M., SHAHID, M., KAMAL, S., & IQBAL, H. M. N. Recent trends and valorization of immobilization strategies and ligninolytic enzymes by industrial biotechnology. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 101, 56–66, 2014.

BADRUZZAMAN, M., VOUTCHKOV, N., WEINRICH, L., & JACANGELO, J. G. Selection of pretreatment technologies for seawater reverse osmosis plants: A review. *Desalination*, 449, 78–91. 2019.

BASU, S., & DEBNATH, A. K. Advanced Ultrasupercritical Thermal Power Plant and Associated Auxiliaries. *Power Plant Instrumentation and Control Handbook*, 893–988. 2019.

BEAULIEU, J.J., DELSONTRO, T. & DOWNING, J.A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nat Commun* 10, 1375. 2019.

BEHERA, S., ARORA, R., NANDHAGOPAL, N., & KUMAR, S. Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 91–106, 2014.

BILOTTA, P., & ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(2), 275–282, 2016.

BIOSANTECH, T. A. S., RUTZ, D., JANSSEN, R., & DROSG, B. Biomass resources for biogas production. *The Biogas Handbook*, 2013.

BIOSANTECH, T. A. S., RUTZ, D., JANSSEN, R., & DROSG, B. Biomass resources for biogas production. *The Biogas Handbook*, 19–51. 2013.

CALDEIRA, D., VAZ-CARNEIRO, A., & COSTA, J. Impacto da frequência posológica na adesão terapêutica em doenças cardiovasculares crônicas: revisão

sistemática e meta-análise. *Revista Portuguesa de Cardiologia*, 33(7-8), 431–437. 2014.

CARVALHO, JOAQUIM FRANCISCO DE. Combustíveis fósseis e insustentabilidade. *Cienc. Cult.*, São Paulo , v. 60, n. 3, p. 30-33, Sept. 2008.

CERVI, RICARDO G.; ESPERANCINI, MAURA SEIKO TSUTSUI; BUENO, OSMAR DE CARVALHO. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suínica para geração de energia elétrica. *Engenharia Agrícola. Associação Brasileira de Engenharia Agrícola*, v. 30, n. 5, p. 831-844, 2010.

CHANG, I-SHIN & ZHAO, JI & YIN, XUEFENG & WU, JING & JIA, ZHIBIN & WANG, LIXIN. Comprehensive utilizations of biogas in Inner Mongolia, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 1442-1453. 2011.

CHEN, H., LIU, J., CHANG, X., CHEN, D., XUE, Y., LIU, P., LIN H., HAN, S. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals. *Fuel Processing Technology*, 160, 196. 2017.

CHEN, X., LI, H., SUN, S. ET AL. Effect of hydrothermal pretreatment on the structural changes of alkaline ethanol lignin from wheat straw. *Sci Rep* 6, 39354. 2016.

EDSTRÖM, MATS & NORDBERG, AKE & THYSELIUS, LENNART. Anaerobic Treatment of Animal Byproducts from Slaughterhouses at Laboratory and Pilot Scale. *Applied biochemistry and biotechnology*. 109. 127-38. 2003.

EPE. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. Disponível em: <<https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>> Acesso em: 26 de maio de 2020.

FARIAS, LEONEL & SELLITTO, MIGUEL. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. *Revista Liberato*. 12. 07-16. 2011.

GERARDI, M.H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, ISBN: 0-471-20693-8. 2003.

HEDGES, LARRY & GUREVITCH, JESSICA & CURTIS, PETER. The Meta-Analysis of Response Ratios in Experimental Ecology. *Ecology*. 80. 1150-1156. 10.2307/177062. 1999.

HESAMI, S. M., ZILOUEI, H., KARIMI, K., & ASADINEZHAD, A. Enhanced biogas production from sunflower stalks using hydrothermal and organosolv pretreatment. *Industrial Crops and Products*, 76, 449–455. 2015.

HU, C. C., GIANNIS, A., CHEN, C.-L., & WANG, J.-Y. Evaluation of hydrogen producing cultures using pretreated food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(33), 19337–19342. 2014.

IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas (Relatório de Pesquisa). Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf> Acesso em: 26 de dezembro de 2018.

KARAKASHEV, D., BATSTONE, D. J., & ANGELIDAKI, I. Influence of Environmental Conditions on Methanogenic Compositions in Anaerobic Biogas Reactors. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(1), 331–338, 2005.

KAYA, D, AND HUNG, YT. Institute, Lenox. “Treatment Of Vegetable Oil Refining Wastes.” *Evolutionary Progress in Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics (STEAM)*. 2020.

KIM, J. S., LEE, Y. Y., & KIM, T. H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 199, 42–48. 2015.

KIM, M., GOMEZ, C. Y., AHN, Y., & SPEECE, R. E. Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. *Environmental Technology*, 24(9), 1183–1190, 2003.

KOTHARI, R., TYAGI, V. V., & PATHAK, A. Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2010.

KUH, K. F. The Law of Climate Change Mitigation: An Overview. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 505–510. 2018.

KUMAR, P., BARRETT, D. M., DELWICHE, M. J., & STROEVE, P. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729, 2009.

LIU, XIAOJUN & LENDORMI, THOMAS & LANOISELLÉ, JEAN-LOUIS. A Review of Hygienization Technology of Biowastes for Anaerobic Digestion: Effect on Pathogen Inactivation and Methane Production. *Chemical Engineering Transactions*. 70. 529-534. 2018.

MENTEN, FABIO & CHÈZE, BENOÎT & PATOUILLARD, LAURE & BOUVART, FRÉDÉRIQUE. A review of LCA greenhouse gas emissions results for advanced biofuels: The use of meta-regression analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26. 108–134. 2013.

MERKLEIN, K., FONG, S. S., & DENG, Y. Biomass Utilization. *Biotechnology for Biofuel Production and Optimization*, 291–324. 2016.

MIRANDA, NICOLE & GRANELL, RAMÓN & TUOMISTO, HANNA & MCCULLOCH, MALCOLM. Meta-analysis of methane yields from anaerobic digestion of dairy cattle manure. *Biomass and Bioenergy*. 86. 65-75. 2016.

MMA. Gestão de Resíduos Orgânicos. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADuos-org%C3%A2nicos.html>>. Acesso em 27 de dezembro de 2018.

MME. Brasil institui Política Nacional dos Biocombustíveis (RenovaBio). Disponível em: < http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/brasil-institui-politica-nacional-dos-biocombustiveis-renovabio-> Acesso em: 22 de dezembro de 2018.

MME. Propostas das Instituições Presentes na Reunião de Construção do Renovabio Biocombustíveis Biogás e Biometano. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/7948692/COLABORADORES+DIVERSOS_Propostas+para+Biog%C3%A1s+e+Biometano.pdf/1eb097ab-2ba3-4fe1-92e8-1788b878d3c2?jsessionid=AC802B166C93389BED1AB445EAB7CD10.srv155> Acesso em: 22 de dezembro de 2018.

MOHER, D., SHAMSEER, L., CLARKE, M. ET AL. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Syst Rev* 4, 1. 2015.

MULAT, DANIEL GIRMA & HORN, SVEIN. Biogas Production from Lignin via Anaerobic Digestion. 10.1039/9781788010351-00391. 2018.

NAKAGAME, S., CHANDRA, R. P., & SADDLER, J. N. The Influence of Lignin on the Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Biomass Substrates. *Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Fibers from Forest Biomass*, 145–167. 2011.

OHEMENG-NTIAMOAH, J., & DATTA, T. Evaluating analytical methods for the characterization of lipids, proteins and carbohydrates in organic substrates for anaerobic co-digestion. *Bioresource Technology*, 247, 697–704. 2018.

OLIVEIRA, LUCIANA GONZAGA DE; MANTOVANI, SIMONE MORAES. Transformações biológicas: contribuições e perspectivas. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 742-756, 2009.

REA, JONATHAN. Kinetic modeling and experimentation of anaerobic digestion. 2014.

RUZZA, LUCAS DALLÓ. Estudo da separação de biogás através de processos de destilação criogênica. 2019. 52 f. Trabalho (Conclusão de Curso). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, 2019.

SCHNURER, A. AND JARVIS, A. Microbiological Handbook for Biogas Plant. Swedish Waste Management, Swedish Gas Centre, Malmö, 1-74. 2009.

SINDHU, R., BINOD, P., & PANDEY, A. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass – An overview. *Bioresource Technology*, 199, 76–82. 2016.

SOUZA, O., FEDERIZZI, M., COELHO, B., WAGNER, T. M., & WISBECK, E. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(4), 2010.

STEPHAN, B. Market development and certification schemes for biomethane. *The Biogas Handbook*, 444–462. 2013.

STROUP, D. F. Meta-analysis of Observational Studies in Epidemiology A Proposal for Reporting. *JAMA*, 283(15), 2000.

SURENDRA, K. C., TAKARA, D., HASHIMOTO, A. G., & KHANAL, S. K. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846–859. 2014.

TAHERZADEH, M., & KARIMI, K. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9), 1621–1651, 2008.

TOLMASQUIM, M. T., GUERREIRO, A., & GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. *Novos Estudos - CEBRAP*, (79), 47–69. 2007.

TRIOLO, J. M., SOMMER, S. G., MØLLER, H. B., WEISBJERG, M. R., & JIANG, X. Y. A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*, 102(20), 9395–9402. 2011.

WAN, C., & LI, Y. Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1447–1457. 2012.

WARREN, KATIE ELIZABETH H. A. Techno-economic Comparison of Biogas Upgrading Technologies in Europe.2012.62 f. Tese (Mestrado em Ciência, Energia Renovável e Tecnologia de Energia Sustentável) - Departamento de Ciência Ambiental, Universidade de Jyväskylä, Finlândia, 2012.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860, 2009.

WOODCOCK, B.A., GARRATT, M.P.D., POWNEY, G.D. et al. Meta-analysis reveals that pollinator functional diversity and abundance enhance crop pollination and yield. *Nat Commun* 10, 1481, 2019.

WORLD BIOGAS ASSOCIATION (WBA). Disponível em: <https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/09/WBA-globalreport-56ppa4_digital-Sept-2019.pdf> Acessado em 10 de junho de 2020.

YANG, B., WYMAN, C.E., Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol. *Biofuels Bioprod. Bior.* 2, 26–40, 2008.

ZEGGINI, E., SCOTT, L. J., SAXENA, R., VOIGHT, B. F., MARCHINI, J. L., ALMGREN, P. Meta-analysis of genome-wide association data and large-scale replication identifies additional susceptibility loci for type 2 diabetes. *Nature Genetics*, 40(5), 638–645, 2008.

ZHAO, Q. LEONHARDT, E. MACCONNELL, C. FREAR, C AND CHEN, S. Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion. *Climate Friendly Farming. CSANR Research Report*, 2010.

ZHENG, Y., ZHAO, J., XU, F., & LI, Y. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35–53, 2014.

8. ANEXO

8.1. Conversor auxiliar para interpretação do $\ln(R)$ como valores percentuais

Tabela 1. Correspondência exata de $\ln(R)$ para porcentagens no intervalo de -90% a +100%.

%	$\ln(R)$
-90	-2,302585093
-80	-1,609437912
-70	-1,203972804
-60	-0,916290732
-50	-0,693147181
-40	-0,510825624
-30	-0,356674944
-20	-0,223143551
-10	-0,105360516
0	0
10	0,09531018
20	0,182321557
30	0,262364264
40	0,336472237
50	0,405465108
60	0,470003629
80	0,587786665
90	0,641853886
100	0,693147181

8.2 Metodologias de pré-tratamento por categorias

8.2.1 Pré-tratamentos químicos

		Pretreatment Methods [Chemicals]	N	References
CHEMICAL	Alkaline	AHP (alkali hydrogen peroxide)	4	[376]
		Ammonia (NH ₃)	3	[43] [347]
		Ammonium (NH ₄)	3	[29] [92] [345]
		Aqueous Ammonia Soaking	1	[193]
		Ca(OH) ₂	37	[93] [106] [130] [161] [310] [334] [375] [376]
		CaO	4	[43] [288]
		Black liquor recycled	5	[110]
		Free Ammonia	17	[29] [92] [345]
		H ₂ O ₂	18	[03] [132] [138] [145] [242] [359]
		KOH	41	[130] [133] [140] [154] [184] [362] [376] [06]
		NaOH	125	[29] [30] [35] [37] [92] [93] [100] [121] [128] [141] [149] [180] [182] [183] [202] [220] [223] [235] [237] [238] [241] [244] [246] [251] [296] [299] [305] [316] [345] [359] [360] [362] [374] [376]
		Newly prepared alkaline ferrate (NPAF)	4	[356]
	Organosolv	Ethanol	10	[23] [125] [175] [373]
		N-Methylmorpholine-N-Oxide	6	[278]
		Methanol	1	[175]
	Acid	Acetic Acid	1	[175]
		FNA(free nitrous acid)	15	[49] [197] [253] [302]
		H ₂ SO ₄	6	[347] [376]
		H ₃ PO ₄	13	[66] [376]
HCl		11	[237] [284] [299] [316] [359]	
HNO ₃		1	[223]	
Maleic Acid		6	[51]	
Peracetic acid	1	[128]		

		Urea	8	[91] [148] [367]
	Aerobic	Aeration	1	[231]
		Aerobic	20	[19] [69] [339] [372] [381]
		Microaeration	29	[28] [42] [44] [48] [123] [274]
		Microaerobically	8	[247] [248]
	Ozonation	Ozonation	29	[57] [103] [131] [193] [198] [307] [308] [318] [324]
		Zero Valent Iron	6	[224] [366]
	Zero Valent Iron	ZVSI (zero valent scrap iron)	5	[167]
		Inorganic Supplementation	Nutrient	12
	Fly Ash		5	[372]
	Potassium Ferrate		1	[160]
	Metal (Ca, Fe, Al, Mg)		1	[126]
	Surfactant	Rhamnolipid	1	[128]
		Sodium dodecyl sulphate (SDS)	2	[128] [379]
		Tea saponin	1	[302]
	Electrical	Electrohydrolysis	1	[5]
		Electrolysis	8	[88] 200] [237] [335]
		Eletrochemical	3	[8] [47] [62]
		cationic polyacrylamide	4	[363]
	Salt	NaCl	4	[95]
CHEMICAL + CHEMICAL	Alkali +Alkali	CaO + Ammonia	1	[43]
		KOH + Ca(OH)	9	[130]
	Organosolv + Acid	Ethanol + Acetic Acid	1	[175]
		Ethanol + Sulphuric Acid	1	[175]
		Methanol + Acetic Acid	1	[175]
		Methanol + Sulphuric Acid	1	[175]
	Acid +Acid	Acetic Acid + Hydrochloridric Acid	1	[175]
		Acetic Acid + Sulphuric Acid	1	[175]
		Acid Maleic + Acid Sulphuric	6	[51]
	Others	Acetato	1	[307]
		B-cyclodextrin	1	[128]

		Carbohydrate	9	[227]
		Dilution	1	[226]
		Water Impregnation	2	[226]
		Ozone + Soaking Aqueous Ammonia	1	[193]
		Fenton Process	2	[21]
		Aeration + Metal supplementation	2	[231]
		Fly Ash + Aerobic condition	4	[372]
		Free Nitrous Acid + Tea	1	[302]
		TOTAL	528	

8.2.2 Pré-tratamentos físicos

		Pretreatment Methods [Physical]	N	References
PHYSICAL	Mechanical	Beads mill	11	[206] [317] [359]
		Beating	9	[90] [144]
		Briquetted	4	[54] [122]
		Disintegrated	1	[53]
		Extrusion	5	[13] [70]
		Roller-milled	3	[70]
		Grinder	5	[45] [286]
		Filtration	2	[38]
		Ground	4	[18] [70]
		Milled	9	[22] [52] [77] [193] [226]

		Shredded	9	[56] [70]
	Microwave	Microwave	50	[67] [71] [99] [166] [216] [245] [259] [273] [277] [283] [287] [352]
	Thermal	Thermal	219	[2] [11] [17] [12] [14] [38] [52] [59] [68] [82] [99] [101] [108] [111] [117] [143] [178] [197] [198] [206] [229] [239] [244] [280] [293] [296] [304] [310] [316] [325] [327] [329] [347] [349] [352] [358] [361] [374]
	Thermal Combat of Pathogens	Thermal (Hygienized)	16	[265] [267] [299] [348]
		Thermal (Pasteurized)	1	[270]
		Thermal (Sterilized)	7	[270] [354] [358]
	Ultrasound	Ultrasonic	49	[37] [57] [67] [88] [134] [155] [165] [254] [273] [291] [296] [329] [374] [379]
		Homogeneizer	3	[329]
		Ultrasound	87	[74] [192] [196] [211] [219] [223] [247] [248] [261] [265] [267] [271] [299] [300] [329] [359]
	Pressure	High-pressure extruding	4	[34]
		Steam explosion (only pressure)	3	[329]
		Hydrodynamic Cavitation	3	[369]
	PHYSICAL + PHYSICAL	Thermal + Pressure	Autoclave	91
Thermal + Pressure			8	[111] [358] [179]
Thermobarical			35	[208]

		Hydrothermal	82	[4] [15] [40] [55] [76] [105] [112] [152] [174] [194] [223] [240] [257] [319] [332] [334] [340] [342]	
		Thermal Hydrolysis	94	[09] [32] [169] [196] [199] [214] [225] [252] [326] [365] [371] [380]	
		Steam Exploxion	181	[25] [41] [52] [75] [78] [85] [96] [147] [184] [188] [205] [207] [218] [226] [232] [247] [248] [261] [279] [281] [286] [313] [330] [353] [359] [376]	
	Thermal + Pressure +Mechanical		Grinder + Steam Exploxion	4	[45]
			Milled + Autoclaved	2	[22]
	Others		Microwave-ultrasonic	1	[273]
			Ultrasound + Hydrothermal	2	[223]
			Ultrasound + Thermal	5	[10]
			Filtration + Thermal	4	[38]
			Ultrasonication + Electrolysis	1	[88]
		TOTAL	1014		

8.2.3 Pré-tratamento químico-físico

	Pretreatment Methods [Chemico-Physical]	N	References
Acid+Thermal	Free Nitrous Acid + Thermal	3	[197]
	H2SO4 + Autoclave	10	[116] [222] [263] [337] [347]
	H2SO4 + Hydrothermal	8	[105]

	H ₂ SO ₄ + Thermal	2	[206] [285]
	H ₃ PO ₄ + Steam	2	[288]
	HCl + Autoclave	2	[132]
	HCl + Grinder	7	[45]
	HCl + Thermal	8	[177] [344]
Organosolv+Thermal	Ethanol + Thermal	22	[159] [333]
	Hydrothermal + Glycerol	6	[332]
	Hydrothermal + Isopropanol	8	[105]
	Lewis acids organosolv + Autoclave	6	[73]
Alkaline + Thermal	Alkaline-Thermal	5	[368]
	Ammonia (NH ₃) + Thermal	16	[26]
	Ca(OH) ₂ + Autoclave	2	[321]
	Ca(OH) ₂ + Thermal	36	[215] [269] [310]
	CaO + Steam sterilizer	20	[354]
	H ₂ O ₂ + Microwave	4	[24] [65]
	H ₂ O ₂ + Thermal	1	[258]
	H ₂ O ₂ + Thermal Hydrolysis	15	[214]
	KOH + Autoclave	3	[243]

	KOH + Steam Explosion	2	[184]
	KOH + Thermal	3	[243]
	NaOH + Autoclave	23	[220] [222] [244] [256] [295] [321]
	NaOH + Microwave	11	[220] [287]
	NaOH + Thermal	79	[2] [26] [86] [108] [142] [143] [150] [157] [239] [240] [241] [244] [251] [264] [303] [344] [374]
	NaOH+Autoclave	6	[37] [100] [132]
Alkaline + Mechanical	KOH + Mold Size	4	[122]
	KOH+ Briquetted	8	[54]
	NaOH + Electrical	4	[200]
	NaOH + Extrusion	1	[13]
	NaOH + Grinder	7	[45]
	NaOH + Mold Size	3	[122]
	NaOH + Sonication	1	[374]
	NaOH + Ultrasonic	3	[220] [360]
	NaOH + Ultrasound	10	[223] [328]
	Thermophilic-alkaline (pH 11)	1	[296]
Aerobic + Thermal	Microaeration + Thermal	2	[61]

	Semi-aerobic fermentation + Thermal	8	[117]
	Microaerobic + Thermal	5	[178]
Sodium carbonate (Na₂CO₃) + Thermal	Sodium carbonate (Na ₂ CO ₃) + Thermal	24	[349]
Acid + Organosolv + Thermal	H ₂ SO ₄ + Ethanol + Thermal	16	[159]
Eletrochemical + Hypochlorite	Eletrochemical + Hypochlorite	5	[47]
Acid + Organosolv + Thermal + Pressure	H ₂ SO ₄ + Isopropanol + Hydrothermal	8	[105]
H₂SO₄ + Supercritical CO₂	H ₂ SO ₄ + Supercritical CO ₂	9	[176]
Imidazolium-based ionic liquids + Thermal	Imidazolium-based ionic liquids + Thermal	4	[27]
Others	Deflocculation + Microwave	1	[153]
	Flocculation + Microwave	1	[153]
	Flue Gas condensate + Thermal	3	[177]
	H ₂ O + Thermal	3	[177]
	H ₂ SO ₄ + H ₂ O + Microwave	1	[65]
	Mold Size + Acetic Acid	2	[122]
	Particle Size + Dilution	1	[226]
	Sodium dodecyl sulfate (SDS) + Disintegrated	2	[53]
	Surfactant coupled sonic	1	[67]

	Water + Autoclave	1	[263]
	Water Impregnation + Steam Explosion	1	[226]
	Wet Ox + Hydrothermal	2	[340]
	TOTAL	452	

8.2.4 Pré-tratamentos biológicos

	Enzyme (Commercial)
	Enzyme (Bacterium)
	Enzyme (Fungi)
	Enzyme (Bact/Fungi)
	Enzyme (Endogenous)

Pretreatment Methods [Biological]	Description	Actor	From	N	References
Enzymatic Mix	<i>Lactobacillus plantarum</i> spp., <i>Lactobacillus pentosaceus</i> spp., and <i>Lactobacillus buchneri</i> spp.	Enzyme	Bonsilage Mais (Lactosan)	4	[290]
	Agazym BGL: cellulase, b-glucanase, Hemicellulase and Xylanase (from <i>Aspergillus aculeatus</i>); Ultra L: polygalacturonase and pectinase (from <i>Aspergillus</i> strains); Pulpzyme HC: endo-xylanases from (<i>Bacillus</i> strains); Primafast 200: endo-1-4-b- glucanases	Enzyme	Commercial Agazym BGL and Ultra L (Garzanti Specialties), Pulpzyme HC (Novo Nordisk) and Primafast 200 (Genencor Inc.).	1	[182]
	Protease and Amylase	Enzyme	Bacterium (The bacterial culture hold two strains (Bacillus jersish 03 Accession number KC597266 and Bacillus jersish 04	1	[104]

		Accession number KC597267))		
Protease, amylase and lipase	Enzyme	Bacterial product Liquid Certizyme 5TM (<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> and <i>Bacillus thuringiensis</i>)	3	[299]
Amylase and Cellulase	Enzyme	Commercial	1	[323]
Cellulase and Protease	Enzyme	Cellulase- Fungi (<i>Trichoderma reesie</i>) and Protease- Bacterium (<i>Bacillus licheniformis</i>)	1	[309]
Cellulase and Cellobiase	Enzyme	Celluclast 1.5 L (<i>Trichoderma reesei</i> ATCC 26921); Novozyme® 188 (<i>Aspergillus niger</i>)	5	[186]
Celustar XL and Agropect pomace	Enzyme	Fungi (<i>Trichoderma longibrachiatum</i>)	1	[18]
Endo-1,3(4)-b-glucanase, and collateral cellulose, xylanase and feruloyl esterase activities among others	Enzyme	Commercial Ultraflo L (Novozymes)	2	[74]
Esterase and Protease	Enzyme	LipomodTM 957 (Biocatalysts Ltd)	2	[196]
Exoglucanase, endoglucanase, hemi-cellulase and b-glucosidase	Enzyme	Commercial Accelerase 1500 (DepolTM 40L) Biocatalysts	1	[223]
Cellulase and Endogalactouronase	Enzyme	(LipomodTM 957 and DepolTM 40L) Biocatalysts	2	[196]
Laccase and Versatile Peroxidase	Enzyme	Laccase (<i>Trametes versicolor</i> - fungi) and Versatile Peroxidase (<i>Bjerkandera adusta</i> -fungi)	14	[164]
Glucoamylase and α -amylase	Enzyme	Commercial Genencor Danisco Singapore Pte Ltd	1	[156]
Cellulase, Endogalactouronase, Esterase and Protease	Enzyme	(LipomodTM 957 and DepolTM 40L) Biocatalysts	2	[196]
Cellulase, glucohydrolase and xylanase	Enzyme	(Shearzyme) Commercial Novozyme	1	[109]

Cellulolytic	Cellulolytic	Enzyme	Commercial Novozymes (Cellic CTec2)	6	[23] [330]
	Cellulolytic	Enzyme	Endogenous (by induction of cellulases)	1	[16]
	Cellulolytic	Enzyme	Commercial Viscozyme L (Novozymes)	4	[52]
	Cellulolytic	Enzyme	Cellic® CTec3 enzyme (Novozymes)	4	[172]
	Cellulolytic	Enzyme	Bacterium (<i>C. thermocellum</i>)	2	[355]
	Cellulolytic	Enzyme	(Celluclast) 1.5L Novozyme	8	[112]
	Cellulolytic	Enzyme	Fungi (<i>T. viride</i>)	14	[158]
	Cellulolytic	Enzyme	Bacterium (<i>C. cellulolyticum</i>) DSMZ	2	[212]
	Cellulolytic	Enzyme	Microbial consortia of Bacteria (<i>Clostridium straminisolvens</i>)	5	[185]
Cellulase	Cellulase	Enzyme	Commercial cellulase ENMEX®	1	[357]
	Cellulase	Enzyme	(Celluclast [109]) Commercial Novozymes	3	[58] [109] [338]
Consortium	Peptone–cellulose solution	Enzyme	Microbial Consortium	11	[260]
	Lignocellulolytic microbial consortium	Microbes and enzymes	Microflora (Sugarcane bagasse)	5	[233]
	Rumen fluid	Microbes	Reticulorumen of cows	12	[50] [230] [336]
	Consortia	Microbes	Liquid Fraction of Digestate	1	[43]
	Bioaugmentation of Anaerobic Rumen Fungi	Enzyme	Carbohydrate hydrolysing, cellulolytic, hemicellulolytic, glycolytic, and proteolytic enzymes	3	[01]
	Consortia	Enzyme	Fungi (<i>Coprinus cinereus</i>) and bacteria (<i>Ochrobactrum sp.</i>)	5	[185]
	Consortia	Enzyme	Bacteria (<i>Clostridium</i> , <i>Bacteroides</i> , <i>Alcaligenes</i> , and <i>Pseudomonas</i>)	5	[185]

Feruloyl Esterase	Feruloyl esterase	Enzyme	(Ultraflo®) Commercial Novozymes	1	[13]
	Feruloyl esterase	Enzyme	Fungi (<i>Aspergillus</i>)	1	[13]
Fungal Mash	Fungal Mash	Enzyme	Fungi (<i>Aspergillus awamori</i>)	4	[36] [156]
	Fungal Mash	Enzyme	Fungi (<i>Aspergillus oryzae</i>)	6	[350]
	Fungal Mash	Enzyme	Fungi (<i>Pleurotus ostreatus</i>)	3	[22]
	Fungal Mash	Enzyme	Fungi (<i>C. subvermispora</i>)	5	[72] [168]
Hydrolytic	Hydrolytic	Enzyme	Novozyme	1	[80]
	Hydrolytic	Enzyme	Novalin (NovaBiotec)	1	[80]
	Hydrolytic	Enzyme	BFL 4400AN Biofuture	1	[80]
	Hydrolytic	Enzyme	Bacterium (Bifidobacteria, Enterobacteriaceae, Bacteriocides, Streptococci, and Clostridia)	2	[81]
	Hydrolytic	Enzyme	(Micropan Biogas) Eurovix	1	[80]
	Hydrolytic	Enzyme	(Zeolite M) Ipus	1	[80]
Keratinase	Keratinase	Enzyme	Bacterium (<i>B. megaterium</i>)	7	[320]
	Keratinase	Enzyme	Bacterium (<i>B. licheniformis</i>)	2	[320]
Lipase	Lipase	Enzyme	Commercial (from pig pancreas)	3	[39]
	Lipase	Enzyme	Fungi (<i>G. candidum</i>)	2	[163]
	Lipase	Enzyme	Fungi (<i>Aspergillus niger</i>)	6	[170]
	Lipase	Enzyme	Fungi (<i>Candida Rugosa</i>)	2	[244]
	Lipase	Enzyme	Commercial Biolipase L – Biocon	2	[261]
	Lipase	Enzyme	Fungi (<i>Penicillium sp.</i>)	27	[314]
Protease	Protease	Enzyme	Commercial Novozymes	1	[58]
	Protease	Enzyme	(Alcalase 2.5L) Commercial Novozyme	6	[195]
Alkaline Endopeptidase	Alkaline Endopeptidase	Enzyme	Commercial Novozymes	12	[250]
Alkaline Serine Protease	Alkaline Serine Protease	Enzyme	Commercial Novozymes	12	[272]

Endopeptidase	Endopeptidase	Enzyme	(Kilo Novo Protease)	4	[172]
Solid-state fermentation	Solid-state fermentation	Enzyme	Fungi (<i>P. chrysosporium</i>)	12	[191]
Fermentation	Ensiled	Fermentation		4	[72]
	Storage time	Fermentation		7	[89]
Others	Cysteine	Aminoacid	Sigma-Aldrich	1	[378]
	Endogenous enzyme activation	Enzyme	Inverted Phase Fermentation	3	[219]
	Endoglucanase	Enzyme	Fungi (<i>Trichoderma reesei</i>)	1	[64]
	Glucosidase	Enzyme	Fungi (<i>Trichoderma reesei</i>)	1	[64]
	Granular sludge	Microbes	Pulp and Paper mill (P&P sludge)	2	[63]
	Amylase	Enzyme	Commercial Novozymes	1	[58]
	Biosurfactant	Bacterium	Bacterium (Planococcus jake 01 (GenBank accession number: KJ792465))	1	[115]
	Pectinase	Enzyme	Commercial	1	[323]
			TOTAL	281	

8.2.5 Pré-tratamentos de combinações biológicas

		Pretreatment Methods [Bio-Combinations]	N	References
PHYSICAL + BIOLOGICAL	Thermal + Pressure + Enzyme	Autoclave + Enzyme (Alkaline Serine Protease- Comercial)	12	[272]
		Autoclave + Enzyme (Lipase- Candida Rugosa)	2	[244]
		Autoclave + Enzyme (Celustar XL [endoglucanase, xylanase] and Agropect pomace [pectinase] from <i>Trichoderma longibrachiatum</i>)	1	[18]
		Autoclave + Enzyme (<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>)	14	[7]
		Enzyme (Bacterium- Cellulase and laccase) + Autoclave	1	[357]
		Enzyme (Cellulosic- Commercial cellulose ENMEX®) + Autoclave	1	[357]

		Steam Explosion + Enzyme (Cellulolytic bacterium Caldicellulosiruptor bescii)	4	[353]	
		Steam Explosion + Enzyme (Cellic CTec2 protein (Novozymes))	26	[255]	
		Steam Explosion + Enzyme (Celluclast 1.5L and Novozym 188)	1	[286]	
		Hydrothermal + Enzyme (Exoglucanase, endoglucanase, hemi-cellulase and b-glucosidase)	2	[223]	
		Steam Exploxion + Enzyme (Cellic CTec2 (Novozymes))	1	[207]	
	Ultrasound + Enzyme	Ultrasound + Enzyme	7	[74] [223]	
	Thermal + Enzyme	Rumen fluid + Thermal	3	[230]	
		Thermal + Bacteria	6	[326]	
	Mechanical + Enzyme	Size reduction + Enzyme	3	[56]	
		Extrusion + Enzymatic hydrolysis	2	[13]	
		Milled + Fungal	6	[22]	
		Ground + Enzyme	1	[18]	
	CHEMICAL + BIOLOGICAL	Organosolv + Enzyme	Ethanol + Cellulolytic Enzyme	4	[23]
		Fungal + Moisture	Fungal+Moisture	21	[31] [209]
		Aerobic + Enzyme	Microaeration + Bacterium	5	[98]
Floculation		Floc disrupted by MgCl ₂ -bacterially	1	[104]	
		Floc disrupted by TiO ₂ -bacterially	1	[115]	
		Microbial (Rumen fluid) + Thermal + Aeration	5	[230]	

	Thermal + Aerobic + Microbes	Thermophilic microaerobic + Inoculum	12	[46]
	Others	NaOH + Enzyme (Ultra and Pulpzyme)	1	[182]
		NaOH + Extrusion + Enzymatic hydrolysis	1	[13]
		NaOH + Thermal + Cellulase enzyme	1	[142]
		CaO + Liquid Fraction of Digestate (microbes)	1	[43]
		Ground + Autoclaved + Enzyme	1	[18]
			TOTAL	147

8.3 Listagem de artigos

Nº	Título do Artigo
1	Improvement of biogas potential of anaerobic digesters using rumen fungi
2	Biogas Production from Waste Microalgal Biomass Obtained from Nutrient Removal of Domestic Wastewa
3	Enhanced methane production of Miscanthus floridulus by hydrogen peroxide pretreatment
4	Assessment of hydrothermal pretreatment of various lignocellulosic biomass with CO2 catalyst for enhance
5	Electrohydrolysis pretreatment of water hyacinth for enhanced hydrolysis
6	Improvement of wheat straw anaerobic digestion through alkali pre-treatment: Carbohydrates bioavailability
7	Anaerobic digestion of lignocellulosic biomasses pretreated with Ceriporiopsis subvermispora
8	Enhanced Production of Methane from Waste Activated Sludge by Pretreatment Using a Gas Diffusion Catl
9	Optimization of a thermal hydrolysis process for sludge pre-treatment
10	Sequential ultrasound and low-temperature thermal pretreatment: Process optimization and influence on sev
11	In-situ sludge pretreatment in a single-stage anaerobic digester
12	Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: Process optimization and effects o
13	Extrusion and enzymatic hydrolysis as pretreatments on corn cob for biogas production
14	Effects of thermal treatment on high solid anaerobic digestion of swine manure: Enhancement assessment a
15	Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass?
16	Enhanced biomethane production rate and yield from lignocellulosic ensiled forage ley by in situ anaerobic
17	Effect of various types of thermal pretreatment techniques on the hydrolysis, compositional analysis and cha
18	Effect of Different Sugar Beet Pulp Pretreatments on Biogas Production Efficiency

19	Effect of aerobic pre-treatment on hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion process
20	Microbial communities of biomethanization digesters fed with raw and heat pre-treated microalgae biomass
21	Effect of Fenton pretreatment on anaerobic digestion of olive mill wastewater and olive mill solid waste in a two-stage process
22	Combinations of fungal and milling pretreatments for enhancing rice straw biogas production during solid-state anaerobic digestion
23	High-Titer Methane from Organosolv-Pretreated Spruce and Birch
24	Does residual H ₂ O ₂ result in inhibitory effect on enhanced anaerobic digestion of sludge pretreated by microwave
25	Biogas production from reed biomass: Effect of pretreatment using different steam explosion conditions
26	Enhanced Biogas and Biohydrogen Production from Cotton Plant Wastes Using Alkaline Pretreatment
27	Enhancement of anaerobic digestion of grass by pretreatment with imidazolium-based ionic liquids
28	Effect of micro-aeration and inoculum type on the biodegradation of lignocellulosic substrate
29	Free ammonia pre-treatment of secondary sludge significantly increases anaerobic methane production
30	Inhibition of anaerobic digestion by dissolved lignin derived from alkaline pre-treatment of an aquatic macrophyte
31	Fungal pretreatment of rice straw with <i>Pleurotus ostreatus</i> and <i>Trichoderma reesei</i> to enhance methane production
32	Effects of thermal pretreatment on the biomethane yield and hydrolysis rate of kitchen waste
33	Pretreatment of food waste with high voltage pulse discharge towards methane production enhancement
34	Effects of high-pressure extruding pretreatment on MSW upgrading and hydrolysis enhancement
35	Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of olive mill solid waste
36	Enzymatic pretreatment of activated sludge, food waste and their mixture for enhanced bioenergy recovery
37	Effect of pretreatment and anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge on stabilization
38	Impacts of inoculum pre-treatments on enzyme activity and BMP
39	Effect of Lipase Hydrolysis on Biomethane Production from Swine Slaughterhouse Waste
40	Effect of hydrothermal pretreatment on <i>Miscanthus</i> AD
41	Separate digestion of liquid and solid fractions of thermally pretreated secondary sludge
42	Microaerobic pretreatment of sewage sludge on methane generation
43	Enhancing anaerobic digestion performance and degradation of lignocellulosic components of rice straw by microwave
44	Impacts of microaeration on the AD of corn straw and the microbial community
45	Physio-chemical pretreatments for improved methane potential of <i>Miscanthus lutarioriparius</i>
46	Effect of Different Mixed Microflora on the Performance of Thermophilic Microaerobic Pretreatment
47	Combined Electrochemical and Hypochlorite Pretreatment for Improving AD of WAS- Effect of Hypochlorite
48	Oxygen tolerance capacity of upflow anaerobic solid-state (UASS) with anaerobic filter (AF)
49	Enhanced methane from algal using free nitrous acid pre-treatment
50	Improvement of methane production from rice straw with rumen fluid pretreatment
51	Enhanced substrate degradation and CH ₄ with maleic acid pre-treatments in biomass
52	Impact of milling, enzyme addition and steam explosion on the solid waste of olive oil
53	Effect of chemo-mechanical disintegration on sludge AD for enhanced biogas
54	In-situ injection of potassium hydroxide into briquetted wheat straw and meadow grass
55	Investigating hydrothermal pretreatment of food waste for two-stage fermentative H ₂ and methane
56	Fresh banana pseudo-stems as a tropical lignocellulosic feedstock for methane production
57	Effect of ultrasonic and ozonation pretreatment on methane of molasses wastewater

58	Study on the bio-methane and microbial community in enzyme enhanced co-digestion of cow and corn
59	Upgrading of mesophilic AD of WAS by thermophilic pre-fermentation and recycle
60	A new process to improve short-chain fatty acids and bio-methane generation from waste activated sludge
61	Effect of O ₂ on the microbial activities of thermophilic anaerobic biomass
62	Electrochemical pretreatment of waste activated sludge
63	Enhanced Methane in High-Solids AD with Pulp and Paper Mill Sludge
64	Enhanced Separation of Organic Fraction Paper Mill Effluent for Energy Recovery
65	Enhancement of sludge anaerobic biodegradability by microwave H ₂ O ₂ pretreatment
66	Improvement of Solid-State Biogas from wood by concentrated phosphoric acid pretreatment
67	Surfactant coupled sonic pretreatment of WAS for positive biogas generation
68	The effects of co substrate and thermal pretreatment on anaerobic digestion performance
69	The effect of a short term aerobic pretreatment step on the anaerobic co-digestion of municipal solid waste
70	The effect of harvest time, dry matter and mechanical pretreatments on AD and enzymatic hydrolysis
71	BMP tests of different autoclaved and microwaved lignocellulosic organic of municipal solid waste
72	Comparison between ensilage and fungal pretreatment for giant reed and methane production
73	Composition, texture and methane potential of cellulosic residues from Lewis acids organosolv
74	Effect of enzymatic hydrolysis and ultrasounds pretreatments on corn cob and vine trimming for biogas
75	From pre-treatment toward inter-treatment -sewage sludge biomethanation
76	Kinetics of combined thermal pretreatment and AD of WAS from sugar and pulp
77	Toward the complete utilization of rice straw methane fermentation and lignin recovery
78	Influence of steam explosion pretreatment on AD of vinegar residue
79	Microbial Consortium with High Cellulolytic Activity (MCHCA) for Enhanced Biogas
80	Potential for valorization of dehydrated paper pulp sludge for biogas production addition of selected hydrolyt
81	Biological hydrolysis pretreatment on secondary sludge Enhancement of AD
82	Effect of low temperature of thermal pretreatment on anaerobic digestion of textile dyeing sludge
83	BMP test of untreated and hot air oven pretreated water hyacinth
84	Alkaline Pretreatment of Banana Stems for Methane Generation- Effects of Temperature and Physicochemi
85	Corn stover for biogas production effect of steam explosion on the gas and biodegradation
86	Effects of Oil Extraction on Ethanol and Biogas Production from Eruca sativa Seed Cake
87	Enhanced methane production and wastewater sludge stabilization of a continuous full scale thermal pretrea
88	Combined pretreatment of electrolysis and ultra-sonication towards enhancing solubilization and methane p
89	Importance of storage time in mesophilic anaerobic digestion of food waste
90	Mechanical pretreatment of waste paper for biogas production
91	Methane recovery from anaerobic digestion of urea-pretreated wheat straw
92	A novel free ammonia based pretreatment technology to enhance methane from primary sludge
93	Comparison of sodium hydroxide and calcium hydroxide pretreatments of giant reed for enzymatic digestib
94	Research on AD of corn stover enhanced by dilute acid pretreatment
95	Potential impact of salinity on methane production from food waste AD
96	Phenols recovery after steam explosion of Olive Mill Solid Waste and its influence on a biomethanization

97	Fungal pretreatment of willow sawdust and its influence on a biomethanization
98	Improved methane production from corn straw by microaerobic pretreatment with a pure bacteria system
99	Conventional heating vs. Microwave sludge pretreatment for thermophilic AD
100	Evaluation of chemical, thermobaric and thermochemical pre-treatment on AD of high-fat cattle slaughterhouse waste
101	Integrated bioethanol fermentation AD for valorization of sugar beet pulp
102	Optimization of microwave pretreatment of lignocellulosic waste for enhancing methane production Hyacinth
103	Ozonolysis of straw from <i>Secale cereale</i> L. for anaerobic digestion
104	Achieving profitable biological sludge disintegration through phase separation and predicting its anaerobic digestion
105	Enhanced biogas production from sunflower stalks using hydrothermal and organosolv pretreatment
106	Effect of Ca(OH) ₂ pretreatment on extruded rice straw anaerobic digestion
107	Enhanced decomposition of waste activated sludge via anodic oxidation for methane production and bioenergy
108	Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease
109	Improving biogas production from microalgae by enzymatic pretreatment
110	Improving the bioenergy production from wheat straw with alkaline pretreatment
111	Effects of thermal pretreatment on anaerobic digestion of C2_A0 <i>Nannochloropsis salina</i> C2_A0 biomass
112	Sequential parametric optimization of methane production from different sources of forest raw material
113	Effects of Thermo chemical Pre treatment on Bamboo for Biogas Production
114	Excess sludge and herbaceous plant co-digestion for volatile fatty acids generation improved by protein and urea
115	Effects of titanium dioxide mediated dairy waste activated sludge deflocculation on the efficiency of bacterial
116	The influence of dilute sulfuric acid pretreatment on biogas production from wheat plant
117	Semi-aerobic fermentation as a novel pre-treatment to obtain VFA and increase methane yield from primary
118	Mesophilic anaerobic digestion of pulp and paper industry biosludge-long-term reactor performance and effluent
119	Optimization of biogas production from coffee production waste
120	Effect of biological pretreatment of <i>Agropyron elongatum</i> BAMAR on biogas production by anaerobic digestion
121	Optimization of hydrolysis and volatile fatty acids production from sugarcane filter cake Effects of urea sup
122	Optimization of methane yield by using straw briquettes- influence of additives and mold size
123	Performance evaluation of micro-aerobic hydrolysis of mixed sludge Optimum aeration and effect on its bio
124	Methanogenic and carbon sequestration process facilitated by goethite and hematite in the presence of dissimilatory
125	Kinetic modelling and synergistic impact evaluation for the anaerobic co-digestion of distillers grains and food
126	The influence of organic-binding metals on the biogas conversion of sewage sludge
127	Sequential pretreatment for cell disintegration of municipal sludge in a neutral Bio-electro-Fenton system
128	Process assessment associated to microbial community response provides insight on possible mechanism of
129	An efficient method to improve the production of methane from anaerobic digestion of waste activated sludge
130	Pretreatment of Corn Stover for Methane Production with the Combination of Potassium Hydroxide and Calcium
131	Assessing energy benefits of operating anaerobic digesters at low temperature with solids pre-ozonation
132	Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential a
133	Pretreatment and intermediate hybrid treatments for the improvement of the anaerobic digestion of sewage s
134	Anaerobic digestion of microalgal biomass with ultrasonic disintegration
135	Microbial pretreatment of water hyacinth for enhanced hydrolysis followed by biogas production

136	Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge by bi
137	Destroying lignocellulosic matters for enhancing methane production from excess sludge
138	Maize cob waste pre-treatments to enhance biogas production through co-anaerobic digestion with OFMSW
139	Zero-valent iron enhanced methanogenic activity in anaerobic digestion of waste activated sludge after heat
140	Pretreatment of wheat straw with potassium hydroxide for increasing enzymatic and microbial degradability
141	Influence of NaOH and thermal pretreatment on dewatered activated sludge solubilisation and subsequent a
142	Improvement of gaseous energy recovery from sugarcane bagasse by dark fermentation followed by biometh
143	Enhancement of waste activated sludge (WAS) anaerobic digestion by means of pre and intermediate treatm
144	Beating treatment to enhance digestibility of fresh grass
145	Anaerobic codigestion of pretreated wheat straw with cattle manure and analysis of the microbial communit
146	The Effect of Aqueous Ammonia Soaking Pretreatment on Methane Generation Using Different Lignocellu
147	Evaluation of thermal steam-explosion key operation factors to optimize biogas production from biological
148	Effect of urea addition on giant reed ensilage and subsequent methane production by anaerobic digestion
149	Anaerobic digestion of poplar processing residues for methane production after alkaline treatment
150	Enhancing anaerobic digestibility of lignin-rich submerged macrophyte using thermochemical pre-treatment
151	Enhanced biomethane potential from wheat straw by low temperature alkaline calcium hydroxide pre-treatm
152	Low-temperature hydrothermal pretreatment followed by dry anaerobic digestion → sustainable strategy for
153	Influence of deflocculation on microwave disintegration and anaerobic biodegradability of waste activated s
154	Anaerobic co-digestion of poultry droppings and briquetted wheat straw at mesophilic and thermophilic con
155	Effect of ultrasonic pre-treatment on biogas yield and specific energy in anaerobic digestion of fruit and veg
156	Enhancing the hydrolysis and methane production potential of mixed food wastes by an effective enzymatic
157	Enhanced biogas production from penicillin bacterial residue by thermal-alkaline pretreatment
158	Biological pre-treatment Enhancing biogas production using the highly cellulolytic fungus <i>Trichoderma viri</i>
159	Efficient conversion of sweet sorghum stalks to biogas and ethanol using organosolv pretreatment
160	Potassium ferrate addition as an alternative pre-treatment to enhance short-chain fatty acids production from
161	Effect of Ca(OH) ₂ pretreatment on extruded rice straw anaerobic digestion
162	New method for enhancement of bioenergy production from municipal organic wastes via regulation of ana
163	Effect of enzymatic pretreatment on the anaerobic digestion of milk fat for biogas production
164	Effect of enzymatic pretreatment of various lignocellulosic substrates on production of phenolic compounds
165	The impact of sludge pre-treatments on mesophilic and thermophilic anaerobic digestion efficiency role of t
166	Anaerobic Digestion of Thermal Pretreated Brewers' Spent Grains
167	Influence of zero valent scrap iron (ZVS) supply on methane production from waste activated sludge
168	Fungal Pretreatment of Albizia Chips for Enhanced Biogas Production by Solid-State Anaerobic Digestion
169	Effects of thermal pretreatment on acidification phase during twophase batch anaerobic digestion of kichen
170	Effect of lipase addition on hydrolysis and biomethane production of Chinese food waste
171	Biogas production from wheat straw pre-treated with ligninolytic fungi and co-digestion with pig slurry
172	Dry anaerobic digestion of lignocellulosic and protein residues
173	Biomethane production and physicochemical characterization of anaerobically digested teff (<i>Eragrostis tef</i>)
174	Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production

175	Experimental and economical evaluation of bioconversion of forest residues to biogas using organosolv pretreatment
176	Process intensification in methane generation during anaerobic digestion of Napier grass using supercritical CO ₂ pretreatment
177	Thermo-acidic pretreatment of marine brown algae <i>Fucus vesiculosus</i> to increase methane production- a distillation process
178	The thermophilic (55 °C) microaerobic pretreatment of corn straw for anaerobic digestion
179	The effect of pressure and temperature pretreatment on the biogas output from algal biomass
180	Mild alkaline pre-treatments loosen fibre structure enhancing methane production from biomass crops and residues
181	Enhancement of sludge reduction and methane production by removing extracellular polymeric substances from waste activated sludge
182	Comparative performance of enzymatic and combined alkaline-enzymatic pretreatments on methane production from waste activated sludge
183	Alkaline pretreatment to enhance one-stage CH ₄ and two-stage H ₂ CH ₄ production from sunflower stalks
184	Enhancing methane production of corn stover through a novel way sequential pretreatment of potassium hydroxide and steam
185	Comparison and evaluation of concurrent saccharification and anaerobic digestion of Napier grass after pretreatment
186	Biomethane and Ethanol Production Potential of <i>Spirulina platensis</i> Algae and Enzymatically Saccharified Sugar Cane Bagasse
187	Alkaline-mechanical pretreatment process for enhanced anaerobic digestion of thickened waste activated sludge
188	Thermal hydrolysis integration in the anaerobic digestion process of different solid wastes Energy and economic analysis
189	The use of thermochemical pretreatments to improve the anaerobic biodegradability and biochemical methane potential of waste activated sludge
190	Methane production and microbial community structure for alkaline pretreated waste activated sludge
191	Fungal pretreatment by <i>Phanerochaete chrysosporium</i> for enhancement of biogas production from corn stover
192	Anaerobic digestion of microalgal biomass after ultrasound pretreatment
193	Enhancing volatile fatty acid (VFA) and bio-methane production from lawn grass with pretreatment
194	Effects of hydrothermal pretreatment of sugar beet pulp for methane production
195	Protease cell wall degradation of <i>Chlorella vulgaris</i> effect on methane production
196	Impacts of microalgae pre-treatments for improved anaerobic digestion Thermal treatment, thermal hydrolysis and enzymatic
197	Enhancing methane production from waste activated sludge using combined free nitrous acid and heat pre-treatment
198	Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods
199	Disintegration in the biogas sector- Technologies and effects
200	Combined electrical-alkali pretreatment to increase the anaerobic hydrolysis rate of waste activated sludge
201	Biogas Production from Poultry Slaughter House and Food Processing Wastes by Microwave Thermal Pretreatment
202	Asparagus stem as a new lignocellulosic biomass feedstock for anaerobic digestion Increasing hydrolysis rate
203	Effect of azithromycin on enhancement of methane production from waste activated sludge
204	Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste
205	Thermal steam explosion pretreatment to enhance anaerobic biodegradability of the solid fraction of pig manure
206	Methane production from marine microalgae <i>Isochrysis galbana</i>
207	Methane Potential and Enzymatic Saccharification of Steam- exploded bagasse
208	Effects of thermobarical pretreatment of cattle waste as feedstock for anaerobic digestion
209	Fungal pretreatment of yard trimmings for enhancement of methane yield from solid-state anaerobic digestion
210	Electropolar effects on anaerobic fermentation of lignocellulosic materials in novel single-electrode cells
211	Effect of ultrasound amplitude and reaction time on the anaerobic fermentation of chicken manure for biogas production
212	Impact of bioaugmentation on biochemical methane potential for wheat straw with addition of <i>Clostridium</i> sp.
213	Effects of mechanical treatment of digestate after anaerobic digestion on the degree of degradation

214	Enhancement of methane production in mesophilic anaerobic digestion of secondary sewage sludge by adva
215	Thermo-chemical pre-treatment to solubilize and improve anaerobic biodegradability of press mud
216	Long-term anaerobic digestion of microalgae grown in HRAP for wastewater treatment. Effect of microwav
217	Semi-continuous anaerobic co-digestion of cow manure and steam-exploded Salix with recirculation of liqu
218	Thermal pretreatment and hydraulic retention time in continuous digesters fed with sewage sludge Assessm
219	Inverted Phase Fermentation and Ultrasound Pre-treatments of Sewage Sludge Biochemical Methane Potent
220	Improved volatile fatty acid and biomethane production from lipid removed microalgal residue (LRUAR) th
221	Impact of pretreatment on solid state anaerobic digestion of yard waste for biogas production
222	Enhancing methane production of <i>Chlorella vulgaris</i> via thermochemical pretreatments
223	Screening pretreatment methods to enhance thermophilic anaerobic digestion of pulp and paper mill wastew
224	Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron
225	Effect of high pressure thermal pretreatment on <i>Chlorella vulgaris</i> biomass organic matter solubilisation and
226	Biomethane potential of wheat straw influence of particle size, water impregnation and thermal hydrolysis
227	Carbohydrate-enriched cyanobacterial biomass as feedstock for bio-methane production throught anaerobic
228	Reduced temperature hydrolysis at 134°C before thermophilic anaerobic digestion of waste activated sludge
229	Optimizing the thermophilic hydrolysis at 134°C before thermophilic anaerobic digestion of waste activated
230	Enhancing methane production from <i>U. lactuca</i> using combined anaerobically digested sludge (ADS) and ru
230	New fractionation for a better bioaccessibility description of particulate organic matter in a modified ADML
231	Increase in biogas production in anaerobic sludge digestion by combining aerobic hydrolysis and addition o
232	Influence of thermal pretreatment on the biochemical methane potential of wheat straw
233	Enhancement of biogas production from swine manure by a lignocellulolytic microbial consortium
234	Lime pretreatment to improve methane production of smooth cordgrass (<i>Spartina alterniflora</i>)
235	Effect of sodium hydroxide pretreatment on physical, chemical characteristics and methane production of fi
236	Improvement of methane production from waste paper by pretreatment with rumen fluid
237	Enhancement of waste activated sludge anaerobic digestion by a novel chemical free acid alkaline pretreatm
238	Sodium hydroxide pretreatment of ensiled sorghum forage and wheat straw to increase methane production
239	A comparison of different pre-treatments to increase methane production from two agricultural substrates
240	Characterization of <i>Cynara cardunculus</i> L. stalks and their suitability for biogas production
241	Influence of alkaline pre-treatment conditions on structural features and methane production from ensiled so
242	Pretreatment of Rice Straw by Hydrogen Peroxide for Enhanced Methane Yield
243	Improving methane production during the codigestion of waste-activated sludge and fatty wastewater Impac
244	Biochemical methane potential of raw and pre-treated meat-processing wastes
245	Evaluation of single vs. Staged mesophilic anaerobic digestion of kitchen waste with and without microwav
246	Benefit of sodium hydroxide pretreatment of ensiled sorghum forage on the anaerobic reactor stability and r
247	Biochemical methane potential of microalgae Influence of substrate to inoculum ratio, biomass concentratio
248	Biochemical methane potential of microalgae biomass after lipid extraction
249	Influence of pretreatment with Fenton's reagent on biogas pproduction and methane yield from lignocellulos
250	Enhanced methane production from wool textile residues by thermal and enzyme pretreatment
251	Improvement of biogas production from pine wood by alkali pretreatment

252	High pressure thermal hydrolysis as pre-treatment to increase the methane yield during anaerobic digestion
253	Free Nitrous Acid (FNA)-Based Pretreatment Enhances Methane Production from Waste Activated Sludge
254	Evaluation of pre-treatment processes for increasing biodegradability of agr-food wastes
255	Effect of different steam explosion conditions on methane potential and enzymatic saccharification of birch
256	Exploring strategies for seaweed hydrolysis Effect on methane potential and heavy metal mobilisation
257	Effects of hydrothermal pre-treatments on Giant reed (<i>Arundo donax</i>) methane yield
258	Thermo-oxidative pretreatment of municipal waste activated sludge for volatile sulfur compounds removal
259	The influence of the energy absorbed from microwave pretreatment on biogas production from secondary wastewater
260	Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial
261	Optimization of municipal sludge and grease co-digestion using disintegration technologies
262	Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production
263	Use of an automatic methane potential test system for evaluating the biomethane potential of sugarcane bagasse
264	Effects of thermo-chemical pre-treatment of grass silage on methane production by anaerobic digestion after
265	Co-digestion of dairy cattle slurry and industrial meat-processing by products- Effect of ultrasound and hygienization
266	Biological pretreatment applied to industrial organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW) Effect on
267	Enhanced methane production from ultrasound pre-treated and hygienized dairy cattle slurry
268	Performance of an Anaerobic Reactor Treating Poultry Abattoir Wastewater with High Fat Content After Enzymatic
269	Effects of lime pretreatment on biogas production from dry dairy cattle manure
270	Effects of thermal pre-treatments on solid slaughterhouse waste methane potential
271	Ultrasonic sludge disintegration for enhanced methane production in anaerobic digestion effects of sludge
272	Pretreatment of Chicken Feather Waste for Improved Biogas Production
273	Effect of Ultrasonic, Microwave and Combined Microwave-Ultrasonic Pretreatment of Municipal Sludge on
274	Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion
275	Combination of alkaline and microwave pretreatment for disintegration of meat processing wastewater sludge
276	Enhanced methane productivity from manure fibers by aqueous ammonia soaking pretreatment
277	Conductive heating and microwave hydrolysis under identical heating profiles for advanced anaerobic digestion
278	Effect of the N-Methylmorpholine-N-Oxide (NMMO) Pretreatment on Anaerobic Digestion of Forest Residues
279	Biogas production from wheat straw and manure — Impact of pretreatment and process operating parameters
280	Influence of temperature and pretreatments on the anaerobic digestion of wastewater grown microalgae in a
281	Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis
281	Methanogenic and carbon sequestration process facilitated by goethite and hematite in the presence of dissolved
282	Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production
283	Enhancing solubilisation and methane production kinetic of switchgrass by microwave pretreatment
284	The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge
285	Optimization of thermal-dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava
286	Bioconversion of industrial hemp to ethanol and methane The benefits of steam pretreatment and co-product
287	Enhancement of thermophilic anaerobic digestion of thickened waste activated sludge by combined microwave
288	Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to
289	Steam treatment of digested biofibers for increasing biogas production

290	Biological ensilage additives as pretreatment for maize to increase the biogas production
291	Ultrasonic pretreatment and subsequent anaerobic digestion under different operational conditions
292	Integrated Process for Ethanol, Biogas, and Edible Filamentous Fungi-Based Animal Feed Production from
293	Effect of hydraulic retention time on pretreatment of blended municipal sludge
294	Wet explosion of wheat straw and codigestion with swine manure Effect on the methane productivity
295	Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments
296	New Sludge Pretreatment Method to Improve Methane Production in Waste Activated Sludge Digestion
297	Alkaline solubilization and microwave irradiation as a combined sludge disintegration and minimization me
298	Anaerobic digestion of waste activated sludge pretreated by a combined ultrasound and chemical process
299	Effect of pre-treatments on hydrolysis and methane production potentials of by-products from meat-process
300	Ultrasonication as a Pre Treatment Method for the Enhancement of the Psychrophilic Anaerobic Digestion o
301	Thermal pretreatment of the solid fraction of manure impact on the biogas reactor performance and microbia
302	Feasibility of enhancing short-chain fatty acids production from sludge anaerobic fermentation at free nitrou
303	Methane production and solids destruction in an anaerobic solid waste reactor due to post-reactor caustic an
304	Improving anaerobic sewage sludge digestion by implementation of a hyper-thermophilic prehydrolysis step
305	BMP test on chemically pretreated sludge
306	Hydrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal waste
307	Anaerobic digestion of ozonized biosolids
308	Anaerobic digestion of excess activated sludge with ozone pretreatment, pdf
309	Effects of chemical and enzymatic treatments on the hydrolysis of swine wastewater
310	Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production
311	Influence of ultrasonication on anaerobic bioconversion of sludge
312	Application of acidic thermal treatment for one- and two-stage anaerobic digestion of sewage sludge
313	Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined
314	Evaluation of different pre-hydrolysis times and enzyme pool concentrations on the biodegradability of pou
315	Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal s
316	Different pretreatments for increasing the anaerobic biodegradability in swine manure
317	Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste
318	High-performance closed loop anaerobic digestion using pre post sludge ozonation
319	Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept
320	Biological treatment of chicken feather waste for improved biogas production
321	Effects of pre-treatment and bioaugmentation strategies on the anaerobic digestion of chicken feathers
322	Anaerobic digestion of municipal solid waste as a treatment prior to landfill
323	Combined mechanical enzymatic pretreatment for an improved substrate conversion when fermenting bioge
324	Optimal process configuration for anaerobic digestion with ozonation, pdf
325	Studies on Anaerobic Digestion Mechanism Influence of Pretreatment Temperature on Biodegradation of W
326	Temperature-Phased Biological Hydrolysis and Thermal Hydrolysis Pretreatment for Anaerobic Digestion F
327	Use of artificial neuronal networks for prediction of the control parameters in the process of anaerobic diges
328	Ultrasound assisted alkaline pre-treatment of sugarcane filter mud for performance enhancement in biogas p

329	Physical Pretreatment Methods for Improving Microalgae Anaerobic Biodegradability
330	Microbial biogas production from hydrolysis lignin insight into lignin structural changes
331	Anaerobic Co-digestion of Rice Straw and Soybean Straw to Increase Biogas Production by Pretreatment w
332	Influence of different thermal pretreatments and inoculum selection on the biomethanation of sugarcane bag
333	Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Materials using ethanol-organosolv pretreatment
334	Effect of hydrothermal and Ca(OH) ₂ pretreatments on anaerobic digestion of sugarcane bagasse for biogas p
335	Electrohydrolysis pretreatment for enhanced methane production from lignocellulose waste pulp and paper m
336	Pretreatment with rumen fluid improves methane production in the anaerobic digestion of paper sludge
337	Assessment of Methods to Pretreat Microalgal Biomass for Enhanced Biogas Production
338	Assessing the Effect of Pretreatments on the Structure and Functionality of Microbial Communities for the I
339	Biochemical and microbial changes reveal how aerobic pre-treatment impacts anaerobic biodegradability of
340	Hydrothermal post-treatment of digestate to maximize the methane yield from the anaerobic digestion of mi
341	Combined effects of thermal pretreatment and increasing organic loading by co-substrate addition for enhan
342	Hydrothermal pretreatment on the anaerobic digestion of washed vinegar residue
343	Anaerobic biodegradability test of water hyacinth after microbial pretreatment to optimise the ideal F
344	Improvement of anaerobic biodegradability of organic fraction of municipal solid waste by mechanical and
345	How does free ammonia-based sludge pretreatment improve methane production from anaerobic digestion o
346	Comparison of Different Pretreatments of Rice Straw Substrate to Improve Biogas Production
347	Effect of pretreatment solutions and conditions on decomposition and anaerobic digestion of lignocellulosic
348	Effect of thermal pretreatment at 70 °C for one hour (EU hygienization conditions) of various organic waste
349	Enhancing energy production from waste textile by hydrolysis of synthetic parts
350	Evaluation of anaerobic digestion of food waste and waste activated sludge Soluble COD versus its chemica
351	Thermal, Alkali And Thermo-Alkali Pretreatments Applied On Monospecific Microalgal Biomass To Impro
352	The impact of pretreatment and inoculum to substrate ratio on methane potential of organic wastes from var
353	Enhancing methane production from lignocellulosic biomass by combined steam-explosion pretreatment an
354	Pre-separation of ammonium content during high solid thermal-alkaline pretreatment to mitigate ammonia i
355	Enhancement of methane production by addition of Clostridium thermocellum in the anaerobic digestion of
356	Effects of newly prepared alkaline ferrate on sludge disintegration and methane production Reaction mechan
357	Biomethane potential from sugarcane straw in Veracruz, Mexico: Combined liquid hot water pretreatment a
358	Insights into anaerobic transformation of key dissolved organic matters produced by thermal hydrolysis slud
359	Effect of pretreatments on biogas production from microalgae biomass grown in pig manure treatment plant
360	Dual-frequency ultrasound combined with alkali pretreatment of corn stalk for enhanced biogas production
361	Efficient ethanol production from kitchen and garden wastes and biogas from the residues
362	Combined low thermal alkali addition and mechanical pre-treatment to improve biogas yield from wheat str
363	Understanding the impact of cationic polyacrylamide on anaerobic digestion of waste activated sludge.pdf
364	Solubilization of Organics Due to Thermal Hydrolysis Pretreatment and the Shift in Microbial Population in
365	Influence on anaerobic digestion by intermediate thermal hydrolysis of waste activated sludge and co-digest
366	Zero valent iron enhances methane production from primary sludge in anaerobic digestion
367	Energy balance, greenhouse gas emissions, and profitability of thermobarical pretreatment of cattle waste in

368	Pretreatment and Anaerobic Co-digestion of Selected PHB and PLA Bioplastics
369	Anaerobic Digestion of Cattle Manure Influenced by Swirling Jet Induced Hydrodynamic Cavitation
370	Roles of magnetite and granular activated carbon in improvement of anaerobic sludge digestion
371	Codigestion of High Pressure Thermal Hydrolysis-Treated Thickened Waste Activated Sludge with Primary
372	Biochemical methane potential from sewage sludge
373	Ethanol prefermentation of food waste in sequencing batch methane fermentation for improved buffering ca
374	Pretreatments to Enhance the Anaerobic Biodegradability of Chlorella Protothecoides Algal Biomass
375	Enhancing Biogas Production from Lime Soaked Corn Cob Residue
376	Enhancement of methane production from Cotton Stalk using different pretreatment techniques
377	Enhanced Biogas Production in the Duckweed Anaerobic Digestion Process
378	Enhanced Methane Production from Food Waste Using Cysteine To Increase Biotransformation of L-Mono
379	Effect of surfactant assisted sonic pretreatment on liquefaction of fruits and vegetable residue
380	New insights into the enhanced performance of high solid anaerobic digestion with dewatered sludge by the
381	Stimulation of methane yield rate from food waste by aerobic pre-treatment

8.4 Planilha de coleta de dados com descrição dos pré-tratamentos

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Paper	Year	1 st Author	Organic substrate (OS) specific	Organic substrate (OS) general standings	Classification	Characterization OS	Place (OS and inoculum) specific	Place (Substrate)	Inoculum	Reactors type	Temperature (°C)	Stirring (rpm)	Time (days)
Paper	Year	1 st Author	Organic substrate (OS)	Organic substrate (OS) general	Classification	Characterization OS	Place (OS and inoculum) specific	Place (Substrate)	Inoculum	Reactors type	Temperature (°C)	Stirring (rpm)	Time (days)
				animal waste	Cellulose		Europe	Europe	Batch	Batch			
				agriculture waste	Lignocellulose		Asia	North America	Batch	CSTR = Continuous Stirred Tank Reactor semicontinuous anaerobic digesters			
				food waste	Lignin		North America	South America					
				algae	Protein		Africa						
				plant (aouatic)	Lipid		Oceania						
				codization									
				sludge waste									
				industrial waste				Central America					
Q	P	Q	R	S	T	U	V	W					
Pre-treatment description	Pre-treatment general standings	Treatments (specific descriptions)	Methane yield (average)	Methane yield (± stand.dev.)	Unit (Methane)	Calculation % Methane Yield compared with Control	In(R) with formula	In(R) without formula					
	Control												
	Chemical												
	Biological												
	Physical												
	Chemical+Physical												
	Physical+Physical												
	Chemical+Biological												
	Physical+Biological												
	Chemical+Chemical												
Pre-treatment description	Pre-treatment general standings	Treatments (specific descriptions)	Methane yield (average)	Methane yield (± stand.dev.)	Unit (Methane)	Calculation % Methane Yield compared with Control	Response ratio (Ln(R))	InRR					
Untreated	Control	R0= control	36		L/g VS								
Bioaugmentation of anaer	Biological	R1= 5% (v/v): Rumen fungi (Or	38		L/g VS		0,054067221	0,054067221					
Bioaugmentation of anaer	Biological	R2= 15% (v/v): Rumen fungi (O	60		L/g VS		0,510825624	0,510825624					
Bioaugmentation of anaer	Biological	R3= 20% (v/v): Rumen fungi (O	57		L/g VS		0,459532329	0,459532329					
Untreated	Control	Control (34g/L COD)	249		mL/g VS								
Heat	Physical	(121 ^o C for 120 min, pH=7) (34g	291		mL/g VS		0,155870371	0,155870371					
Autoclave	Physical+Physical	(5 min at 121 ^o C and 5 psi, pH=	332		mL/g VS		0,287682072	0,287682072					
Alkali+Heat	Chemical+Physical	(0,6ml of 6N NaOH, 121 ^o C for 1	258		mL/g VS		0,035506688	0,035506688					
untreated	Control	Control (34g/L COD + Enhance	180		mL/g VS								
Heat	Physical	(121 ^o C for 120 min, pH=7) (34g	290		mL/g VS		0,476924072	0,476924072					
Autoclave	Physical+Physical	(5 min at 121 ^o C and 5 psi, pH=	356		mL/g VS		0,68197388	0,68197388					
Alkali+Heat	Chemical+Physical	(0,6ml of 6N NaOH, 121 ^o C for 1	208		mL/g VS		0,144581229	0,144581229					
Untreated	Control	Control (19 g/L COD)	223		mL/g VS								
Heat	Physical	(121 ^o C for 120 min, pH=7) (19 g	393		mL/g VS		0,56663784	0,56663784					
Autoclave	Physical+Physical	(5 min at 121 ^o C and 5 psi, pH=	398		mL/g VS		0,579280234	0,579280234					