

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE PESQUISAS E ESTUDOS EM AGRONEGÓCIOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS

**TECNOLOGIAS PARA A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA
AGROPECUÁRIA BRASILEIRA NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA
CIRCULAR**

DIEGO DURANTE MÜHL

Porto Alegre, RS

2022

DIEGO DURANTE MÜHL

**TECNOLOGIAS PARA A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA
AGROPECUÁRIA BRASILEIRA NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA
CIRCULAR**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronegócios.

Orientadora: Profa. Dra. Letícia de Oliveira

Porto Alegre, RS

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Mühl, Diego

TECNOLOGIAS PARA A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA
AGROPECUÁRIA BRASILEIRA NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA
CIRCULAR / Diego Mühl. -- 2022.

90 f.

Orientadora: Letícia de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Centro de Estudos e Pesquisas em
Agronegócios, Programa de Pós-Graduação em
Agronegócios, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Bioeconomia. 2. Digestão Anaeróbica. 3. Economia
Circular. 4. Energia Renovável. 5. Fertilizantes. I.
de Oliveira, Letícia, orient. II. Título.

DIEGO DURANTE MÜHL

**TECNOLOGIAS PARA A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA
AGROPECUÁRIA BRASILEIRA NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA
CIRCULAR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronegócios.

Orientadora: Profa. Dra. Letícia de Oliveira

BANCA EXAMINADORA

Dra. Letícia de Oliveira (UFRGS)

Orientadora

Dra. Ângela Rozane Leal de Souza (UFRGS)

Dr. Edson Talamini (UFRGS)

Dr. Lucas Veiga Ávila (UFSM)

Porto Alegre, RS

2022

*A todas as pessoas que, antes de
mais nada, querem tornar esse
mundo um lugar melhor para se
viver.*

AGRADECIMENTOS

Devemos muito mais aos outros do que a nós mesmos pelo que realizamos. Cada oportunidade, cada realização, só é possível porque uma série de fatores, sonhos e esforços permitiram que nesse momento isso acontecesse. Assim, em toda a história ninguém poderá se vangloriar, pois nem um rei, nem uma celebridade, nenhum grande empresário ou quem quer que seja trilhou seu caminho sozinho. Na verdade, essas pessoas sempre foram carregadas nos ombros de outros.

Agradeço à minha família pelo apoio. Cada pequeno gesto de compreensão, dedicação e esforço da minha família possibilitou que este projeto fosse realizado.

Agradeço a minha orientadora Dra. Leticia de Oliveira pelo suporte prestado. Sou muito grato pela orientação, pelas ideias, *insights* e por todo o apoio que possibilitou a realização desse trabalho. Agradeço aos demais professores e pessoas do CEPAN que foram sempre prestativos e tiveram um papel importante na realização do nosso trabalho.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por me conceder uma bolsa de estudos que ao longo do mestrado me permitiu realizar todas as minhas pesquisas, publicações e participações em eventos.

“Só há um tempo em que é fundamental despertar. Esse tempo é agora.”

Siddhartha Gautama 566 a. C – 486 a.C

LISTA DE ABREVIACES

°C – Graus celsius

ABC – Agricultura de Baixo Carbono

AD – Anaerobic Digestion

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH₄ - Metano

Cibiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis

CO - Monóxido de carbono

CO₂ - Gás carbônico

Cu – Cobre

GNP – Gross Domestic Product

GW – Gigawatt

H₂ - Hidrognio

H₂O – gua

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

K – Potassium

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MPa – Mega Pascal

N – Nitrogênio

N₂O – xido nitroso

NH₃ - Amnia

Nm³ – Normal metro cúbico

P - Phosphorus

Pb – Chumbo

PIB – Produto Interno Bruto

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

R² – Coeficiente de determinação

SciMAT – Science Mapping Analysis software Tool

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VOS – Visualization of similaritie

WTS – Municipal Waste Treatment Plants

Zn - Zinco

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIAS PARA A ECONOMIA CIRCULAR NA AGROPECUÁRIA

Figura 1: Etapas de acordo com o protocolo PRISMA.....	34
Figura 2: Análise Longitudinal de Coocorrência de Palavras-chave.....	37
Figura 3: Tecnologias para a valorização de resíduos de acordo com o número de ocorrências de palavras-chave.....	38

CAPÍTULO 3 - FEATURES OF ANAEROBIC DIGESTION PLANTS IN THE BRAZILIAN AGRICULTURAL SECTOR

Figure. 1: World map highlighting Brazil.....	57
Figure. 2: The annual biogas productions along with the average, upper limit and lower limit	59
Figure 3: Percentage comparison between AD units by category and biogas produced.....	61
Figure 4: Average annual biogas production of the different categories.....	62
Figure 5: Distribution of AD plants according to their biogas production capacity.....	63
Figure 6: Growth of anaerobic digestion plants in Brazil's agricultural and livestock sector. .	65
Figure 7: Number of anaerobic digestion plants in Brazil by region.....	67
Figure 8: Percentages of anaerobic digestion units and biogas production per state in relation to the total across Brazil.....	68
Figure 9: Average biogas production of the grouped units by the application technology.....	70

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIAS PARA A ECONOMIA CIRCULAR NA AGROPECUÁRIA

Tabela 1: Informações Gerais do Conjunto de Artigos.....	35
Tabela 2: Os 10 artigos mais citados com número de citações, primeiro autor, ano e revista da publicação.....	36
Tabela 3: Classificação das Tecnologias para Valorização de Resíduos de Acordo com sua Natureza.....	44

CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIAS PARA A ECONOMIA CIRCULAR NA AGROPECUÁRIA

Table 1: Variables and categories of the database.....	58
Table 2: Characteristics of the anaerobic digestion plants removed from the database.....	60
Table 3: Sizes of the agricultural AD plants.....	63
Table 4: Applications of biogas from agriculture and livestock waste.....	69

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
1.1 INTRODUÇÃO.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA.....	20
1.3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
1.3.2 Bioeconomia e Economia Circular.....	22
1.3.3 Tecnologias de Gestão de Resíduos na Agropecuária.....	24
1.4 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA.....	28
2. TECNOLOGIAS PARA A ECONOMIA CIRCULAR NA AGROPECUÁRIA.....	30
2.1 INTRODUÇÃO.....	32
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
2.3.1 Digestão Anaeróbica.....	39
2.3.2 Compostagem e Vermicompostagem.....	40
2.3.3 Microalgas e Algas.....	41
2.3.4 Pirólise, Combustão, Incineração e Carbonização Hidrotérmica.....	41
2.3.5 Biossíntese e Fotobiorreator.....	42
2.3.6 Biorrefinaria.....	43
2.3.7 Soluções Biológicas e Térmicas.....	43
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
2.5 REFERÊNCIAS.....	46
3. FEATURES OF ANAEROBIC DIGESTION PLANTS IN THE BRAZILIAN AGRICULTURAL SECTOR.....	53
3.1 INTRODUCTION.....	55
3.2 METHODOLOGY.....	57
3.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	60
3.3.1 Biogas production in Brazil.....	60
3.3.2 AD plants of Brazil's agriculture and livestock sector.....	63
3.3.3 The growing number of AD plants in the farming sector.....	64
3.3.4 Regional unit distribution.....	67

3.3.5 Biogas application	69
3.4 CONCLUSIONS.....	71
3.5 REFERENCES.....	73
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
4.1 CONCLUSÃO.....	79
5. REFERENCIAS	82

RESUMO

Entre as discussões sobre sustentabilidade, tentativas de produzir materiais e combustíveis alternativos, está o desafio da agropecuária, que é produzir mais alimentos consumindo menos recursos naturais. A agropecuária é uma atividade que pode causar impactos ambientais, especialmente devido à grande produção de resíduos orgânicos. Em todo o mundo pesquisadores buscam soluções para minimizar os impactos ambientais das atividades agrícolas, isso resulta numa série de soluções capazes de agregar valor aos resíduos da agropecuária. Porém, os estudos realizados no Brasil sobre o assunto estiveram focados em aspectos técnicos ou em estimativas do potencial de produção de energia por meio das tecnologias de gestão de resíduos. Para sanar essa lacuna de pesquisa esse estudo identificou as principais tecnologias que podem ser aplicadas para a valorização de resíduos agropecuários e verificou como uma dessas soluções está se desenvolvendo na agropecuária do Brasil. A metodologia se baseou na análise bibliométrica e estatística descritiva. Com uma revisão bibliométrica determinamos que a digestão anaeróbica é a tecnologia mais estudada no mundo para a valorização de resíduos agropecuários; Com a análise estatística descritiva apresentamos as principais características das unidades e o desenvolvimento da digestão anaeróbica no Brasil. As plantas de digestão anaeróbia em operação aumentaram exponencialmente de 2003 a 2020. Cerca de 79% das plantas de digestão anaeróbia no Brasil usam resíduos agrícolas e pecuários, mesmo assim as plantas do setor agrícola produzem apenas 11% do biogás total; 31% dessas plantas produzem entre 150.000 e 200.000 Nm³/biogás por ano e 78% produzem menos de 500.000 Nm³/biogás por ano. Cerca de 89% de todas as plantas de digestão anaeróbica do setor agropecuário produzem energia elétrica. Estudos futuros poderão estar focados no desenvolvimento de soluções tecnológicas adequadas as necessidades das propriedades rurais, é fundamental desenvolver soluções tecnológicas economicamente mais atrativas para as pequenas escalas de biomassa, esse pode ser um fator importante para a popularização das tecnologias de gestão de resíduos no setor agrícola do Brasil. As tecnologias para a valorização de resíduos tem grande potencial para ajudar no desenvolvimento da economia circular e bioeconomia na agropecuária brasileira à medida que são capazes de substituir combustíveis fósseis e fertilizantes minerais.

Palavras-chave: Bioeconomia. Digestão Anaeróbica. Economia Circular. Energia. Fertilizantes.

ABSTRACT

Among the discussions about sustainability, attempts to produce alternative materials and fuels, is the challenge of agriculture, which is to produce more food while consuming fewer natural resources. Agriculture is an activity that can cause environmental impacts, especially due to the large production of organic waste. All over the world, researchers are looking for solutions to minimize the environmental impacts of agricultural activities, resulting in a series of solutions capable of adding value to agricultural residues. However, studies carried out in Brazil on the subject were focused on technical aspects or estimates of the potential for energy production through waste management technologies. To address this research gap, this study identified the main technologies that can be applied for the recovery of agricultural waste and verified how one of these solutions is developing in agriculture in Brazil. The methodology was based on bibliometric analysis and descriptive statistics. With a bibliometric review, we determined that anaerobic digestion is the most studied technology in the world for the valorization of agricultural residues; With descriptive statistical analysis, we present the main characteristics of the units in Brazil. Operating anaerobic digestion plants increased exponentially from 2003 to 2020. About 79% of anaerobic digestion plants in Brazil use agricultural and livestock residues, yet plants in the agricultural sector produce only 11% of the total biogas; 31% of these plants produce between 150,000 and 200,000 Nm³/biogas per year and 78% produce less than 500,000 Nm³/biogas per year. About 89% of all anaerobic digestion plants in the agricultural sector produce electricity. Future studies should focus on the development of technological solutions suited to the needs of rural properties, it is essential to develop technological solutions that are more economically attractive for small-scale biomass, this is an important factor for the popularization of waste management technologies in the agricultural sector of Brazil. Technologies for waste recovery have great potential to help in the development of the circular economy and bioeconomy in Brazilian agriculture as they may replace fossil fuels and mineral fertilizers.

Keywords: Anaerobic digestion. Bioeconomy. Circular Economy. Energy. Fertilizers.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 INTRODUÇÃO

Alguns estudos discutem limites para o crescimento populacional e econômico, pois há forte consenso de que os recursos naturais que os humanos dispõem são limitados (KARSTEN, 1972; MALTHUS, 2018; MEADOWS et al., 1972; SOBY, 2017; SONG, 1972; WALTER, 2019). Além disso, o ser humano divide o planeta com outras espécies e precisa garantir a sobrevivência destas para assegurar a sua própria continuidade (COSTANZA et al., 1997; KREMEN; MILES, 2012). Assim, emergem conceitos como sustentabilidade, economia circular e bioeconomia (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; MCCORMICK; KAUTTO, 2013; TILMAN et al., 2001; ZHAI; SHANGJIE, 2010; ZHANG, Y., 2014).

Em meio a essa questão está a agropecuária. Para exemplificar essa dinâmica, observa-se a discussão sobre a sustentabilidade da agricultura, as tentativas de produzir materiais e combustíveis alternativos, os métodos para tratamento e reaproveitamento de resíduos e os materiais que outrora eram descartados (CHISTI, 2007; FOLEY et al., 2011; KHOSHNEVISAN et al., 2021; RAGAUSKAS et al., 2006; TILMAN et al., 2002).

A agropecuária é uma atividade desenvolvida pelo ser humano há cerca de 10.000 anos, compreendendo o cultivo de plantas e a criação de animais. A partir dela, o ser humano transformou diversos ecossistemas naturais originais em ecossistemas cultivados. A criação de animais e plantas é uma prática em que o ser humano age no meio e no modo de vida de outras espécies (plantas e animais), favorecendo o desenvolvimento e aumentando a valência ecológica da espécie cultivada (MAZOYER; ROUDART, 2010).

No Brasil, a agropecuária é uma atividade de destaque para a economia. O agronegócio foi responsável por 21,4% do Produto Interno Bruto do Brasil (PIB) em 2019, a soma de bens e serviços chegou a R\$ 1,55 trilhão. O valor bruto da produção agropecuária atingiu R\$ 651,5 bilhões, sendo R\$ 400,7 bilhões da produção agrícola e R\$ 250,8 bilhões da produção pecuária. Sendo assim, o ramo agrícola é uma das principais bases da economia do País, responsável pelo equilíbrio da balança comercial (CNA, 2020). Em 2020, o PIB do agronegócio brasileiro representou 26,6% do PIB brasileiro, a soma de bens e serviços chegou próximo a R\$ 2 trilhões (CEPEA, 2021).

Devido ao tamanho de sua agropecuária, o Brasil produz significativa quantidade de resíduos orgânicos. A maioria dos resíduos agrícolas são de natureza orgânica: madeira, bagaço de cana-de-açúcar, dejetos de animais, cascas de frutas, restos de animais mortos e vegetais. O excesso de resíduos é um problema ambiental, mas pode ser uma grande

oportunidade de produção de energia, fertilizantes e outros materiais a partir de biomassa residual (KHOSHNEVISAN et al., 2021; RIBEIRO et al., 2018; SALOMON; SILVA LORA, 2009). Assim, quando não há uma correta gestão de resíduos, a agropecuária pode causar impactos ambientais significativos, contaminando os solos, a água e o ar (DE VRIES; DE BOER, 2010; FOLEY et al., 2011; KOLPIN et al., 2002; WANG, Y.; LI, 2009). O uso de recursos escassos como terra e água, substâncias presentes nos fertilizantes agrícolas como o fósforo (P) e o nitrogênio (N) e grandes concentrações de animais podem gerar riscos de contaminação das águas, do ar e do solo, facilitando a proliferação de doenças infecciosas e contribuindo para o aquecimento global (DE VRIES; DE BOER, 2010; FAN et al., 2021; H. STEINFELD et al., 2006; WANG, Y.; LI, 2009).

Visando a mitigação dos impactos ambientais da agropecuária, alguns estudos exploram o potencial e a viabilidade de sistemas e de tecnologias capazes de agregar valor aos resíduos agropecuários. Reaproveitar e produzir energia e materiais alternativos a partir de resíduos são algumas das alternativas para reduzir os impactos ambientais dessa atividade (DIACONO et al., 2019; DUQUE-ACEVEDO et al., 2020; KHOSHNEVISAN et al., 2021; MAGHANAKI et al., 2013; PALERMO; D'AVIGNON; FREITAS, 2014).

Essa tendência está de acordo com os conceitos de economia circular e bioeconomia. Esses conceitos buscam estabelecer um modelo econômico propositalmente desenhado para minimizar o desperdício de recursos sob a premissa de que a economia e o meio ambiente devem coexistir em equilíbrio e de que os recursos naturais são um insumo fundamental para o ciclo econômico. O planeta Terra é visto como um sistema fechado com determinada capacidade regenerativa que deve ser entendida e administrada visando a sobrevivência humana e de outros animais e espécies, preservando-as (ARANDA-USÓN *et al.*, 2020; PEARCE; TURNER, 1990; RAINE; FOSTER; POTTS, 2006).

Atualmente, a digestão anaeróbica, a gaseificação, a combustão e a liquefação hidrotérmica são alguns exemplos de tecnologias que podem ser usadas para produzir energia a partir da biomassa de resíduos. Outras tecnologias que não produzem energia diretamente são a compostagem, a vermicompostagem, a carbonização pirolítica e a carbonização hidrotérmica, que são métodos para transformar resíduos em fertilizantes orgânicos (KHOSHNEVISAN et al., 2021). O potencial de diminuição de impactos ambientais e produção de energia a partir dessas tecnologias é estudado no Brasil, Estados Unidos, China, Irã e em outros países (HUA et al., 2014; MAGHANAKI et al., 2013; MURRAY; GALIK; VEGH, 2017; RIBEIRO et al., 2016; SALOMON; SILVA LORA, 2009).

Dentre essas tecnologias, a digestão anaeróbica é uma das soluções mais antigas e simples do ponto de vista operacional. O tratamento de lamas de obras, de esgotos e de águas residuais pelo processo anaeróbico é registrado desde o início dos anos 1900, mas ultimamente começou a ser visto como possibilidade de suprimento alternativo de energia em vez de um mero método de tratamento de resíduos para evitar impactos ambientais (ALICH JR., 1976; ANTONIOU et al., 2019; GRUNBAUM, 1978; KOKOROPOULOS; BENGTSON, 1978; SMITH et al., 2008; SONODA, 1976).

As tecnologias de tratamento de resíduos podem ser usadas em grandes plantas de produção, como biorrefinarias de geração de biocombustíveis, para substituir combustíveis fósseis, porém, seu uso também é comum em pequenas escalas de produção. Essas tecnologias podem ser implementadas nas propriedades rurais para geração de biogás, energia elétrica, energia térmica e outros tipos de energia (PALALLO; ARDI; YUSUF, 2018; PARRALEJO et al., 2019).

Alguns estudos apontam o potencial do Brasil em produzir energia a partir da tecnologia de digestão anaeróbica. Em 2009, foi estimado o potencial de produção elétrica a partir de resíduos orgânicos da indústria sucroalcooleira (vinhaça), dos resíduos sólidos e líquidos urbanos (lixo e esgoto) e dos resíduos pecuários (esterco bovino e suíno). Cerca de 1,05 até 1,13 GW (gigawatt) poderiam ser produzidos segundo a metodologia adotada para o cálculo (SALOMON; SILVA LORA, 2009). Outro estudo publicado em 2018 estimou o potencial brasileiro de produção de biogás com a tecnologia de digestão anaeróbica a partir de resíduos de estações de tratamento em aterros sanitários, indústrias de cana-de-açúcar, dejetos animais e estações de tratamento de esgotos (SILVA DOS SANTOS et al., 2018).

O potencial de produção de biogás para o ano de 2015 variou entre 200.000 e 312.000 Mm³/ano (milhões de normal metros cúbicos por ano) (SILVA DOS SANTOS et al., 2018). Se esse valor for convertido para energia elétrica, ele corresponde a uma potência instalada de 4,5 até 6,9 GW ou cerca de 4,9% de toda a capacidade instalada de energia elétrica do Brasil (SILVA DOS SANTOS et al., 2018). Nesse sentido, o uso de tecnologias para valorizar resíduos agropecuários torna-se uma grande oportunidade para a promoção da bioeconomia circular nas propriedades rurais. Todavia, quais soluções existem atualmente para valorizar resíduos agropecuários e como essas soluções estão se desenvolvendo no Brasil são lacunas de pesquisa que merecem ser estudadas. Para ilustrar, podemos pensar em algumas questões: quais tecnologias podem ser usadas para valorizar resíduos agrícolas? Qual o potencial dessas tecnologias para a bioeconomia e para a economia circular? Quanto desse potencial é

explorado atualmente? Quanto está subutilizado? Que tipos de substratos são tratados? Qual é o porte dessas unidades? Qual a aplicação da energia produzida? De que forma o uso de tecnologias como a digestão anaeróbica representa uma nova fronteira de valor para agropecuária?

O setor agropecuário tem grande propensão para a bioeconomia e economia circular, e o desenvolvimento de tecnologias para a gestão de resíduos tem papel fundamental no avanço desse potencial. Assim, para resolvermos algumas das questões supracitadas, elaboramos uma análise bibliométrica sumarizando as tecnologias mais estudadas pelos pesquisadores no mundo. Em seguida, evidenciamos a principal dentre elas e procuramos compreender como esta vem se adequando à realidade da agricultura brasileira conforme os objetivos gerais e específicos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Identificar as principais tecnologias que podem ser aplicadas para a valorização de resíduos agropecuários e verificar como a solução mais frequente está se desenvolvendo no Brasil.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1 Definir quais são as principais tecnologias que podem ser aplicadas na valorização de resíduos agrícolas;
- 2 Apresentar o desenvolvimento e o estado atual da principal tecnologia para valorização de resíduos no contexto da agropecuária do Brasil;

O tema é muito amplo, existem diversas rotas tecnológicas para agregar valor aos resíduos agrícolas, por isso trabalhamos com metodologia e limites bem estabelecidos. É preciso destacar que a dissertação de mestrado deve ser um estudo teórico, de natureza reflexiva, com ordenação, interpretação de dados e metodologia científica específica. Entretanto deve-se considerar às limitações de tempo que restringem a extensão desse tipo de estudo (LAKATOS; MARCONI, 2017).

Para realizar o primeiro objetivo foi desenvolvida uma revisão bibliométrica que resultou no artigo apresentado no capítulo 2. Após definir a tecnologia mais comum no meio científico foi desenvolvida uma análise estatística descritiva que resultou no artigo apresentado no capítulo 3.

1.3 JUSTIFICATIVA

A possibilidade de agregar valor aos resíduos é uma estratégia para viabilizar tecnologias capazes de reduzir os impactos ambientais, gerar inovação e novas fontes de receita para o agronegócio. Neste sentido, identificar as tecnologias que podem ser aplicadas para a gestão de resíduos agrícolas da agropecuária brasileira torna-se relevante, uma vez que essas práticas reduzem os impactos gerados por esses resíduos. Além disso, precisamos conhecer a realidade desse setor no Brasil para propor iniciativas de fomento, financiamento e soluções tecnológicas adequadas para a realidade da agropecuária do Brasil.

Tomamos como exemplo a digestão anaeróbica uma tecnologia explorada e bastante conhecida em todo o mundo. A viabilidade desse sistema de tratamento de resíduos para a geração de energia e fertilizantes é testada, com resultados promissores por diversos estudos (DUQUE-ACEVEDO et al., 2020; FREITAS et al., 2019; KHOSHNEVISAN et al., 2021; SARASWAT et al., 2019; VILLA et al., 2020; ZEA FERNANDEZ et al., 2020). Na Alemanha, por exemplo, a produção de biogás no setor agrícola acontece, frequentemente, em instalações de pequena e média escala, nas próprias fazendas. Na maioria das vezes o biogás é transformado em energia elétrica para consumo local e a energia excedente é adicionada à rede elétrica, formando um sistema de cogeração distribuído (DANIEL-GROMKE et al., 2018). Já no Brasil não sabemos ao certo como essa tecnologia está se desenvolvendo no setor agrícola.

Em todo o mundo cerca de 75% das terras agrícolas são dedicadas a agropecuária (FOLEY et al., 2011). Se existem tecnologias com potencial de reduzir a contaminação de solos, água e ar (KHOSHNEVISAN et al., 2021; SILVA DOS SANTOS et al., 2018); Se aproximadamente 26,6% do PIB Brasil é produzido pela agropecuária (CEPEA, 2021); Se aproximadamente 4,9% da matriz elétrica do país pode ser suprida pela biomassa de resíduos agrícolas (SILVA DOS SANTOS et al., 2018). Então, é necessário, conhecer melhor essas soluções para propor novas fronteiras de geração de valor, discutir possibilidades, estratégias e propor meios de inovação e fomento.

Além disso, considerando que existem estimativas que comprovam o potencial de produção de energia no Brasil a partir da biomassa de resíduos, como apresentado nos estudos em 2009 e 2018 (SALOMON; SILVA LORA, 2009; SILVA DOS SANTOS et al., 2018) podemos inferir que essas tecnologias têm potencial para diversificar a matriz energética brasileira. Os esforços atuais para mitigar os impactos ambientais e desenvolver fontes de energia renováveis, podem ser alavancados por essas tecnologias. No setor agrícola essas

soluções podem mitigar diversos impactos ambientais, gerar energia e recursos alternativos. Logo, este estudo justifica-se pela necessidade de compreender quais tecnologias podem ser usadas para a gestão de resíduos na agropecuária, especialmente precisamos compreender como essas soluções estão se desenvolvendo na agropecuária do Brasil, esse é um passo estratégico e fundamental para a promoção da bioeconomia circular no setor agrícola brasileiro.

1.3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em 1972, foram desenhados alguns cenários desafiadores para a sustentabilidade global baseados nas variáveis população, produção de alimentos, produção industrial, poluição e consumo de recursos naturais não renováveis (MEADOWS *et al.*, 1972). Devido aos limites desses recursos, o modelo econômico de crescimento contínuo baseado no aumento do consumo de recursos começa a ser questionado e precisa ser repensado (TURNER, 2008).

Um predicado da sustentabilidade é a aceitação dos limites do crescimento, porém, mais importante do que isso, é uma atitude de planejamento racional frente a essas limitações. Assim, a preocupação com a sustentabilidade é também uma espécie de planejamento que leve em consideração o bem-estar das futuras gerações (SOBY, 2017; TOLBA; BISWAS, 1991).

Quando se considera a complexa ecologia na qual o ser humano está inserido, essa preocupação se estende também a outras espécies. Garantir o funcionamento ecossistêmico e a sobrevivência de outras diversas espécies é uma condição fundamental para a existência humana (COSTANZA *et al.*, 1997; KREMEN; MILES, 2012).

A própria atividade agropecuária, agricultura e criação de animais, é a prova de que o ser humano precisa garantir a subsistência de outras espécies. Nela, o ser humano transforma os ecossistemas naturais originais em cultivados para aumentar a valência ecológica de outras espécies. Valência ecológica, entendida como potencial de desenvolvimento de uma espécie ou capacidade de uma espécie ocupar meios variados, é a extensão que uma espécie é capaz de ocupar e a densidade da sua população (MAZOYER; ROUDART, 2010). A criação de animais e plantas é uma atividade em que o ser humano age no meio e no modo de vida de outras espécies. Há 10.000 anos, quando se deu início à agricultura e à criação de animais, o ser humano estava aumentando a valência ecológica de espécies cultivadas visando ampliar a sua própria (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Por isso, atualmente cresce na humanidade um senso de responsabilidade relacionado ao consumo de recursos e preservação da biodiversidade. É preciso utilizar materiais, energia e recursos de uma maneira inteligente, com eficiência, sem causar desequilíbrio ambiental ou ecológico e garantindo as condições para a continuidade da vida. Alcançar uma harmonia entre economia, meio ambiente e sociedade torna-se uma necessidade e um grande desafio (MCCORMICK; KAUTTO, 2013; TILMAN *et al.*, 2002; ZHAI; SHANGJIE, 2010). Em contraponto ao modelo econômico de produção-consumo-descarte, são elaborados os conceitos de economia circular e bioeconomia.

1.3.2 Bioeconomia e Economia Circular

Na economia circular, a economia e o meio ambiente devem coexistir em equilíbrio, pois os recursos naturais fornecem os insumos para o ciclo econômico. Sob a perspectiva da economia circular, o planeta Terra é visto como um sistema fechado com determinada capacidade regenerativa. Assim, os resíduos do processo produtivo não devem exceder a capacidade regenerativa desse sistema (ARANDA-USÓN *et al.*, 2020; PEARCE; TURNER, 1990). A economia circular pode ser definida como um sistema propositalmente regenerativo, planejado, pensado para sempre se recuperar. O uso de recursos e energia são minimizados com a criação de circuitos fechados em que materiais e energia são aproveitados ao máximo. O resíduo de um processo é insumo de outro, por meio de manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, recondicionamento e reciclagem de longa duração (GEISSDOERFER *et al.*, 2017; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

A economia circular está enraizada na economia ecológica e ambiental. Os ciclos da natureza sempre se renovam, não há lixo e os resíduos sempre são matéria-prima para um novo ciclo. Esse conceito está sendo adotado na ecologia industrial. Atualmente, a economia circular é promovida na China como um objetivo político nacional, enquanto na União Europeia, no Japão e nos Estados Unidos é vista como uma ferramenta para projetar políticas ambientais e de gestão de resíduos (GEISSDOERFER *et al.*, 2017; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Governos e empresas promovem esse novo modelo econômico, o qual pode ser abordado em multinível. A nível microeconômico, envolve empresas e consumidores, em nível macroeconômico, cidades, regiões e governos. Nessa dinâmica, o processo de inovação é crucial como promotor da economia circular à medida que propicia a recirculação de recursos e energia, a minimização da demanda de recursos e a recuperação do valor dos resíduos (PRIETO-SANDOVAL *et al.*, 2019).

Já a bioeconomia é uma abordagem que considera o comportamento da energia em diferentes sistemas. As análises pioneiras de Nicholas Georgescu-Roegen (1971) relacionaram o sistema econômico com o processo de entropia descrito na segunda lei da termodinâmica, pois, assim como os processos físicos de transição de energia, ele envolve sempre alguma dissipação de energia (GEORGESCU-ROEGEN, 1981).

Nessa perspectiva, sistemas que melhor gerenciam a energia tem maior continuidade. Sistemas que coordenam interações hierárquicas possuem subsistemas especializados e formam estruturas internas, enquanto processos autocatalíticos garantem a energia necessária para se manterem, crescerem, continuarem ou sobreviverem por mais tempo (RAINE; FOSTER; POTTS, 2006).

Contudo, o conceito de bioeconomia recebeu diferentes conotações dependendo da abordagem. Na abordagem da biotecnologia, a bioeconomia é uma aplicação e comercialização da biotecnologia em diferentes setores econômicos. Para uma visão baseada em recursos biológicos, a bioeconomia se concentra no processamento e atualização de matérias-primas biológicas e no estabelecimento de novas cadeias de valor. Por fim, na abordagem da bioecologia, a sustentabilidade dos processos ecológicos ganha destaque à medida que otimizam o uso de energia e nutrientes, promovem a biodiversidade e evitam a degradação dos ecossistemas dos quais o ser humano depende (BUGGE; HANSEN; KLITKOU, 2016).

Sumarizando, a bioeconomia pode ser entendida como uma economia onde os blocos básicos para construção de materiais, produtos químicos e energia são derivados de recursos biológicos renováveis, como fontes vegetais ou animais, com capacidade de promover a biodiversidade e evitar a degradação dos ecossistemas (MCCORMICK; KAUTTO, 2013).

Nessas novas abordagens todas as atividades humanas começam a ser repensadas. A agropecuária precisa ser mais sustentável, materiais e combustíveis devem ser renováveis, não deve haver resíduos, os materiais necessitam ser aproveitados e reaproveitados. Como a agropecuária pode causar contaminação nos solos, água e ar, é preciso conhecer esse impacto e buscar alternativas e soluções (DE VRIES; DE BOER, 2010; FOLEY *et al.*, 2011). Entretanto, o impacto ambiental da agropecuária, se manejado da maneira correta, pode gerar energia renovável e fertilizantes. Para tanto, basta aplicar a tecnologia correta para incluir a agropecuária nos conceitos de economia circular e bioeconomia.

1.3.3 Tecnologias de Gestão de Resíduos na Agropecuária

A agropecuária passa por um grande desafio uma vez que deve atender as necessidades futuras de produção de alimentos e, ao mesmo tempo, minimizar a pegada ambiental (DE VRIES; DE BOER, 2010; FOLEY *et al.*, 2011). Além disso, os resíduos da produção são uma das principais vias de contaminação (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009). Alguns estudos associam a contaminação das águas às atividades urbanas, às atividades industriais, à agricultura e à alta densidade animal (CARPENTER *et al.*, 1998; KOLPIN *et al.*, 2002; ZHANG, Q.-Q. *et al.*, 2015). O fósforo das águas residuais da agropecuária também foi apontado como principal poluidor do lago Erhai Lake, na China, em estudo publicado em 2021 (FAN *et al.*, 2021).

O fósforo e o nitrogênio são nutrientes presentes nos fertilizantes, podem ser de origem sintética ou natural e ambos causam impacto ambiental. Embora materiais orgânicos, como dejetos animais, sejam considerados fertilizantes naturais, em 1974 já eram discutidos os problemas causados pelo excesso de dejetos no solo. Tratar os dejetos para usar como fertilizante era considerado difícil e seu valor era pequeno em relação aos custos de transporte. Dessa forma, quantidades excessivas de dejetos são aplicadas em áreas próximas às criações de animais (VOORBURG, 1974b, 1974a).

Os dejetos animais, além de poluírem as águas por lixiviação de nutrientes, também causam contaminação por bactérias e protozoários. Assim, prejudicam o solo e a água e geram doenças em áreas onde há grandes concentrações de animais e o tratamento desses resíduos é inadequado ou ineficiente (HOODA *et al.*, 2000). Se estes estiverem contaminados com agentes terapêuticos veterinários, antibióticos, esteroides e outros produtos similares, pode ocorrer processos de fitotoxicidade, já que esses compostos permanecem por determinado tempo no ambiente e causam diversos impactos (JJEMBA, 2002).

Sempre existem odores em locais onde há grandes concentrações de animais e não são tomadas medidas efetivas de gestão de dejetos. A amônia (NH₃) é a substância de odor mais comum e pode atingir até 4100 ppm em áreas de compostagem nas fazendas (WANG, Y.-C. *et al.*, 2021). A poluição do ar, doenças infecciosas e acidentes de trabalho são os principais efeitos ocupacionais negativos sobre a saúde das pessoas causados pela agropecuária, como observado na Holanda (POST *et al.*, 2020).

Além da poluição de águas, solos e produção de odores, a pecuária mundial foi apontada como responsável por 18% da emissão global de gases de efeito estufa. Em relação à criação de aves e suínos, a produção de bovinos seria a atividade com maior geração de

gases do efeito estufa. Questões como eficiência alimentar, emissão entérica de metano (CH₄), taxas de reprodução dos bovinos e necessidades de uso de recursos como terra e água fazem da produção de carne vermelha a atividade com a maior produção de gases do efeito estufa na agropecuária (DE VRIES; DE BOER, 2010; GONTARD *et al.*, 2018; H. STEINFELD *et al.*, 2006).

O gás carbônico (CO₂), o metano e o óxido nitroso (N₂O) são considerados os principais gases causadores do efeito estufa (BACH; JAIN, 1990), sendo estes últimos os mais produzidos nas criações de animais. Dentre eles, para a produção de produtos pecuários (carne, leite e ovos), o gás carbônico ainda parece ser o de menor impacto ambiental (DE VRIES; DE BOER, 2010).

Todas essas constatações sobre o potencial de poluição da agropecuária mostram a importância em se desenvolver métodos de gestão na agricultura e manejo de dejetos na pecuária para evitar a contaminação dos solos e das águas, além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Assim como sugerido em diversos estudos, é preciso implementar tecnologias e estratégias para controlar o aquecimento global, tratar os resíduos e reduzir os impactos ambientais da agropecuária (BACH; JAIN, 1990; CARPENTER *et al.*, 1998; CHEW *et al.*, 2021; COOKE, 1973; DE VRIES; DE BOER, 2010; FOLEY *et al.*, 2011; WANG, Y.-C. *et al.*, 2021).

Cabe destacar que usar resíduos orgânicos como fertilizante é uma antiga prática agrícola. No entanto, produzir combustíveis alternativos a partir desses resíduos é um assunto que passou a ser discutido com mais intensidade nas últimas décadas. O tratamento de lamas de obras, de esgotos e de águas residuais pelo processo anaeróbico é registrado desde o início dos anos 1900, mas ultimamente começou a ser visto como possibilidade de suprimento alternativo de energia em vez de um mero método de tratamento de resíduos (ALICH JR., 1976; ANTONIOU *et al.*, 2019; GRUNBAUM, 1978; KOKOROPOULOS; BENGTON, 1978; SMITH *et al.*, 2008; SONODA, 1976).

A digestão anaeróbica, a gaseificação, a combustão e a liquefação hidrotérmica são algumas das tecnologias que podem ser usadas para produzir energia a partir de resíduos. Outras tecnologias que não produzem energia diretamente são a compostagem, a vermicompostagem, a carbonização pirolítica, a carbonização hidrotérmica e a cama de maravalha, que são usadas para transformar resíduos em fertilizantes orgânicos (KHOSHNEVISAN *et al.*, 2021).

A digestão anaeróbica é uma prática antiga que possibilita o controle da poluição e a recuperação de energia. A degradação da matéria orgânica é realizada por microrganismos em condições anaeróbicas (sem oxigênio). Esse processo bioquímico é comum na decomposição de materiais orgânicos na natureza em locais como pântanos, por exemplo. Bactérias e outros microrganismos trabalham em sinergia para produzir um processo que pode ser simplificado em quatro etapas denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (ANGELIDAKI *et al.*, 2009, 2009; KHOSHNEVISAN *et al.*, 2021; PARRA-OROBIO *et al.*, 2021).

Na hidrólise, ocorre a reação química entre moléculas de água, carboidratos de alto peso molecular, gorduras e proteínas que geram polímeros por meio da ação enzimática de bactérias fermentativas. Por sua vez, na acidogênese, os polímeros são convertidos em ácidos orgânicos, álcoois, gás hidrogênio e gás carbônico. Já na acetogênese, os ácidos graxos voláteis são convertidos em ácidos acéticos. Por fim, na metanogênese, o ácido acético e o gás hidrogênio são transformados em gás carbônico e metano (ANGELIDAKI *et al.*, 2009; POSTAWA; SZCZYGIEL; KUŁAŻYŃSKI, 2021; ZHANG, C. *et al.*, 2014).

Ao final do processo de digestão anaeróbica se obtém o biogás e o digestato. O biogás é composto majoritariamente por metano, um pouco de gás carbônico e uma quantidade pequena de outros gases, entre os quais está o sulfeto de hidrogênio (H₂S). O biogás é inflamável e pode ser usado diretamente como energia térmica, mas precisa ser purificado para ser utilizado em motores a combustão, devido ao alto poder corrosivo do sulfeto de hidrogênio (CHOWDHURY, 2021; ZHANG, C. *et al.*, 2014).

O digestato tem grande potencial para aplicação como fertilizante agrícola graças aos altos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). As características microbiológicas e parasitológicas, a fitotoxicidade e os riscos de contaminação são reduzidos com o processo de digestão anaeróbica completo. Ainda assim, o uso de digestato deve ser racional para evitar-se a contaminação do solo por metais pesados e a lixiviação de fósforo e nitrogênio (PARRA-OROBIO *et al.*, 2021; WEILAND, 2010).

Enquanto a digestão anaeróbica é uma tecnologia bioquímica, a gaseificação é uma tecnologia termoquímica. Na gaseificação, o material orgânico deve sofrer uma oxidação parcial e dissociação molecular que ocorre em altas temperaturas (800-1000 °C) e libera monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e Metano (CH₄), os quais podem ser usados como combustível em turbinas a gás (CAPUTO *et al.*, 2005; KHOSHNEVISAN *et al.*, 2021).

O processo de gaseificação ocorre em um gaseificador em quatro estágios: secagem, pirólise, combustão e redução. Na secagem, a água da biomassa é evaporada; na pirólise, a biomassa é pirolisada em gases voláteis caloríficos de média energia, em líquido e em carvão; na combustão, ocorrem reações de combustão com quantidades limitadas de ar ou oxigênio fornecidos; e na redução, o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H₂) são produzidos. Os resíduos desse processo podem ser usados como fertilizantes (DEVI; PTASINSKI; JANSSEN, 2003; PARASCANU *et al.*, 2021).

A combustão também é um processo termoquímico de alta temperatura (ocorre acima de 550 °C). A biomassa é queimada em uma caldeira para produzir calor e eletricidade. Nesse processo, são produzidos dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água (H₂O), que podem mover uma turbina a vapor e gerar eletricidade (PARASCANU *et al.*, 2021). A aplicação excessiva dos substratos dos processos de combustão e de gaseificação tem potencial de acidificação do solo, por isso, a aplicação desse material como fertilizante deve ser cuidadosa (KHOSHNEVISAN *et al.*, 2021; PARASCANU *et al.*, 2021).

A liquefação hidrotérmica pode converter diretamente os resíduos em bio-óleo a temperaturas de 200-350 °C e pressão de 5-28 MPa. O procedimento é composto pela preparação do material, pela reação de liquefação hidrotérmica e pela recuperação e reutilização de produtos (CHEN *et al.*, 2014; KHOSHNEVISAN *et al.*, 2021; TIAN *et al.*, 2014).

Porém, a liquefação hidrotérmica é mais indicada para biomassas com alto teor de lipídeos, como biomassa de microalgas cultivadas. Ao final do processo de liquefação hidrotérmica da matéria orgânica, o nitrogênio (N) presente no bio-óleo pode dificultar a sua utilização como combustível devido ao alto poder corrosivo e ao potencial de emissão de óxidos de nitrogênio na combustão. Além disso, os metais pesados zinco (Zn), cobre (Cu) e chumbo (Pb) permanecem nos resíduos sólidos após o processo de liquefação hidrotérmica. Caso esses resíduos sejam usados como fertilizantes, uma administração mais cuidadosa visando evitar a contaminação de águas e solos se torna necessária (CHEN *et al.*, 2014; FU; WANG, 2011).

A digestão anaeróbica, a gaseificação, a combustão e a liquefação hidrotérmica são algumas das tecnologias mais comuns para a geração de energia a partir de resíduos (KHOSHNEVISAN *et al.*, 2021). Dentre as tecnologias atuais para a produção de energia a partir de resíduos, a digestão anaeróbica parece ser a tecnologia mais antiga, simples e consolidada. Desenvolvê-las significa incluir a agropecuária no modelo de economia circular.

A partir dessa contextualização, concluímos que existem diversas possibilidades para a gestão dos resíduos agropecuários. Isso motivou o desenvolvimento de uma pesquisa bibliométrica capaz de apresentar um panorama sobre as tecnologias que existem atualmente para a valorização dos resíduos agropecuários, a qual foi apresentada no capítulo 2.

1.4 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA

Os métodos são os caminhos sistemáticos que conduzem o raciocínio para a produção de conhecimento verificável. No processo mental dedutivo reafirmamos o conteúdo das premissas com argumentos condicionais válidos, é o caso do raciocínio matemático e das formas de dedução lógicas válidas. No processo mental indutivo partimos de um conjunto de premissas, observações particulares, e com um número considerado suficiente de constatações aceitamos uma generalização (LAKATOS; MARCONI, 2017).

Para Karl R. Popper no método científico temos um conhecimento prévio a partir do qual elaboramos um problema, ao qual oferecemos uma solução provisória, depois passamos a criticar a solução para eliminar o erro. Esse processo resulta em novos problemas a serem solucionados (LAKATOS; MARCONI, 2017).

A atual abordagem quantitativa, tem raízes no pensamento positivista lógico, enfatiza o raciocínio dedutivo e a lógica. Por outro lado, a abordagem qualitativa abarca aspectos dinâmicos, holísticos e individuais, informações simbólicas, dados não métricos, ou seja, aspectos da realidade que não podem ser quantificáveis (GOLDENBERG, 2011). Assim, a abordagem da atual pesquisa pode ser classificada como de métodos mistos (CRESWELL; ROCHA; SILVA, 2007). Pois, como será apresentado a seguir as abordagens quantitativa e qualitativa serão usadas.

As pesquisas ainda podem ser classificadas de acordo com seus objetivos. Para Gil (2002) a pesquisa exploratória é aquela que busca a familiarização com determinado tema, visando o aprimoramento de ideias para tornar um assunto mais explícito e constituir hipóteses que poderão ser testadas em outras oportunidades. Portanto, o presente trabalho se classifica como uma pesquisa exploratória.

Para atingir o objetivo de uma pesquisa são necessários determinados procedimentos para se aproximar da realidade estudada, são atitudes concretas diante do problema abordado (LAKATOS; MARCONI, 2017). Nesse estudo os procedimentos bibliográfico e estatístico serão utilizados (GIL, 2002; LAKATOS; MARCONI, 2017).

No procedimento bibliográfico são considerados os estudos já elaborados sobre determinado tema, sejam livros, artigos, notas técnicas, e outros (GIL, 2002). Já o

procedimento estatístico permite obter de conjuntos complexos representações simples, quantitativamente e com manipulações estatísticas é possível fazer generalizações pelo raciocínio indutivo (LAKATOS; MARCONI, 2017).

Para realizar o **primeiro objetivo específico** a discussão científica sobre o assunto foi abordada. Uma revisão sistemática de literatura foi executada. Alguns dados agropecuários de instituições como o IBGE¹– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, CEPEA² – Centro de Estudos Avançados em Economia foram usados para embasar as discussões.

A análise sistemática de conteúdo se baseou no protocolo PRISMA³ (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) com as seguintes etapas: Identificação, triagem, seleção e inclusão de modo que os resultados de cada etapa foram registrados (PAGE *et al.*, 2021).

O acesso as bases foi realizado com o acesso institucional disponibilizado pela UFRGS. A estratégia de busca foi a busca avançada, os operadores booleanos (and e or) foram usados para otimizar a busca. A busca foi realizada em inglês e português. Foi possível estabelecer uma série de tecnologias capazes de valorizar resíduos agrícolas como será apresentado no capítulo 2.

Já para realizar o **segundo objetivo específico** foi executada uma análise estatística em uma base de dados de acesso público disponibilizada pela associação CiBiogás⁴. Os dados dessa associação também são usados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para a formulação da visão estratégica do cenário de tratamento de resíduos no Brasil (MAPA, 2019; SAMPAIO, MEDEIROS, SOTTA, 2019).

A análise estatística foi majoritariamente descritiva. Foram realizadas categorizações, distribuições de frequências, análises de medidas de tendência central, análises de medidas de variabilidade, comparações entre médias e outros testes estatísticos (REIS *et al.*, 2015).

Com as análises estatísticas foi possível apresentar algumas das principais características das plantas de digestão anaeróbica da agropecuária brasileira, seu porte, seu desenvolvimento nos últimos anos, sua capacidade de produção de energia, etc. Mais detalhes são descritos no capítulo 3.

1 <https://www.ibge.gov.br>

2 <https://www.cepea.esalq.usp.br/br>

3 prisma-statement.org

4 Uma associação na forma de instituição de ciência e tecnologia, instalada nas dependências do Parque Tecnológico Itaipu, em Foz do Iguaçu, no Paraná (NÓBREGA, 2021).

2. TECNOLOGIAS PARA A ECONOMIA CIRCULAR NA AGROPECUÁRIA

“Artigo apresentado no IX Cineagro – Simpósio da Ciência no Agronegócio, promovido pelo Programa de Pós Graduação em Agronegócios da UFRRS(2021) e convidado para publicação na Revista Iheringia Botânica”

Tecnologias para a economia circular na agropecuária

Diego Durante Muhl¹, Letícia de Oliveira²

¹ Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-6556-4232>. Centro de Estudos e Pesquisa em Agronegócio (CEPAN), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Avenida Bento Gonçalves, 7712, Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 91540-000, Brasil. E-mail: diegomihl@live.com.

² Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-2310-4710>. Departamento de Economia e Relações Internacionais (DERI), Faculdade de Ciências Econômicas (FCE) e Centro de Estudos e Pesquisa em Agronegócios (CEPAN), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), E-mail: leticiaoliveira@ufrgs.br.

RESUMO – Resíduos são um problema na agricultura. Porém, existe a possibilidade de agregar valor com o gerenciamento desses resíduos. A literatura explora o potencial das tecnologias de tratamento de resíduos agrícolas. Mas, é preciso sistematizar o conhecimento sobre o assunto. É preciso entender quais soluções estão se desenvolvendo e quais tecnologias estão mais consolidadas para motivar o desenvolvimento dessas soluções. Assim, este estudo tem como objetivo apresentar uma visão panorâmica das pesquisas em tecnologias de tratamento de resíduos agrícolas. O método adotado foi a análise bibliométrica. Mostramos quais tecnologias estão mais consolidadas na comunidade científica. Várias soluções biológicas e térmicas foram encontradas. Metais pesados, contaminantes químicos e biológicos são as principais preocupações nos processos de tratamento. A digestão anaeróbica e a compostagem são as tecnologias mais exploradas na comunidade científica. As outras tecnologias são microalgas, pirólise, algas, biorrefinarias, combustão, incineração, gaseificação, co-digestão anaeróbia, carbonização hidrotérmica, vermicompostagem, processo de biossíntese, digestão anaeróbia seca e fotobiorreatores. Esse artigo sistematiza e consolida o conhecimento sobre as tecnologias que podem ser aplicadas para o gerenciamento de resíduos agrícolas, isso é importante para a consolidação do campo de pesquisa e desenvolvimento estratégico dessas soluções. A adoção dessas tecnologias é um passo importante em direção a um modelo de economia circular.

Palavras-chave: Agricultura, bioeconomia, digestão anaeróbica, economia circular, pecuária.

Technologies for the circular economy in agriculture

ABSTRACT - Waste is a problem in agriculture. However, there is the possibility of adding value to the management of this waste. The literature explores the potential of agricultural waste treatment technologies. But, it is necessary to systematize the knowledge on the subject. It is necessary to understand which solutions are being developed and which technologies are more consolidated to motivate the development of these solutions. Thus, this study aims to present a panoramic view of research in agricultural waste treatment technologies. The method adopted was bibliometric analysis. We show which technologies are more consolidated in the scientific community. Several biological and thermal solutions were found. Heavy metals, chemical and biological contaminants are major concerns in treatment processes. Anaerobic digestion and composting are the technologies most explored in the scientific community. Other technologies are microalgae, pyrolysis, algae, biorefineries, combustion, incineration, gasification, anaerobic co-digestion, hydrothermal carbonization, vermicomposting, biosynthesis process, dry anaerobic digestion and photobioreactors. This article systematizes and consolidates the knowledge about the technologies that can be applied to the management of agricultural residues, which is important for the consolidation of the field of research and strategic development of these solutions. The adoption of these technologies is a significant step towards a circular economy model.

Keywords: Agriculture, anaerobic digestion, bioeconomics, circular economy, livestock.

2.1 INTRODUÇÃO

Dentro da discussão sobre a adoção de um modelo econômico mais sustentável está a agropecuária. Os resíduos das atividades agropecuárias são uma preocupação pelo impacto ambiental que podem causar. Nesse sentido algumas tecnologias estão se desenvolvendo para agregar valor aos resíduos, produzir energia e materiais alternativos ou simplesmente resolver os problemas ambientais (Diacono *et al.* 2019, Duque-Acevedo *et al.* 2020, Khoshnevisan *et al.* 2021, Maghanaki *et al.* 2013, Palermo *et al.* 2014).

Muitos estudos abordam o tema sob diferentes enfoques, seja na perspectiva da economia circular ou do sequestro de carbono, por exemplo (Donner *et al.* 2020, Ghisellini *et al.* 2016, Hua *et al.* 2014). Nesses diferentes enfoques existem também diferentes tecnologias para tratamento dos resíduos da agropecuária (Duque-Acevedo *et al.* 2020, Gogate & Pandit 2004, Gontard *et al.* 2018, Khoshnevisan *et al.* 2021). Algumas tecnologias se aplicam a grandes plantas como biorrefinarias e outras se aplicam a pequenas escalas de produção e podem ser implementadas até mesmo em pequenas propriedades rurais (Khoshnevisan *et al.* 2021, Palallo *et al.* 2018, Parralejo *et al.* 2019).

Atualmente existem diversas frentes de pesquisa em todo o mundo abordando temas relacionados a bioeconomia, economia circular e valorização de resíduos das atividades agrícolas. Diversas soluções estão sendo estudadas e desenvolvidas por diferentes pesquisadores, em diferentes locais do mundo, mas com o mesmo objetivo de agregar valor aos resíduos para promover modelos de bioeconomia e economia circular (González-Castaño *et al.* 2021, Khoshnevisan *et al.* 2021; Sharma *et al.* 2021). Enquanto isso o conhecimento sobre essa temática permanece fragmentado.

Assim existe a necessidade de sistematizar o conhecimento dessa área. É interessante desenvolver uma abordagem multidisciplinar e integrada desse tema. No mesmo sentido é preciso determinar tecnologias que poderão ser usadas como variável de controle para estudos futuros. É importante estabelecer referências que sirvam de comparação de custos e eficiência para novas tecnologias que estão surgindo e o primeiro passo é determinar quais soluções existem atualmente.

Nessa perspectiva o propósito desse artigo é apresentar um panorama do conhecimento sobre as tecnologias de tratamento de resíduos na agropecuária. Apresentamos as tecnologias mais consolidadas no meio científico que podem ser usadas para a valorização de resíduos das atividades agropecuárias.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O método consistiu numa análise bibliométrica. Foram usadas técnicas quantitativas para explorar os padrões de comunicação, tendências e redes que ocorrem na literatura abordada (Haddow 2018, Navrotsky & Patsei 2021). A identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos se baseou nas orientações do protocolo PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Galvão *et al.* 2015, Page *et al.* 2021).

A chave de pesquisa foi definida para representar os termos agricultura ou agropecuária, resíduos e valorização. Mas, para ampliar o escopo da busca foram adicionadas mais duas palavras-chave sinônimos para cada um desses termos. Assim a chave de pesquisa utilizada foi: *((agriculture OR farming OR husbandry) AND (residu* OR scraps OR waste) AND (recovery OR "value generation" OR "circular economy"))*. A ordem de pesquisa considerou a ocorrência desses termos nos títulos, resumo e palavras-chave dos estudos.

Essa ordem de pesquisa na base *Scopus* retornou 2949 documentos. Com o interesse de enfatizar a discussão atual a busca foi limitada aos últimos 5 anos, ou seja, a busca considerou os estudos publicados a partir de janeiro de 2016, restaram 1527 documentos. Para padronizar as informações e manter o padrão de qualidade os resultados foram limitados a artigos completos, assim restaram 1117 artigos recuperados da base *Scopus*.

A mesma chave de pesquisa foi usada na coleção principal da base *Web Of Science* e retornou 2082 documentos, limitando a busca para os últimos 5 anos restaram 1263 documentos. Desses 999 documentos eram artigos completos que foram recuperados da base *Web Of Science*. Por fim a chave de pesquisa foi aplicada na base de dados *Scielo* e retornou 35 resultados, limitado a busca para os últimos 5 anos restaram 17 documentos, 16 desses documentos eram artigos completos revisados por pares que foram recuperados da base de dados *Scielo*.

Assim o total de 2132 artigos foram incluídos na biblioteca do gerenciador de referências *Zotero*. Havia 568 documentos duplicados. Os documentos duplicados foram removidos. Foi gerado um relatório contendo títulos resumos e metadados de 1564 artigos.

A elegibilidade dos artigos foi definida a partir da questão: Esse artigo trata de estratégias capazes de valorizar resíduos agropecuários? 385 artigos não tratavam de estratégias capazes de valorizar resíduos agropecuários. Assim, restaram 1179 artigos que foram incluídos nas análises com os softwares *SciMAT* e *VOSviewer*. As etapas do protocolo PRISMA estão detalhadamente representadas na Fig. 1.

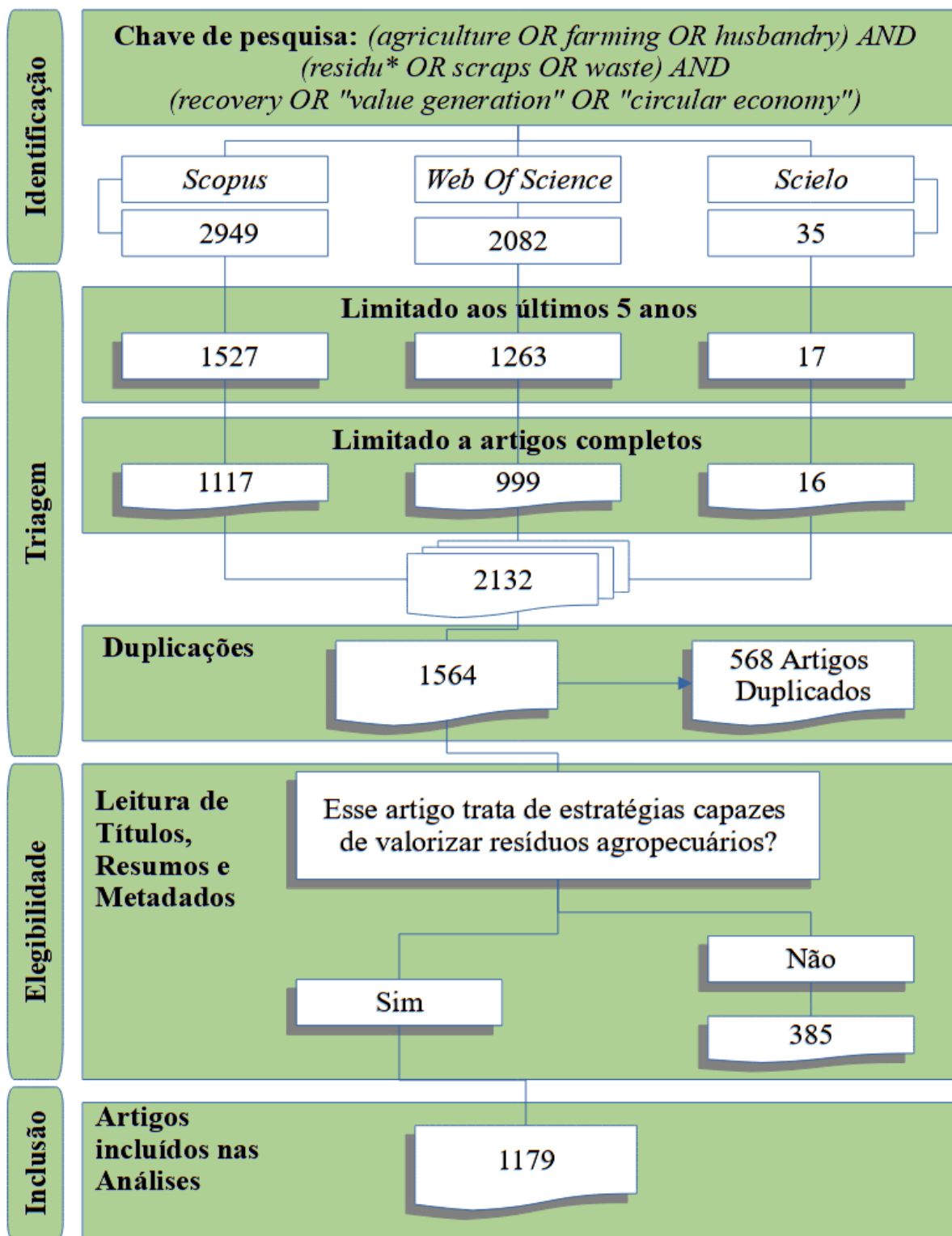


Figura 1: Etapas de acordo com o protocolo PRISMA

Fonte: Autor 2021 adaptado de PRISMA statement

O SciMAT⁵ - *Science Mapping Analysis software Tool* é um software de código aberto desenvolvido para realizar análises de mapeamento científico sob uma estrutura longitudinal. O software incorpora métodos, algoritmos e medidas para todas as etapas do fluxo de trabalho de mapeamento científico, desde o pré-processamento até a visualização dos resultados. (Cobo *et al.* 2012, 2015).

O software VosViewer⁶ é uma aplicação especialmente útil para criar redes entre conceitos, termos, palavras-chave, mineração de texto, contagem de palavras e coocorrência. Os mapas gerados por esse software se baseiam no método VOS – *visualization of similaritie*, ou seja, os objetos são ordenados num mapa de baixa dimensão de forma que a distância entre qualquer par de objetos reflete sua similaridade com a maior precisão possível (Van Eck & Waltman 2019).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas informações gerais são importantes para contextualizar a amostra em análise. Ao final a estratégia adotada para a recuperação dos artigos retornou 1179 resultados. Esses documentos já foram citados 9049 vezes, uma média de 1809,80 citações por ano. Na Tab. 1 constam algumas informações gerais sobre o conjunto de documentos analisados.

Tabela 1: Informações Gerais do Conjunto de Artigos

Descrição	Resultados
Ano das publicações	5 Anos (2016 – 2021)
Documentos	1179
Citações	9049
Média de Citações por ano	1809,80
Média de Citações de Cada Artigo	7,68
Média de Autores por Artigo	5,04
Média Índice H	41

Fonte: Autor 2021

Em média cada artigo foi citado 7,68 vezes. Cerca de 5 autores participaram na elaboração de cada artigo. O conjunto de artigos recuperado tem índice H 41, ou seja, 41 artigos receberam 41 ou mais citações (Hirsch 2007).

Para se ter uma noção geral dos conteúdos estudados e complementar essa análise podemos observar os documentos com maior número de citações. Os 10 principais

5 O SciMAT (<https://sci2s.ugr.es/scimat/>) nasceu no grupo de pesquisa Sci2s da Universidade de Granada, Espanha.

6 O VosViewer (www.vosviewer.com) é uma ferramenta desenvolvida pelo Centro de Estudos de Ciência e Tecnologia da Universidade de Leiden na Holanda.

documentos com o número de citações, primeiro autor, ano e revista da publicação são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2: Os 10 artigos mais citados com número de citações, primeiro autor, ano e revista da publicação

Autor/Ano	Citações	Título do Artigo	Revista
Fijalkowski K. <i>et al.</i> 2017	128	The presence of contaminations in sewage sludge “The current situation”	Journal of Environmental Management
Afroze, S. & Sen, T. K. 2018	121	A Review on Heavy Metal Ions and Dye Adsorption from Water by Agricultural Solid Waste Adsorbents	Water, Air, and Soil Pollution
Lee <i>et al.</i> 2017	108	Pyrolysis process of agricultural waste using CO ₂ for waste management, energy recovery, and biochar fabrication	Applied Energy
Mitrogiannis <i>et al.</i> 2017	98	Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto Ca(OH) ₂ treated natural clinoptilolite	Chemical Engineering Journal
Kirchmann <i>et al.</i> 2017	91	From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook	Ambio
P.J.A. Withers <i>et al.</i> 2018	90	Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture	Scientific Reports
Didaskalou <i>et al.</i> 2017	89	Valorisation of agricultural waste with an adsorption/nanofiltration hybrid process: From materials to sustainable process design	Green Chemistry
De Wilt <i>et al.</i> 2016	85	Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams	Journal of Hazardous Materials
Tampio <i>et al.</i> 2016	79	Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems	Journal of Cleaner Production
Domenech <i>et al.</i> 2019	78	Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy	Resources, Conservation and Recycling

Fonte: Autor 2021

Os dois artigos mais citados abordam a problemática dos contaminantes. Os contaminantes presentes nos resíduos são um entrave para os processos de tratamento e valorização. Metais pesados, produtos químicos, nanopartículas, pesticidas, produtos de cuidados pessoais, produtos farmacêuticos, antibióticos e micro-organismos exigem cuidados especiais em processos de valorização de resíduos (Afroze & Sem 2018, Fijalkowski *et al.* 2017).

Entre os 10 artigos mais citados já é possível identificar alguns processos tecnológicos voltados ao tratamento e valorização de resíduos agropecuários. A pirólise e a digestão

anaeróbica são processos comumente aplicados para o tratamento e valorização de resíduos que podem ser aplicados ao contexto da agropecuária (Lee *et al.* 2017, Tampio *et al.* 2016). Os processos de adsorção, nanofiltração, e o uso de algas aparecem como alternativas para a separação de gases, remoção de poluentes de águas, transformação e geração de nutrientes que podem ser reutilizados em outros processos. O uso dessas tecnologias normalmente acompanham a digestão anaeróbica, a pirólise e outras estratégias (De Wilt *et al.* 2016, Didaskalou *et al.* 2017, Mitrogiannis *et al.* 2017).

Para se aprofundar na investigação dos conteúdos foi realizada uma análise longitudinal de palavras-chave com o software SciMAT. Para executar a análise os documentos foram divididos em seis períodos. Na Fig. 2, da esquerda para a direita cada coluna representa um ano. A primeira linha apresenta um mapa sobreposto das palavras-chave e nas linhas subsequentes o mapa de evolução dos conceitos (Cobo *et al.* 2012).

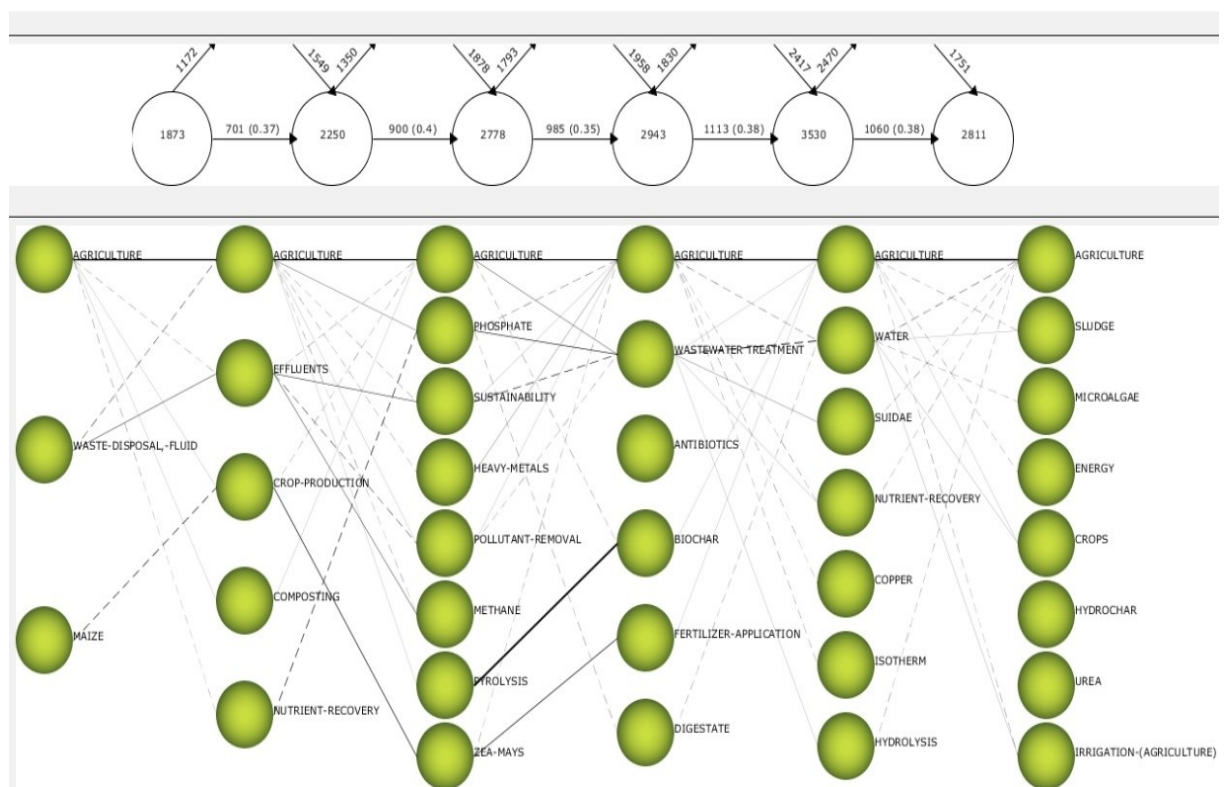


Figura 2: Análise Longitudinal de Coocorrência de Palavras-chave

Fonte: Autor 2021

Na primeira linha, 1873 palavras foram consideradas para a análise no primeiro período, ou seja, o ano de 2016. Como mostra a seta de saída superior 1172 dessas palavras-chave não foram incluídas na análise do período seguinte, pois essas palavras deixaram de ser citadas, mas 701 palavras foram incluídas no próximo período, ou seja, em 2017. E assim sucessivamente para todos os períodos (Cobo *et al.* 2012).

No mapa de evolução dos conceitos o termo agricultura apareceu em todos os períodos como conceito dominante, ou seja, o termo agricultura é a palavra-chave que teve maior coocorrência em todos os períodos. A agricultura também apresentou uma relação direta com a maioria dos outros termos, como está representado pelas linhas conectando os conceitos. Os outros termos representam as principais preocupações relacionadas ao tratamento e valorização de resíduos agropecuários. Os resíduos líquidos, efluentes, o tratamento da água, a água e a lama apareceram diversas vezes na segunda linha, portanto esse é um dos temas mais estudados (Cobo *et al.* 2012, 2015).

Algumas das tecnologias usadas para o tratamento e valorização de resíduos agropecuários aparecem na análise longitudinal. A compostagem, a pirólise, a digestão anaeróbica e as microalgas são soluções que podem ser utilizadas para o tratamento e valorização de resíduos agropecuários (Franchino *et al.* 2016, Jakubus 2020, Lee *et al.* 2017).

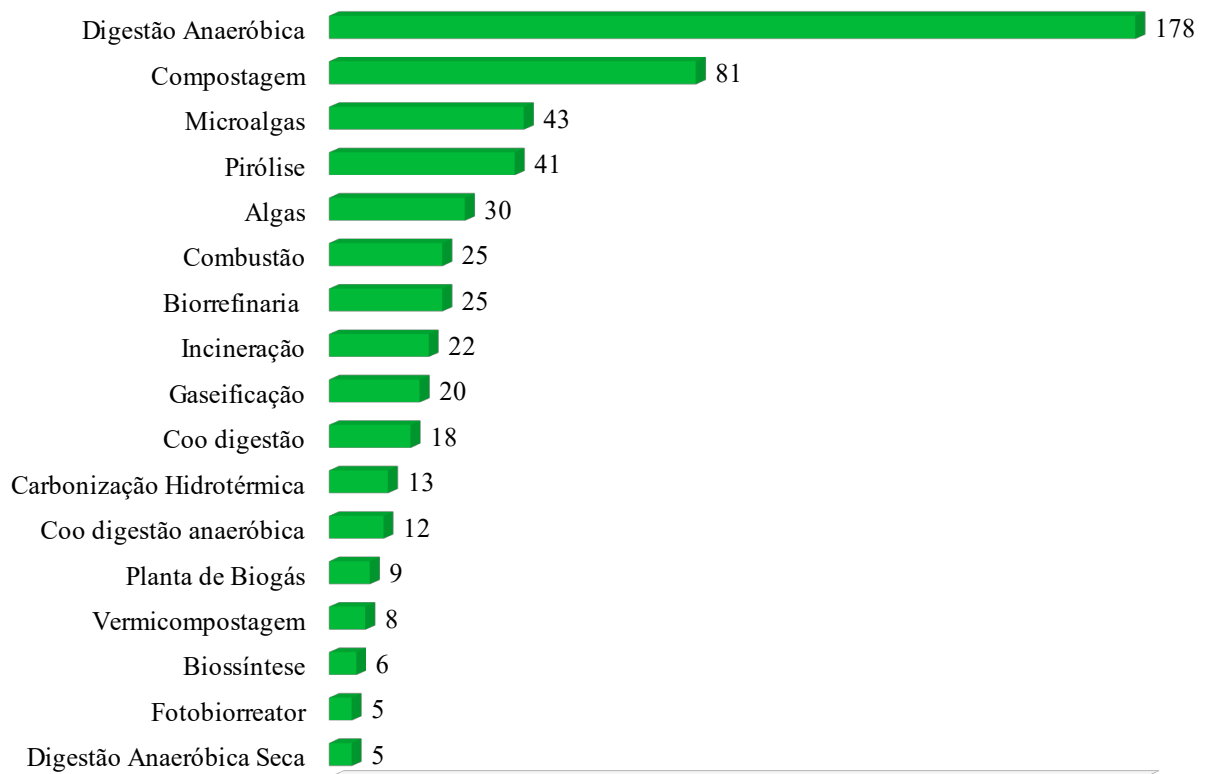


Figura 3: Tecnologias para a valorização de resíduos de acordo com o número de ocorrências de palavras-chave

Fonte: Autor 2021

Seguindo na investigação e para efetivamente conseguir determinar quais são as tecnologias que podem ser aplicadas no tratamento, e valorização de resíduos agropecuários foi usado o recurso de contagem de ocorrência de palavra-chave do software VosViewer. Esse recurso conta o número de ocorrências de uma palavra-chave específica, uma palavra-chave

com muitas ocorrências se refere a uma temática popular no meio de pesquisa (Van Eck & Waltman 2019). A Fig. 3 apresenta de acordo com o número de ocorrências quais são as soluções ou tecnologias mais estudadas com a intenção de valorizar resíduos agropecuários nos últimos 5 anos.

A seguir são apresentadas algumas noções gerais de cada uma dessas tecnologias. Os resultados são apresentados, brevemente caracterizados e discutidos a partir da literatura científica. Termos sinônimos referentes a mesma solução foram agrupados para a discussão.

2.3.1 Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbica é uma prática antiga que possibilita o controle da poluição e a recuperação de energia. O termo planta de biogás também é usado se referindo a digestão anaeróbica. A degradação da matéria orgânica é realizada por microrganismos em condições anaeróbicas (sem oxigênio). Esse processo bioquímico é comum na degradação de materiais orgânicos na natureza em locais como pântanos. Bactérias e outros microrganismos trabalham em sinergia para produzir um processo que pode ser simplificado em quatro etapas denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Angelidaki *et al.* 2009, Khoshnevisan *et al.* 2021, Parra-Orobio *et al.* 2021).

Na hidrólise ocorre a reação química entre moléculas de água, carboidratos de alto peso molecular, gorduras e proteínas que geram polímeros por meio da ação enzimática de bactérias fermentativas. Na acidogênese os polímeros são convertidos em ácidos orgânicos, álcoois, gás hidrogênio e gás carbônico. Na acetogênese os ácidos graxos voláteis são convertidos em ácidos acéticos. Na metanogênese o ácido acético e o gás hidrogênio são transformados em gás carbônico e metano (Angelidaki *et al.* 2009, Postawa *et al.* 2021, Zhang *et al.* 2014).

Ao final do processo de digestão anaeróbica se obtém o biogás e o digestato. O biogás é composto majoritariamente por metano, um pouco de gás carbônico e uma quantidade pequena de outros gases, entre os quais está o sulfeto de hidrogênio (H₂S). O biogás é inflamável e pode ser usado diretamente como energia térmica, mas precisa ser purificado para ser usado em motores a combustão devido ao alto poder corrosivo do sulfeto de hidrogênio (Chowdhury 2021, Zhang *et al.* 2014).

O digestato tem grande potencial para aplicação como fertilizante agrícola devido ao alto teor de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). As características microbiológicas, parasitológicas, a fitotoxicidade e os riscos de contaminação são reduzidos com o processo de digestão anaeróbica completo. Ainda assim, o uso de digestato deve ser racional para evitar a

contaminação do solo por metais pesados e a lixiviação de fósforo e nitrogênio (Parra-Orobio *et al.* 2021, Weiland 2010).

A coo digestão pode ser considerada um aperfeiçoamento da digestão anaeróbica. Trata-se da adição de diferentes tipos de biomassa para melhorar o desempenho do sistema. Diversos tipos de biomassa podem ser combinadas. A coo digestão pode melhorar a qualidade e a quantidade de biogás produzido. A associação de diferentes tipos de biomassa pode produzir um digestato de melhor qualidade para a fertilização do solo, com maiores teores de fósforo e nitrogênio. Assim a viabilidade econômica de todo o sistema pode melhorar (Astill & Shumway 2016, Piekutin *et al.* 2021, Pintucci *et al.* 2017).

A digestão anaeróbica seca segue os mesmos princípios da digestão anaeróbica com a particularidade de trabalhar com biomassa seca. Esse processo pode ser vantajoso em alguns casos. Mas, a operacionalização da digestão anaeróbica seca exige equipamentos específicos. A produção de metano também sofre inibições relacionadas a temperatura e a concentração de amônia. No processo de digestão anaeróbica seca as concentrações de amônia são maiores e isso pode inibir a produção de metano (Deng *et al.* 2016, Huang *et al.* 2019, 2016).

2.3.2 Compostagem e Vermicompostagem

Outra prática antiga de gerenciamento de materiais orgânicos é a compostagem. Esse processo também é comum na natureza, a decomposição de folhas, galhos de árvores e outros materiais comuns numa floresta são um exemplo de compostagem rudimentar. Mas, esse é um processo aeróbico de decomposição da matéria orgânica. Diversos materiais orgânicos podem ser processados juntos. A compostagem é promovida por diversas bactérias e fungos. Ao final de diversos processos biológicos e químicos promovidos por esses micro-organismos obtêm-se o composto orgânico (Pagans *et al.* 2006, Ryckeboer *et al.* 2003).

O composto orgânico é um material estável rico em nutrientes. Esse material pode ser usado como adubo em diversos cultivos. O processo de compostagem é um gerenciamento do material orgânico. A matéria orgânica é processada e reaproveitada. Determinados níveis de umidade, temperatura e a adição de alguns materiais específicos podem acelerar o processo de decomposição da matéria (Pinto *et al.* 2017, Wang *et al.* 2021).

Já a vermicompostagem utiliza agentes biológicos, normalmente minhocas, para acelerar e melhorar o processo de compostagem. O cultivo de minhocas para a compostagem melhora os aspectos físico-químicos, aumenta as porcentagens de nitrogênio, fósforo e potássio e estabiliza a matéria orgânica. A vermicompostagem tem custo de instalação e operacionalização baixos, por isso é uma estratégia interessante para pequenas escalas.

Pequenos pecuaristas podem agregar valor a resíduos e evitar a contaminação ambiental com essa técnica. Assim essa tecnologia pode ajudar muito na promoção da economia circular em pequenas propriedades (Borges *et al.* 2017, Liu *et al.* 2021, Singh *et al.* 2020).

2.3.3 Microalgas e Algas

As microalgas são micro-organismos unicelulares que vivem em meios aquáticos doces ou salgados. Constatamos que o termo alga também é usado por diversos autores se referindo as microalgas (Sharma *et al.* 2021, Zou *et al.* 2021).

As microalgas podem ser usadas para recuperação de nutrientes em águas residuárias. Esses micro-organismos são capazes de realizar fotossíntese usando luz e gás carbônico. As microalgas crescem rapidamente e são capazes de se adaptar a diversos ambientes (Rajendran *et al.* 2018, Sobhi *et al.* 2019). Devido a sua capacidade de adaptação as microalgas podem ser cultivadas em águas residuais de laticínios, a partir de dejetos animais, entre outras possibilidades (Fica & Sims 2016, Rajendran *et al.* 2018, Sobhi *et al.* 2019).

A capacidade de fazer fotossíntese, fixar CO² e gerar lipídeos torna as microalgas uma alternativa para a geração de biocombustíveis. As microalgas podem ser usadas, inclusive, em um segundo processo de tratamento promovendo um ciclo de bioeconomia de recursos. Por exemplo, as microalgas podem ser cultivadas no digestato depois da produção de biogás pelo processo de digestão anaeróbica para a geração de biocombustíveis, no primeiro estágio é gerado o biogás e num segundo estágio pode se gerar um bio-óleo a partir dos lipídios da biomassa produzida pelas microalgas (Bohutskyi *et al.* 2016, Kim & Kim 2017, Uggetti *et al.* 2018).

2.3.4 Pirólise, Combustão, Incineração e Carbonização Hidrotérmica

A pirólise, a combustão, a incineração e a carbonização hidrotérmica são processos térmicos. Esses processos são realizados em reatores, caldeiras ou fogões. O calor gerado pode ser usado em diversas finalidades. Diferentes tipos de biomassa podem ser processados. Matérias-primas do setor agrícola e florestal podem ser processadas. Cavacos de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de girassol, cascas de castanha-do-pará, diversos resíduos agrícolas e urbanos podem ser usados nesses processos (Cardozo *et al.* 2016, Cavalaglio *et al.* 2020).

A pirólise é uma decomposição térmica. A estrutura molecular de resíduos pode ser transformada pela ação do calor (normalmente entre 300°C e 500°C) em ambiente sem oxigênio ou com pouco oxigênio. A pirólise pode ser aplicada a gestão de resíduos agrícolas

ou urbanos para a recuperação de energia e fabricação de biochar, bio-óleo e gases voláteis (Callegari *et al.* 2018, Lee *et al.* 2017).

O biochar é a biomassa resultante da pirólise. Essa biomassa pode ser aplicada para correção do solo (Figueiredo *et al.* 2020). Além do biochar a pirólise pode produzir biodiesel e o gás de síntese. Devido a essas características a pirólise se mostra uma alternativa interessante na promoção da sustentabilidade ambiental e economia circular (Callegari *et al.* 2018, Chew *et al.* 2021, Lee *et al.* 2017).

A combustão é realizada em caldeiras ou fogões. O calor liberado na reação pode ser usado em diversas finalidades. As cinzas do processo de combustão podem ser aplicadas como fertilizantes devido as concentrações de fósforo e fosfato, no entanto é preciso tomar cuidado com a presença de metais pesados e outros contaminantes (Bogush *et al.* 2018). O processo deve ser eficiente e as emissões de dióxido de carbono devem ser monitoradas (Cardozo *et al.*, 2016).

A gaseificação é um processo térmico que normalmente ocorre entre 400°C a 900°C. Esse processo usa biomassa sólida ou líquida para produzir uma substância gasosa, também chamada de gás de síntese. Esse gás pode ser usado em motores de combustão interna, turbinas, para a geração de calor ou eletricidade. A gaseificação é um processo mais sofisticado que a combustão e a incineração. Mas, na Europa já existem propriedades rurais que adotam a tecnologia na escala das fazendas (Cardoso *et al.* 2019, Taupe *et al.* 2016).

A carbonização hidrotérmica converte a biomassa em um material semelhante ao carvão com maior teor de carbono. O grau de carbonização está relacionado à massa inicial, à temperatura ao tempo de reação e pressão. O processo acontece em 170-250 °C a uma pressão que mantém a saturação do processo. A biomassa nessas condições produz uma parte sólida, uma parte líquida e alguns gases. A carbonização hidrotérmica é capaz de produzir um hidrocarvão rico em fósforo. O fósforo pode ser extraído e usado como fertilizante agrícola e o restante do carvão pode ser usado como combustível sólido. (Oh & Yoon 2017, Oliver-Tomas *et al.* 2019).

2.3.5 Biossíntese e Fotobiorreator

A biossíntese é um processo biológico realizado por organismos vivos. A biossíntese está relacionada com os processos anabólicos desses organismos. Organismos vivos podem produzir compostos químicos complexos a partir de elementos mais simples. Fungos e outros microrganismos cultivados são capazes de produzir enzimas como as lacasses. Essas enzimas podem ser aplicadas em diversas finalidades, as lacasses por exemplo, funcionam como

biocatalizadores e essas substâncias podem ser usadas em cosméticos, medicamentos pois são capazes de realizar uma função específica num organismo vivo (Chebbi *et al.* 2021, Pinheiro *et al.* 2020).

Resíduos da fabricação de vinhos e do processamento de olivas podem ser usados no processo de biossíntese realizado por fungos e outros micro-organismos. Nesse processo biológico podem ser produzidos, por exemplo, glicolípídeos. Essas moléculas podem ser usadas na fabricação de bioprodutos na indústria de cosméticos, indústria de limpeza e outras aplicações (Chebbi *et al.* 2021).

O Fotobiorreator é uma estratégia para cultivar micro-organismos fototrópicos. O fotobiorreator utiliza uma fonte de luz para cultivar micro-organismos fototrópicos, como as microalgas ou algumas bactérias. Por exemplo, algumas cianobactérias fototrópicas são capazes de assimilar e armazenar glicogênio, cianoficina (polímero de aminoácido), polifosfatos e polihidroxicarboxilatos. Essas substâncias podem ser aplicadas a produção de bioplásticos. Já as microalgas, cultivadas em fotobiorreatores, podem ser integradas ao sistema de digestão anaeróbica como estratégia para purificar o biogás, pois o processo de fotossíntese é capaz de fixar o CO₂ e liberar oxigênio. Por fim, a biomassa das microalgas pode ser usada em outras finalidades, como produção de bio-óleo ou no processo de coodigestão anaeróbica (Sepúlveda-Muñoz *et al.* 2020, Uggetti *et al.* 2018).

2.3.6 Biorrefinaria

A biorrefinaria é uma unidade industrial que pode usar diversos processos para a conversão de biomassa em combustível. Diversas biomassas podem ser processadas para a produção de biocombustíveis. Os dejetos animais e resíduos agrícolas são alternativas promissoras para auxiliar na substituição dos combustíveis fósseis (Bona *et al.* 2018, Rekleitis *et al.* 2020).

As biorrefinarias exigem um aparato tecnológico especializado mas, permitem produzir produtos de alto valor agregado como o bioetanol, biometano, fertilizantes e outros materiais alternativos. Algumas biorrefinarias utilizam em conjunto diversos processos biológicos e térmicos que já foram descritos (Bona *et al.* 2018, Khonhnevisan *et al.* 2021, Rekleitis *et al.* 2020).

2.3.7 Soluções Biológicas e Térmicas

No geral existem soluções de natureza biológica e térmica. A partir dos resultados encontrados podemos classificar as tecnologias para valorização de resíduos em biológicas e térmicas, conforme a Tab. 3.

Tabela 3: Classificação das Tecnologias para Valorização de Resíduos de acordo com sua Natureza

Biológica	Térmica
Digestão Anaeróbica	Pirólise
Compostagem	Combustão
Microalgas	Incineração
Algas	Gaseificação
Coo digestão	Carbonização Hidrotérmica
Coo digestão anaeróbica	
Planta de Biogás	
Vermicompostagem	
Biossíntese	
Digestão Anaeróbica Seca	
Fotobiorreator	

Fonte: Autor 2021

Alguns desses processos seguem princípios semelhantes e alguns dos termos usados se referem a mesma tecnologia como é o caso dos termos digestão anaeróbica e planta de biogás, conceitos que dizem respeito a mesma tecnologia biológica de tratamento de resíduos (Ai *et al.* 2020, Battista *et al.* 2019). Um processo com princípios semelhantes é aplicado na transformação de matéria seca originando o termo digestão anaeróbica seca (Abouelenien *et al.* 2016). A coo digestão e a coo digestão anaeróbica são o resultado de estratégias de melhoramento da digestão anaeróbica (Çaliskan & Azbar 2017, Kaszycki *et al.* 2021).

Os processos térmicos usam calor, mas diferem quanto a temperatura, pressão, ausência ou presença de oxigênio e outras características. A pirólise, por exemplo, normalmente ocorre acima de 430°C na ausência de oxigênio (Akor *et al.* 2021, Lee *et al.* 2017). Além disso processos térmicos e biológicos podem ser aplicados juntos ou em etapas favorecendo a recuperação de nutrientes numa perspectiva de economia circular, como pode se observar em algumas biorrefinarias e estudos-piloto (Akor *et al.* 2021, Khoshnevisan *et al.* 2021, Uggetti *et al.* 2018).

Com isso apresentamos uma visão geral das principais tecnologias que podem ser usadas para a valorização de resíduos agrícolas e agropecuários. Concluímos que essas soluções podem ser térmicas ou biológicas.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o número de ocorrência de palavras-chave a digestão anaeróbica, a compostagem e as microalgas são as soluções mais estudadas para a valorização de resíduos agropecuários. Os três processos são de natureza biológica, ou seja, aproveitam a ação de

micro-organismos vivos e comuns na natureza para a transformação dos resíduos (Franchino *et al.* 2016, Jakubus 2020, Tampio *et al.* 2016).

As tecnologias para a valorização de resíduos agropecuários podem ser de natureza biológica ou térmica. Os processos biológicos podem ser aplicados em efluentes líquidos ou secos. Os processos térmicos trabalham com diferentes condições de temperatura e pressão. Os metais pesados, os contaminantes químicos e biológicos são uma grande preocupação nos processos de tratamento. As microalgas, fungos e outros micro-organismos também podem ser aplicadas como processos complementares para gerar novos subprodutos, purificar gases ou efluentes.

Como limitação deste estudo é preciso destacar que alguma solução ou tecnologia muito recente e pouco explorada na literatura científica pode não estar representada devido a estratégia metodológica adotada. A discussão desse artigo poderia ser muito mais extensa trazendo mais detalhes sobre cada uma das tecnologias apresentadas, mas devido ao grande número de tecnologias isso não seria possível para os limites de um artigo.

Estudos futuros podem comparar as diferentes tecnologias, apresentar as vantagens e desvantagens de cada uma. Os estudos recentes mostram que um processo de aperfeiçoamento está em curso e existem muitas possibilidades para a valorização dos resíduos. É preciso aperfeiçoar as tecnologias para a realidade das atividades agrícolas, é preciso encontrar meios tecnológicos e modelos de negócio para popularizar, viabilizar e comercializar o uso dessas tecnologias. É fundamental definir como essas tecnologias se adaptam a diferentes realidades e quais fatores influenciam a adoção dessas tecnologias nas cadeias produtivas. A adoção dessas tecnologias é um passo fundamental em direção a um modelo de bioeconomia e economia circular.

Listamos as tecnologias mais estudadas mundialmente para a valorização de resíduos agropecuários. Estabelecemos um panorama entre as principais tecnologias que podem ser usadas para a gestão e valorização de resíduos agropecuários. Em estudos futuros as tecnologias aqui listadas poderão ser usadas como variável controle ou parâmetro de custos e eficiência tecnológica.

2.5 REFERÊNCIAS

- ABOUELENIEN, F. *et al.* Dry Co-Digestion of Poultry Manure with Agriculture Wastes. **APPLIED BIOCHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY**, New York, v. 178, n. 5, p. 932–946, 2016.
- AFROZE, S.; SEN, T. K. A Review on Heavy Metal Ions and Dye Adsorption from Water by Agricultural Solid Waste Adsorbents. **Water, Air, and Soil Pollution**, [s. l.], v. 229, n. 7, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048892764&doi=10.1007%2fs11270-018-3869-z&partnerID=40&md5=67edbbfae2360bf050fbad54829663f>.
- AI, P. *et al.* Effect of application of different biogas fertilizer on eggplant production: Analysis of fertilizer value and risk assessment. **ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY & INNOVATION**, Netherlands, v. 19, 2020.
- AKOR, C. I. *et al.* Thermokinetic study of residual solid digestate from anaerobic digestion. **Chemical Engineering Journal**, Netherlands, v. 406, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85092192490&doi=10.1016%2fj.cej.2020.127039&partnerID=40&md5=30843053d9545513856a0702f675344a>.
- ANGELIDAKI, I. *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 59, n. 5, p. 927–934, 2009.
- ASTILL, G. M.; SHUMWAY, C. R. Profits from pollutants: Economic feasibility of integrated anaerobic digester and nutrient management systems. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 184, p. 353–362, 2016.
- BATTISTA, F.; FRISON, N.; BOLZONELLA, D. Energy and nutrients' recovery in anaerobic digestion of agricultural biomass: An Italian perspective for future applications. **Energies**, Verona, v. 12, n. 17, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85071625469&doi=10.3390%2fen12173287&partnerID=40&md5=548995913e1938d9804a22ec671a04a9>.
- BOGUSH, A. A. *et al.* Element speciation in UK biomass power plant residues based on composition, mineralogy, microstructure and leaching. **Fuel**, [s. l.], v. 211, p. 712–725, 2018.
- BOHUTSKYI, P. *et al.* Phytoremediation of agriculture runoff by filamentous algae poly-culture for biomethane production, and nutrient recovery for secondary cultivation of lipid generating microalgae. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 222, p. 294–308, 2016.
- BONA, D. *et al.* The Biorefinery Concept Applied to Bioethanol and Biomethane Production from Manure. **WASTE AND BIOMASS VALORIZATION**, [s. l.], v. 9, n. 11, p. 2133–2143, 2018.
- BORGES, Y. *et al.* Optimization of animal manure vermicomposting based on biomass production of earthworms and higher plants. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND HEALTH PART B-PESTICIDES FOOD CONTAMINANTS AND AGRICULTURAL WASTES**, [s. l.], v. 52, n. 11, p. 791–795, 2017.

ÇALIŞKAN, G.; AZBAR, N. Energy Recovery From Conventional Biogas Digester Effluent with a Novel Bioreactor Configuration. **Waste and Biomass Valorization**, Netherlands, v. 8, n. 7, p. 2371–2381, 2017.

CALLEGARI, A.; HLAVINEK, P.; CAPODAGLIO, A. G. Production of energy (biodiesel) and recovery of materials (biochar) from pyrolysis of urban waste sludge. **Revista Ambiente e Agua**, [s. l.], v. 13, n. 2, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85045728839&doi=10.4136%2fambi-agua.2128&partnerID=40&md5=9a97689c3608eb3679a77a10cbdf3c6c>.

CARDOSO, J. *et al.* Techno-economic analysis of olive pomace gasification for cogeneration applications in small facilities. **Thermal Science**, [s. l.], v. 23, p. S1487–S1498, 2019.

CARDOZO, E. *et al.* Comparison of the thermal power availability of different agricultural residues using a residential boiler. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 435–447, 2016.

CAVALAGLIO, G. *et al.* Characterization of various biomass feedstock suitable for small-scale energy plants as preliminary activity of biocheaper project. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 16, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089820276&doi=10.3390%2fsu12166678&partnerID=40&md5=2b0ce1634e8efbe1e8f4985265474b73>.

CHEBBI, A. *et al.* Potentials of Winery and Olive Oil Residues for the Production of Rhamnolipids and Other Biosurfactants: A Step Towards Achieving a Circular Economy Model. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098794329&doi=10.1007%2fs12649-020-01315-8&partnerID=40&md5=517c233571d4ba172e0e366650d22acd>.

CHEW, K. W. *et al.* Abatement of hazardous materials and biomass waste via pyrolysis and co-pyrolysis for environmental sustainability and circular economy. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 278, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85101960924&doi=10.1016%2fj.envpol.2021.116836&partnerID=40&md5=b215aa56945fb78a0996a599a825c54b>.

CHOWDHURY, T. H. Technical-economical analysis of anaerobic digestion process to produce clean energy. **Energy Reports**, [s. l.], v. 7, p. 247–253, 2021.

COBO, M. J. *et al.* 25years at Knowledge-Based Systems: A bibliometric analysis. **Knowledge-Based Systems**, [s. l.], v. 80, 25th anniversary of Knowledge-Based Systems, p. 3–13, 2015.

COBO, M. J. *et al.* SciMAT: A new science mapping analysis software tool. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, Granada, v. 63, n. 8, p. 1609–1630, 2012.

DE WILT, A. *et al.* Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 304, p. 84–92, 2016.

DENG, L. *et al.* Effect of temperature on continuous dry fermentation of swine manure. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT**, [s. l.], v. 177, p. 247–252, 2016.

- DIACONO, M. *et al.* Recycling agricultural wastes and by-products in organic farming: Biofertilizer production, yield performance and carbon footprint analysis. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 14, 2019.
- DIDASKALOU, C. *et al.* Valorisation of agricultural waste with an adsorption/nanofiltration hybrid process: From materials to sustainable process design. **Green Chemistry**, [s. l.], v. 19, n. 13, p. 3116–3125, 2017.
- DONNER, M.; GOHIER, R.; DE VRIES, H. A new circular business model typology for creating value from agro-waste. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 716, p. 137065, 2020.
- DUQUE-ACEVEDO, M. *et al.* Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. **Global Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 22, p. e00902, 2020.
- FICA, Z.; SIMS, R. Algae-based biofilm productivity utilizing dairy wastewater: effects of temperature and organic carbon concentration. **JOURNAL OF BIOLOGICAL ENGINEERING**, [s. l.], v. 10, 2016.
- FIGUEIREDO, C. C. D. *et al.* Sewage sludge biochar increases nitrogen fertilizer recovery: Evidence from a 15N tracer field study. **Soil Use and Management**, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096709818&doi=10.1111%2fsom.12672&partnerID=40&md5=8e97f8be4f2db3721dca86cf0ac0a55c>.
- FIJALKOWSKI, K. *et al.* The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 203, p. 1126–1136, 2017.
- FRANCHINO, M. *et al.* Microalgae treatment removes nutrients and reduces ecotoxicity of diluted piggery digestate. **SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT**, Amsterdam, v. 569, p. 40–45, 2016.
- GALVÃO, T. F.; PANSANI, T. de S. A.; HARRAD, D. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [s. l.], v. 24, p. 335–342, 2015.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 114, p. 11–32, 2016.
- GOGATE, P. R.; PANDIT, A. B. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: Hybrid methods. **Advances in Environmental Research**, [s. l.], v. 8, n. 3–4, p. 553–597, 2004.
- GONTARD, N. *et al.* A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 614–654, 2018.
- GONZÁLEZ-CASTAÑO, M. *et al.* Promoting bioeconomy routes: From food waste to green biomethane. A profitability analysis based on a real case study in eastern Germany. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 300, 2021.
- HADDOW, G. Bibliometric research. *In: RESEARCH METHODS: INFORMATION, SYSTEMS, AND CONTEXTS*. Cambridge, MA, United States: Chandos Publishing, an imprint of Elsevier, 2018. (Second edition). p. 241–266.

- HIRSCH, J. E. Does the h index have predictive power?. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 104, n. 49, p. 19193–19198, 2007.
- HUA, K. *et al.* Carbon sequestration efficiency of organic amendments in a long-term experiment on a vertisol in huang-huai-hai plain, China. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 9, n. 9, 2014.
- HUANG, H. *et al.* Enhanced biogasification from ammonia-rich swine manure pretreated by ammonia fermentation and air stripping. **International Biodeterioration and Biodegradation**, [s. l.], v. 140, p. 84–89, 2019.
- HUANG, W. *et al.* Volatile fatty acids (VFAs) production from swine manure through short-term dry anaerobic digestion and its separation from nitrogen and phosphorus resources in the digestate. **Water Research**, [s. l.], v. 90, p. 344–353, 2016.
- JAKUBUS, M. A comparative study of composts prepared from various organic wastes based on biological and chemical parameters. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 6, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85087341586&doi=10.3390%2fagronomy10060869&partnerID=40&md5=1a2a5e94172f6788f7d5cb8523d24c9e>.
- KASZYCKI, P.; GŁODNIOK, M.; PETRYSZAK, P. Towards a bio-based circular economy in organic waste management and wastewater treatment – The Polish perspective. **New Biotechnology**, Amsterdã, v. 61, p. 80–89, 2021.
- KHOSHNEVISAN, B. *et al.* A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Edinburgh, v. 135, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089266080&doi=10.1016%2fj.rser.2020.110033&partnerID=40&md5=30377eae9ef301d03d7747d673551>.
- KIM, J.-Y.; KIM, H.-W. Photoautotrophic microalgae screening for tertiary treatment of livestock wastewater and bioresource recovery. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 9, n. 3, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014949441&doi=10.3390%2fw9030192&partnerID=40&md5=e7c79204aa1de92c159f8d79abf4e0e1>.
- LEE, J. *et al.* Pyrolysis process of agricultural waste using CO₂ for waste management, energy recovery, and biochar fabrication. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 185, p. 214–222, 2017.
- LIU, X. *et al.* An Improved Vermicomposting System Provides More Efficient Wastewater Use of Dairy Farms Using *Eisenia fetida*. **AGRONOMY-BASEL**, [s. l.], v. 11, n. 5, 2021.
- MAGHANAKI, M. M. *et al.* Potential of biogas production in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 28, p. 702–714, 2013.
- MITROGIANNIS, D. *et al.* Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto Ca(OH)₂ treated natural clinoptilolite. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 320, p. 510–522, 2017.
- NAVROTSKY, Y.; PATSEI, N. Zipf's Distribution Caching Application in Named Data Networks. *In: 2021 IEEE OPEN CONFERENCE OF ELECTRICAL, ELECTRONIC AND INFORMATION SCIENCES, ESTREAM 2021 - PROCEEDINGS, 2021. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2021.*

OH, S.-Y.; YOON, Y.-M. Energy recovery efficiency of poultry slaughterhouse sludge cake by hydrothermal carbonization. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 11, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85036663878&doi=10.3390%2fen10111876&partnerID=40&md5=50937c79203f28f52995599d5d720b2c>.

OLIVER-TOMAS, B. *et al.* Evaluation of hydrothermal carbonization in urban mining for the recovery of phosphorus from the organic fraction of municipal solid waste. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 147, p. 111–118, 2019.

PAGANS, E. *et al.* Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. **Chemosphere**, [s. l.], v. 62, n. 9, p. 1534–1542, 2006.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, [s. l.], p. n71, 2021.

PALALLO, F.; ARDI, M.; YUSUF, G. The Potency of Livestock Waste into Renewable Energy (Biogas) in Palipu District Tana Toraja Regency. *In: JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES*, 2018. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2018.

PALERMO, G. C.; D'AVIGNON, A. L. D. A.; FREITAS, M. A. V. Reduction of emissions from Brazilian cattle raising and the generation of energy: Intensification and confinement potentials. **Energy Policy**, [s. l.], v. 68, p. 28–38, 2014.

PARRALEJO, A. I. *et al.* Small scale biogas production with animal excrement and agricultural residues. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 131, p. 307–314, 2019.

PARRA-OROBIO, B. A. *et al.* Physicochemical, microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. **Sustainable Environment Research**, [s. l.], v. 31, n. 1, 2021.

PIEKUTIN, J. *et al.* The efficiency of the biogas plant operation depending on the substrate used. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 11, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107950697&doi=10.3390%2fen14113157&partnerID=40&md5=6d19f9e34eb6c375bc3e3e7b1e078f6e>.

PINHEIRO, V. E. *et al.* Trametes versicolor laccase production using agricultural wastes: a comparative study in Erlenmeyer flasks, bioreactor and tray. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 507–514, 2020.

PINTO, R.; BRITO, L.; COUTINHO, J. Organic production of horticultural crops with green manure, composted farmyard manure and organic fertiliser. **BIOLOGICAL AGRICULTURE & HORTICULTURE**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 269–284, 2017.

PINTUCCI, C. *et al.* The ManureEcoMine pilot installation: Advanced integration of technologies for the management of organics and nutrients in livestock waste. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 75, n. 6, p. 1281–1293, 2017.

POSTAWA, K.; SZCZYGIEL, J.; KUŁAŻYŃSKI, M. Innovations in anaerobic digestion: a model-based study. **Biotechnology for Biofuels**, [s. l.], v. 14, n. 1, 2021.

RAJENDRAN, A. *et al.* Deposition of manure nutrients in a novel mycoalgae biofilm for Nutrient management. **BIOCATALYSIS AND AGRICULTURAL BIOTECHNOLOGY**, [s. l.], v. 14, p. 120–128, 2018.

- REKLEITIS, G. *et al.* Utilization of agricultural and livestock waste in anaerobic digestion (A.D): Applying the biorefinery concept in a circular economy. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 17, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090899182&doi=10.3390%2fen13174428&partnerID=40&md5=79287b6a3420922f25ae6ef7ead6e008>.
- RYCKEBOER, J. *et al.* A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. **Annals of Microbiology**, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 349–410, 2003.
- SEPÚLVEDA-MUÑOZ, C. A. *et al.* A systematic optimization of piggery wastewater treatment with purple phototrophic bacteria. **Chemosphere**, [s. l.], v. 253, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082846617&doi=10.1016%2fj.chemosphere.2020.126621&partnerID=40&md5=b5a2b2b0bc6c2254641b1aa0717472d7>.
- SHARMA, G. K. *et al.* Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 287, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102041207&doi=10.1016%2fj.jenvman.2021.112295&partnerID=40&md5=47b3c4bf55ecde896526d4f42c96f8bc>.
- SINGH, A. *et al.* Earthworms and vermicompost: an eco-friendly approach for repaying nature's debt. **ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY AND HEALTH**, [s. l.], v. 42, n. 6, p. 1617–1642, 2020.
- SOBHI, M. *et al.* A promising strategy for nutrient recovery using heterotrophic indigenous microflora from liquid biogas digestate. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 690, p. 492–501, 2019.
- TAMPIO, E.; MARTTINEN, S.; RINTALA, J. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 125, p. 22–32, 2016.
- TAUPE, N. C. *et al.* Updraft gasification of poultry litter at farm-scale - A case study. **Waste Management**, [s. l.], v. 50, p. 324–333, 2016.
- UGGETTI, E. *et al.* Start-up of a microalgae-based treatment system within the biorefinery concept: From wastewater to bioproducts. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 78, n. 1, p. 114–124, 2018.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOSviewer Manual. [s. l.], p. 53, 2019.
- WANG, S.-P. *et al.* Biochar addition reduces nitrogen loss and accelerates composting process by affecting the core microbial community during distilled grain waste composting. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 337, 2021.
- WEILAND, P. Biogas production: Current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 85, n. 4, p. 849–860, 2010.
- YALDIZ, O. From agricultural waste management to energy production; circular economy and co2 trading in agriculture. *In*: CONFERENCE PROCEEDINGS - 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE, TAE 2007: TRENDS IN AGRICULTURAL ENGINEERING 2007, 2007. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2007. p. 18–23.
- ZHANG, C. *et al.* Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 38, p. 383–392, 2014.

ZOU, Y. *et al.* Emerging technologies of algae-based wastewater remediation for bio-fertilizer production: a promising pathway to sustainable agriculture. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, [s. l.], v. 96, n. 3, p. 551–563, 2021.

3. FEATURES OF ANAEROBIC DIGESTION PLANTS IN THE BRAZILIAN AGRICULTURAL SECTOR

“Artigo publicado na Revista Cleaner and Circular Bioeconomy, v. 1, p. 100001, 2022.

Doi: 10.1016/j.clcb.2021.100001”

FEATURES OF ANAEROBIC DIGESTION PLANTS IN THE BRAZILIAN AGRICULTURAL SECTOR

Diego Durante Mühl¹, Letícia de Oliveira²

¹Center for Studies and Research in Agribusiness (CEPAN), Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Bento Gonçalves Avenue, 7712, Agronomy, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 91540-000, Brasil.

²Department of Economics and International Relations—DERI, Faculty of Economics, and Interdisciplinary Center for Studies and Research in Agribusiness—CEPAN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul—UFRGS, Rio Grande do Sul 90040-060, Brazil.

ABSTRACT

In the context of Brazilian agriculture, anaerobic digestion (AD) is an opportunity, and there are technical and economic conditions to explore. Thus, this study investigated the characteristics of anaerobic digestion plants in Brazilian farming. We carried out a descriptive statistical analysis of anaerobic digestion plants in the agricultural and livestock sector in Brazil. The anaerobic digestion plants in operation have increased exponentially from 2003 to 2020. About 79% of the anaerobic digestion plants in Brazil use agricultural and livestock waste, but combined, they only produce 11% of the total biogas; 31% of these plants produce between 150,000 and 200,000 Nm³/biogas per year, and 78% produce less than 500,000 Nm³/biogas per year. About 89% of all AD plants in the agricultural and livestock sector produce electrical energy. For most Brazilian rural properties, a small AD plant capable of producing electricity is ideal. Our results will facilitate the development of technologies focused on the needs of rural properties, and we believe that this is one of the keys to promoting a circular bioeconomy in agriculture.

Keywords: Biogas; Circular Economy; Energy Resources; Livestock; Waste Management

3.1 INTRODUCTION

Anaerobic digestion (AD) can promote the circular bioeconomy by facilitating the recycling of different types of organic material to produce energy, fertilizer and other bioproducts (Tsapekos et al., 2021). This technology can be used to manage food waste, animal waste on farms, industrial organic waste, municipal organic waste and various other organic materials (Boccarossa et al., 2021; Miller et al., 2020; Oliveira et al., 2021; Tena et al., 2022). As a biochemical process, it commonly occurs in the degradation of organic materials in natural environments such as swamps. Bacteria and other microorganisms work in synergy in a process that can be simplified into four steps, namely hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis (Angelidaki et al., 2009; Benyamin Khoshnevisan et al., 2021; Parra-Orobio et al., 2021), resulting in the production of biogas and digestate.

Biogas is mostly composed of methane, with small amounts of carbon dioxide and other gases, such as hydrogen sulphide (H_2S). It is flammable and can be used directly as thermal energy, but it needs to be purified prior to the use in combustion engines due to its high corrosive power (Chowdhury, 2021; Zhang et al., 2014). The obtained digestate has great potential for application as fertiliser due to its high contents of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K). Microbiological and parasitological characteristics, phytotoxicity and contamination risks are greatly reduced via the complete AD process (Parra-Orobio et al., 2021; Weiland, 2010). Although AD is a highly complex process, the operationalisation of the system can be simple, allowing the adaptation of this technology to different situations. Different types of waste can be processed, in large or small quantities, and combined to improve the quality of the biogas or digestate. This approach, called anaerobic co-digestion, is strategically useful to promote the efficiency of the AD process (Dumlu et al., 2021; Kesharwani and Bajpai, 2021).

The adaptability of AD allows the development of large, centralised plants for the production of electricity, fuels and other biomaterials (Karaeva, 2021; Benyamin Khoshnevisan et al., 2021). However, it also allows the generation of small units for the processing of organic matter. Such units are interesting for peripheral rural properties, where there are no large plants, when freight for biomass becomes too expensive or when there is no cooperation among interested parties (Bourdin and Nadou, 2020; Chodkowska-Miszczuk et al., 2020; Van Der Velden et al., 2021).

In countries such as Brazil, the interest in AD is currently growing (Kulkarni et al., 2021; Miranda et al., 2021). Especially on farms, the use of this technology is an important

step towards a circular bioeconomy. It allows for a complete cycle where organic waste is reused as energy and fertilisers, either directly on the farm or after trading. Thus, it has potential to diversify the income sources of farmers and to reduce the environmental impacts of agricultural residue management (Kulkarni et al., 2021; Rodrigues et al., 2020). With the absence of waste management, agricultural activities can have significant environmental impacts (De Vries and de Boer, 2010; Foley et al., 2011; Kolpin et al., 2002; Wang and Li, 2009). Agricultural residues and large concentrations of animals potentially contaminate water, air and soil, facilitating the spread of infectious diseases and contributing to global warming (De Vries and de Boer, 2010; Fan et al., 2021; Steinfeld et al., 2006; Wang and Li, 2009).

In Brazil, agribusiness is an important sector. In 2020, the gross domestic product (GNP) from agribusiness accounted for 26.6% of the Brazilian GNP (CEPEA, 2021). Due to the size of its agricultural activities, Brazil produces a significant amount of organic waste. For example, the annual chicken production in Brazil is 1,362,254,000 heads, whereas that of cattle is 172,719,164 heads and that of swine 39,346,192 heads (IBGE, 2019). However, the biogas sector is not yet developed in Brazil, and there are no established biogas chains, in contrast to some regions of the European Union (Bourdin and Nadou, 2020; González-Castaño et al., 2021). The respective legislation in Brazil is still in its infancy, with few resolutions dealing with this issue at the national level. However, in 2021, one law was passed that mentions biomethane (purified biogas) as an equivalent to natural gas (Brazil, 2021). In Brazil, there are no specific subsidies for the biogas sector, and credit lines have only recently been established (Mariani, 2018; Silva dos Santos et al., 2018).

Despite the absence of coordinated policies to encourage AD in Brazil, recent studies demonstrate the technical and economic feasibility of this technology in the country (de Oliveira et al., 2021; Pedroza et al., 2021; Van Der Velden et al., 2021). In this context, it is important to understand how this potential can be exploited. In January 2021, Brazil had 675 AD plants (Cibiogas, 2021). However, it is still unclear whether this sector is currently growing, and there are no studies addressing the characteristics of AD plants in the country. Also, the sizes of AD plants are unknown, it is unclear whether the number of units is increasing or decreasing, and there is no information on the regional distribution or the application of biogas.

It is impossible to establish a market for biogas in Brazil without knowing some characteristics of the AD plants in operation. In this sense, it is necessary to map the main

characteristics of AD, with the aim to propose business models that are adequate for agriculture and livestock of Brazilian farms. This is the key to accelerate the circular economy on farms. Against this background, the purpose of the current study is to present the main characteristics of AD in Brazilian agriculture.

When developing new technological solutions for AD plants, researchers must consider characteristics such as the size of the units, the amount of biomass available, the costs related to freight and other factors (Oliveira et al., 2021; Rahimi et al., 2021). Currently, new methods for the desulphurisation of biogas or the production of bioproducts are being developed (Bohutskyi et al., 2016; B. Khoshnevisan et al., 2021; Lim et al., 2021; Rapp et al., 2021); however, innovative research must consider the reality of AD plants, and new technologies to optimise the process will only be useful if their costs are compatible with the operation on the AD units. Precisely, these new solutions can only be applied on a large scale if investments and operating costs are compatible with the reality of AD plans on rural properties. We hope that the results of this study will facilitate the development of technologies focused on the needs of rural properties, and we believe that this is one of the keys to promote a circular bioeconomy in agriculture.

3.2 METHODOLOGY

To present the main characteristics of AD in the agricultural sector in Brazil, data from the *Cibiogás* association were collected. In this study, all known AD plants were considered; inconsistencies were removed, and the data were analysed using descriptive statistical techniques.

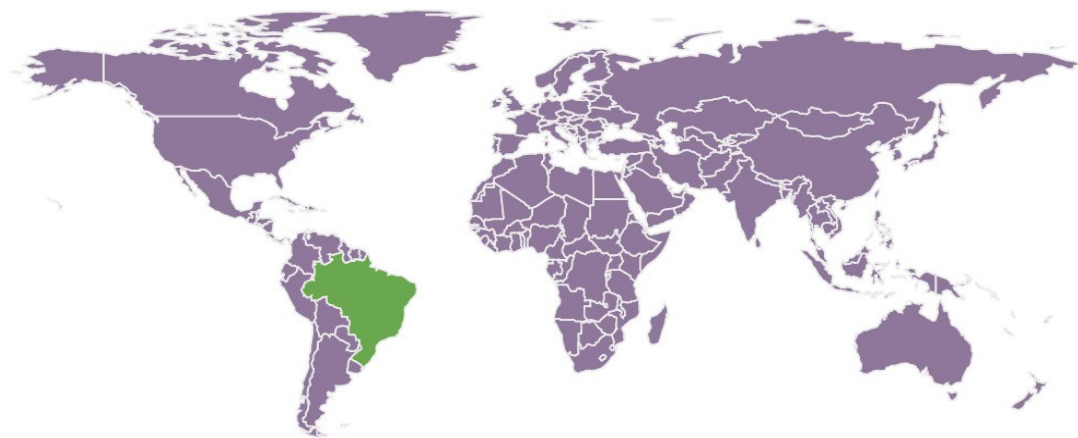


Figure. 1: World map highlighting Brazil

(Source: Authors, 2021).

The study was carried out in Brazil. The Federate Republic of Brazil is the largest country in South America, containing 26 states and the federal district. The database was obtained from the *CiBiogás*⁷ association, a science and technology institution in the *Itaipu* technological park, *Foz do Iguaçu*, state of *Paraná*, Brazil (Nóbrega, 2021). The Brazilian Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA) uses data from this association to plan Brazil's agricultural waste treatment scenario (MAPA, 2019; Medeiros et al., 2019).

The potential for the production of biogas in Brazil is distributed throughout the national territory. Thus, to survey data regarding AD plants, *Cibiogás* searches the internet and contacts equipment suppliers, owners, researchers and government institutions by e-mail or telephone. Other databases, such as ANEEL (National Electricity Agency) and CETESB (Brazil's Environmental Sanitation Technology Company) are also used to gather data on the country's AD plants (Cibiogas, 2021; Mariani, 2018). The collected data are available via the website of *Cibiogás*⁸.

To identify the main characteristics of AD plants in Brazil, we downloaded the data referring to AD plants from the *Cibiogás* base in July 2021, creating a database containing all known AD plants in the agricultural sector. Overall, this database contains 11 variables and 518 observations (Table 1).

Table 1: Variables and categories of the database

Variable	Category or Unit
Year of start-up	From 2003 to 2019
Biomethane production	Yes/No
Electricity production	Yes/No
Mechanical power generation	Yes/No
Thermal power production	Yes/No
Production plant size	Small, medium or large
Status	Operation, implementation or reform
City	City name
State	State name
Region	South, southeast, midwest northeast
Biogas production per year	Nm ³ /year

Source: Authors 2021, with data from *Cibiogás*

Prior to statistical analysis, we reviewed the data, checking for inconsistency, atypical data or outliers. According to previous studies, it is necessary to exclude atypical observations that do not represent the study population (Barnett and Lewis, 1994; Hair et al., 2000). We identified and removed two atypical observations, which likely arose from some errors. One observation had incomplete data and the other was an outlier. In the latter observation, the

⁷ *CiBiogás* website: <https://cibiogas.org/>

⁸ Data are publicly accessible and are available at: <https://mapbiogas.cibiogas.org/>

biogas production value was more than three standard deviations away from the mean of the data distribution of the set (Barnett, 1988; Reis et al., 2015). The outlier is shown in Figure 2.



Figure. 2: The annual biogas productions along with the average, upper limit and lower limit

*Note the outlier, which was removed (Source: Authors 2021, with data from *Cibiogás*).

The blue line represents a set of points distributed in ascending order. Each point is the capacity of a plant to produce biogas. Except for the outlier, the first point of the distribution is a plant that produces 7.300 Nm³ of biogas per year, and the last point of the distribution is a plant that produces 5.961.660 Nm³ of biogas per year.

The thin line is the mean of the distribution, and the upper and lower lines represent the limits, which were within three standard deviations of the population mean (Barnett, 1988).

When atypical data are present, it is necessary to investigate whether this observation is not a natural occurrence of data variability (Barnett and Lewis, 1994). For this specific AD plant, which is located in the city of *São Paulo* in an urban area, an agricultural background

can be excluded, and we therefore excluded this plant from our database. Table 2 shows the two plants that were removed from the set.

Table 2: Characteristics of the anaerobic digestion plants removed from the database

Excluded	A	B
Biomethane production	Yes	No
Electricity production	Yes	Yes
Mechanical power generation	No	No
Thermal power production	No	No
Production plant size	Large	Small
Status	Operational	Operational
City	São Paulo	Passos
State	SP	MG
Region	Southeast	Southeast
Year of start-up	2020	2020
Biogas production per year	131,400,000	9

Source: Authors 2021, with data from *Cibiogás*

The remaining observations were within an acceptable range for the variability of the distribution. Thus, a total of 516 observations were considered in the descriptive statistical analysis.

3.3 RESULTS AND DISCUSSION

3.3.1 Biogas production in Brazil

In Brazil, the dimensions of AD plants of each category differ largely according to the origin of the substrate. The few municipal waste treatment plants (WTS) treat sewage or municipal solid waste; they generally have a large processing capacity and individual biogas production. In contrast, AD plants in the agricultural and livestock sector are numerous and consist of small units with a low individual production capacity.

According to a technical note published by *Cibiogás* in January 2021, there are 675 AD plants in Brazil. Of these, 638 (94%) are dedicated to energy production. In 2020, Brazil, produced about 1.83 billion normal cubic meters (Nm³) of biogas, with 37 units being under construction (*Cibiogás*, 2021).

According to the *Cibiogás* classification in Brazil, small plants produce less than 1,000,000 Nm³ of biogas per year. Medium-sized plants produce from 1,000,001 to 5,000,000 Nm³ of biogas per year, whereas large plants have a production of more than 5,000,001 Nm³ of biogas per year. Overall, 78% of the AD plants in Brazil are small-sized, 16% are medium-sized and only 6% are large-sized (*Cibiogás*, 2021).

We compared the number of plants in each category with the biogas production of each category, in percentage (Fig. 3), to know which category has more units and where the largest and smallest units are.

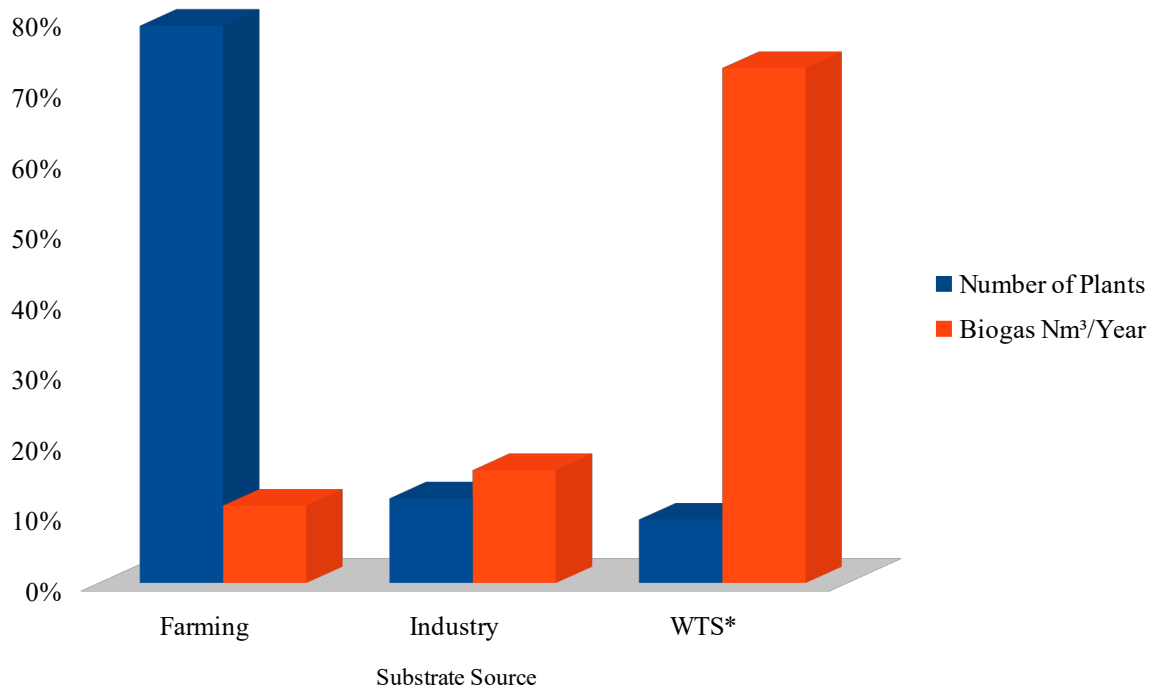


Figure 3: Percentage comparison between AD units by category and biogas produced

*Municipal waste treatment plants (Source: Author 2021, from *Cibiogás* 2021).

Overall, approximately 79% of the AD plants in Brazil are used in the agricultural and livestock sector, although this sector only produces 11% of the total biogas produced in the country. The industrial sector only operates 78 AD plants (12%) but accounts for 16% of the total biogas production. There are only 57 WTS plants in the country (9% of the AD plants), producing 73% of the biogas in Brazil.

The average of biogas production from each category can be used to summarise the differences in plants size. We divided the total number of plants in each category (agriculture, industry, or WTS) by the annual biogas production of that category. Figure 4 shows the average annual biogas production of the different categories.

On average, AD plants in agriculture are smaller than those in the industrial or waste treatment sectors. The average annual biogas production of the agricultural plants is 403,674 Nm³, whereas that of the industrial plants is 3,638,402 Nm³ and that of WTS plants 23,547,754 Nm³.

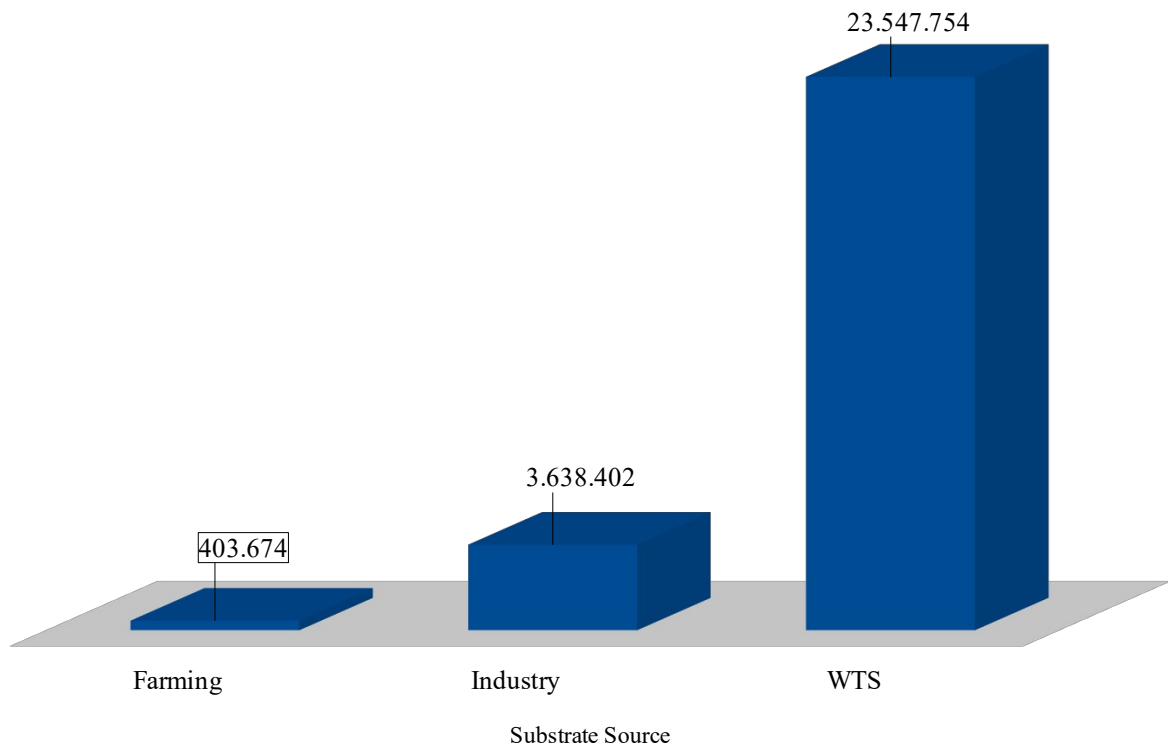


Figure 4: Average annual biogas production of the different categories

(Source: Author 2021, from *Cibiogás* 2021).

In the agricultural sector in Brazil, there are currently just over 500 AD plants in operation (*Cibiogás*, 2021), although Brazil is the fifth largest country in the world (in terrestrial area), with 5,073,324 rural establishments (IBGE, 2019). Therefore, only 0.009% of the rural properties in Brazil currently use the AD technology, demonstrating the large potential for the expansion of AD in the country. Other studies have already pointed out that the potential of biogas production is largely underused in Brazil (Joppert et al., 2018; Silva dos Santos et al., 2018).

Generally, the WTS plants have a large processing capacity and an individual biogas production. At the other extreme are the agricultural AD plants, which consist of numerous units with small individual production capacities; however, the overall potential of this sector is extremely large. As the biomass production capacity is an important variable, it is necessary to develop tailor-made strategies and technologies for each category.

The technology applied to WTS AD may not be appropriate for waste treatment on farms, making it necessary to investigate each sector in detail and to propose appropriate solutions according to the profile of each sector. Therefore, in the following sections, we only consider AD plants in the agricultural and livestock sector.

3.3.2 AD plants of Brazil's agriculture and livestock sector

Following the classification used by *Cibiogás* (2021), only one agricultural AD plant is large (0.19%). Only 39 plants are medium-sized, accounting for 7.53% of the data set analysed (Table 3)⁹.

Table 3: Sizes of the agricultural AD plants

Size	Units	Percentage	
Large (> 5,000,001 Nm ³ biogas/year)	1	0.19	
Medium (1,000,001 to 5,000,000 Nm ³ biogas/year)	39	7.53	
Small	Size 2 (500,001 to 1000,000 Nm ³ biogas/year)	71	13.71
	Size 1 (< 500,000 Nm ³ biogas/year)	405	78.49
Total	516	100	

Source: Author 2021, from *Cibiogás* data.

Small plants produce less than 1000,000 Nm³ of biogas per year (*Cibiogás*, 2021) but account for 92% of the total plants (476). Thus, we decided to divide the stratum referring to small plants, as presented in Table 3. Based on this, 78% of AD plants in the agricultural sector produce less than 500,000 Nm³/biogas per year. To complement this analysis, we determined the distribution of small AD plants (Fig. 5).

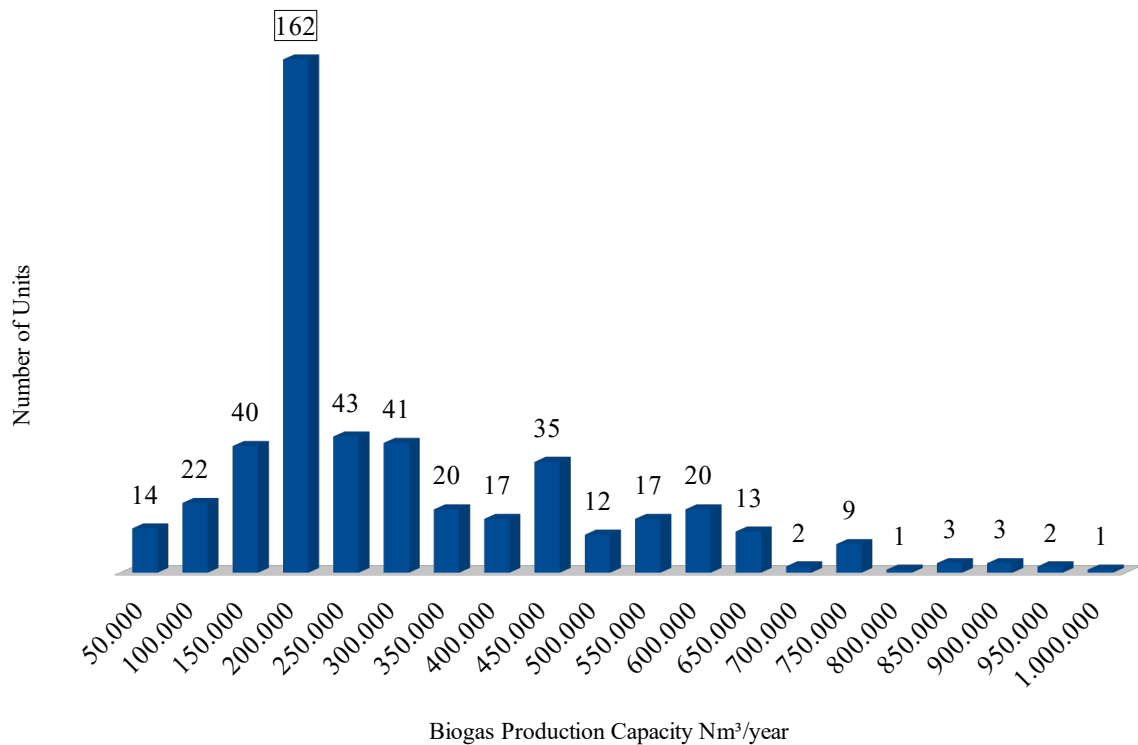


Figure 5: Distribution of AD plants according to their biogas production capacity

(Source: Author 2021, from *Cibiogás* data).

⁹ We also considered nine units that are in implementation.

As seen in Figure 5, a significant part of the agricultural units (162) produces between 150,000 and 200,000 Nm³/biogas per year, accounting for more than 31% of the total agricultural AD plants. In this sense, most AD plants in the agricultural and livestock sector in Brazil are small.

In Germany, a significant part of all agricultural AD plants is small, which is related to the amount of biomass produced on the farms (Daniel-Gromke et al., 2018). In Brazil, around 70% of agricultural establishments cover an area between 1 and 50 hectares (IBGE, 2019); many of these farms do not produce large amounts of biomass, which explains the small size of their AD plants.

In the European Union, the AD plants are generally large. However, smaller amounts of biomass from rural properties further away from the plants, outside the biomass collection routes, are not yet included in the energy production systems. For these small properties, some small-scale AD solutions, specific to each case, may be viable (O'Connor et al., 2021). However, unlike the European Union, in Brazil, there is still no established chain for biogas, and a specific biogas legislation and market are not yet established (Mariani, 2018; Silva dos Santos et al., 2018; Veilleux and Marcos, 2011).

Thus, another important characteristic of Brazil's AD plants is the size of the agricultural units. Developing suitable solutions for small-scale AD plants is a key to developing a circular economy in Brazil's agricultural sector. Researchers, governments and entrepreneurs cannot ignore small AD units (O'Connor et al., 2021), and new technologies must therefore consider the size of these units. The initial and operational costs of waste management technologies must be appropriate to the size of these units. Promotion strategies as well as public or private investments for biogas production in the context of agriculture and livestock in Brazil should therefore consider these characteristics.

3.3.3 The growing number of AD plants in the farming sector

The obtained data contained information for the years 2003 to 2020 (Fig. 6). Prior to 2003 there were six AD plants in the agricultural and livestock sector in Brazil. In 2021, there are more than 500 plants in operation.

Throughout the 18 years, 28 new plants went into operation each year. On average, 5 AD plants went into operation each year from 2003 to 2011, whereas, on average, 51 new AD plants started up each year from 2012 to 2020.

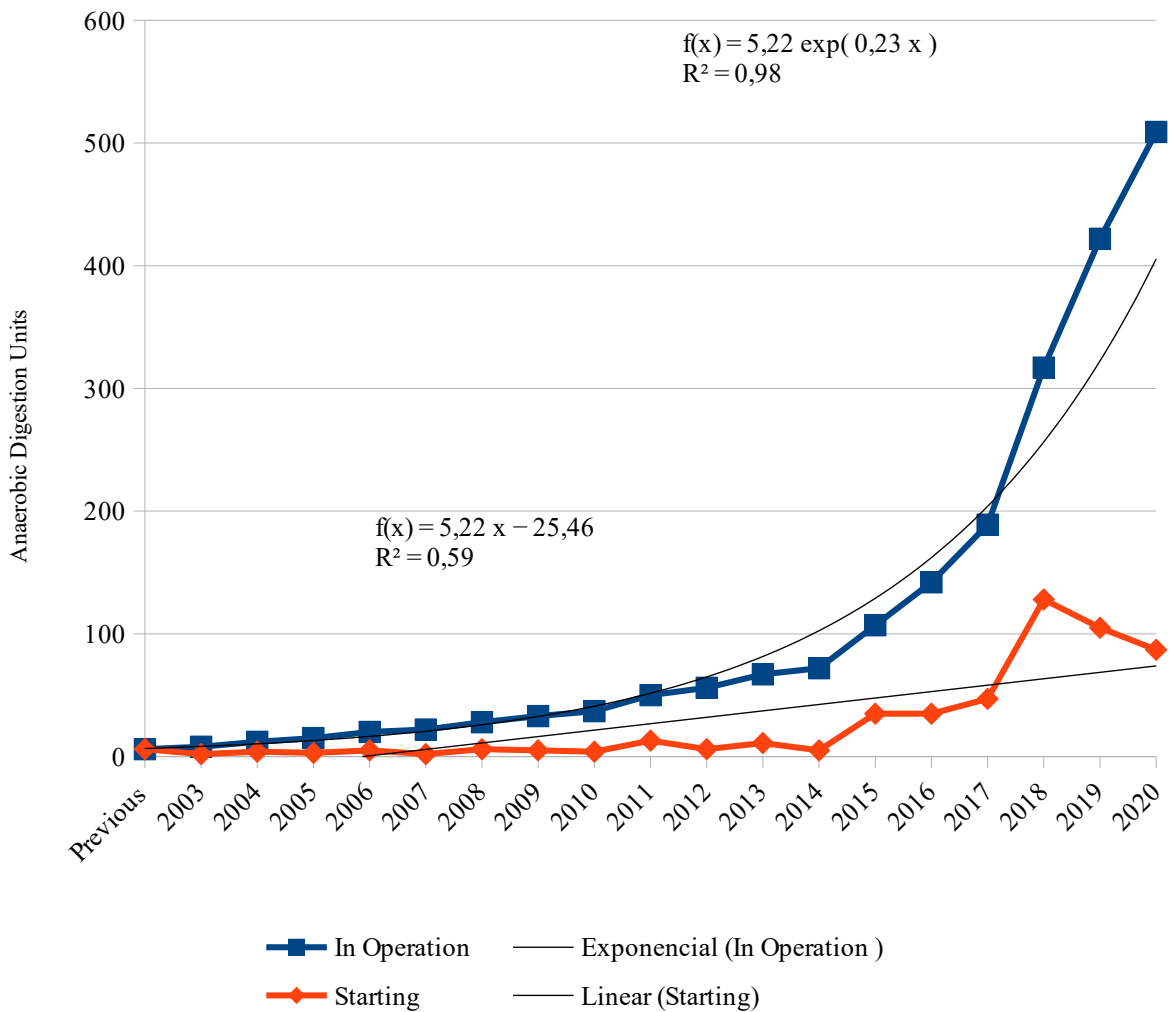


Figure 6: Growth of anaerobic digestion plants in Brazil's agricultural and livestock sector (Source: Author 2021, from *Cibiogás* data).

The distribution of the data representing the new plants that went into operation each year can be regressed to a linear one. As shown in Figure 6, the coefficient of linear determination (R^2) found for the linear function was 0.5866. In other words, 58.66% of the observations fall within a linear growth line. Thus, it is possible to state, with almost 60% accuracy, that the number of new AD plants increased linearly from 2003 to 2020.

The number of operating plants, on the other hand, could be expressed with a non-linear growth line, close to a natural exponential line. The coefficient of determination for an exponential curve (R^2) was 0.9828. Thus, 98.28% of the observations fit the exponential curve (Fig. 6), allowing the statement that the number of AD plants in operation increased exponentially.

Economic viability is an important factor for the development of AD plants (Dalke et al., 2021), and some countries even subsidise AD plants to encourage energy production, as is

the case in Germany (Balibrea-Iniesta et al., 2021; González-Castaño et al., 2021). In Brazil, AD has great potential, but the market is not organized, legislation is not yet properly regulated, and although the government provides financial support, it does not directly subsidise the production of biogas (BNDES, 2021; Mariani, 2018).

Even so, we can cite some important initiatives such as Law 14,134 of April 8, 2021, which explicitly states that biomethane is equivalent to natural gas (Brazil, 2021). Before that, other resolutions have supported the biogas market in Brazil, and government investment programs have financed some developments. For example, the ANELL resolution 482/2012 allows small power producers to supply surplus power to the distribution grid. The energy cannot be sold, but it can be compensated. This system is especially useful for residential solar power plants. However, this resolution allows connecting AD plants to the local power grid (ANEEL, 2015; Rodrigues et al., 2020). The ANP (National Petroleum, Natural Gas and Bio-fuel Agency) also established important milestones, namely ANP Resolutions 8/2015 and 685/2017, stating quality parameters for biomethane (purified biogas). By meeting the quality specifications, biomethane can be interchangeable with natural gas. That is, biomethane can be transported and used like natural gas (ANP, 2017, 2015; Brazil, 2021).

Incentive initiatives may also have helped the growth of the AD technique in agriculture in Brazil. One example is the ABC Program (Low Carbon Agriculture of the BNDES — National Development Bank). It was launched in 2010 by the Brazilian government, with several financing lines. With this program, farmers also could finance equipment for the treatment of manure and waste, thereby financing compost bins, biodigesters and biogas electricity generators (BNDES, 2021; MAPA, 2021). However, it should be noted that countries such as the United Kingdom, Germany, Austria and Switzerland have national policies established for the use of biomethane for the generation of electricity, the transport of biomass and the use of the digestate (Herbes et al., 2021). In Brazil, despite the growth, some factors hinder the development of this technology, namely lack of knowledge, little technological development, absence of an organised market and absence of incentives and financing tools (Mariani, 2018; Veilleux and Marcos, 2011).

The valorisation of agricultural residues involves several actors (Bourdin and Nadou, 2020), providing numerous business opportunities. A new chain of products and services is developing, with opportunities for researchers, technology companies, specialised service providers, suppliers, buyers and investors. The regulation and organisation of an emerging market are still challenging for the biogas sector in Brazil. It is therefore essential to establish

guidelines for a more organised market, which already are in place in some countries of the European Union. This is a path for the development of the circular economy and the bioeconomy that can be taken in Brazil (Esteves et al., 2021; González-Castaño et al., 2021; Herbes et al., 2021). Research and technological development must be adequate to the agricultural and livestock sector in Brazil. Several business models or productive arrangements are possible, according to local characteristics, and it is necessary to develop appropriate solutions for small properties (Kulkarni et al., 2021; O'Connor et al., 2021).

Another important feature is that the number of AD plants on Brazilian farms is increasing despite the difficulties faced by the sector. Although the popularisation of AD can lead to cost savings, the appropriate set of financial incentives is needed. Specialisation and gains of scale reduce costs, and most likely, a productive system will be established around AD in Brazil, as in some locations in the European Union (Bourdin and Nadou, 2020; González-Castaño et al., 2021). With this, private investments and government subsidies will return to the investors, the government, the farmers or the mill owners (Da Motta Pires et al., 2017). Creating such systems is one of the keys to the circular economy.

3.3.4 Regional unit distribution

The southeastern region of Brazil has the largest number of biogas generation units that use farming residues. The state of *Minas Gerais* has 213 units, that of *São Paulo* has 30 units, and that of *Espírito Santo* has 3 units (Fig. 7).

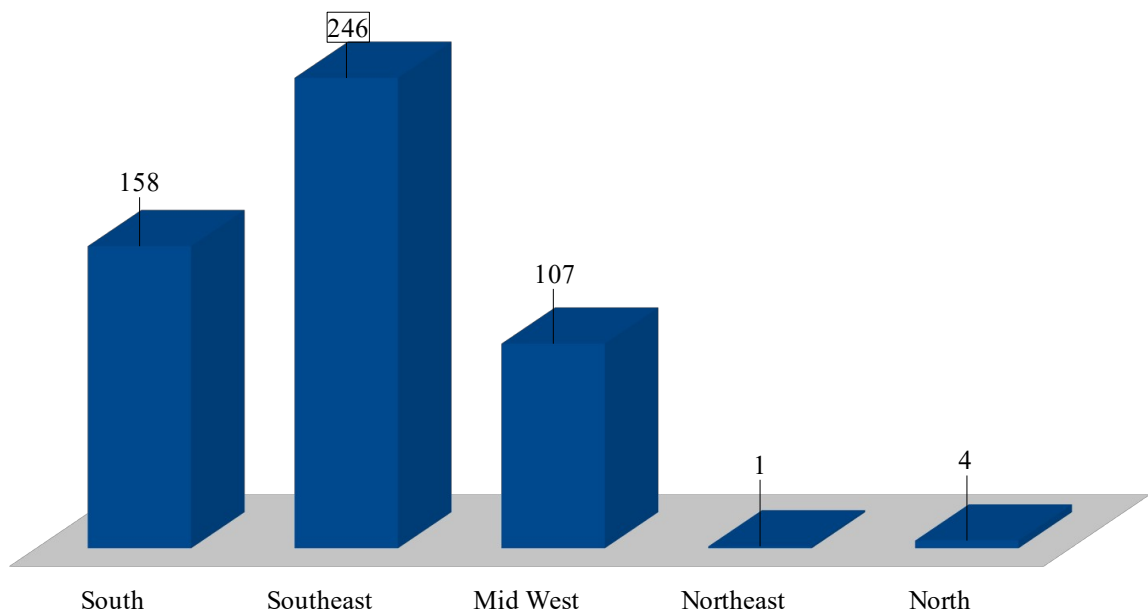


Figure 7: Number of anaerobic digestion plants in Brazil by region

(Source: Author, from *Cibiogás* 2021).

Overall, the southern region has 158 units, situated in the states of *Paraná* (87), *Santa Catarina* (44) and *Rio Grande do Sul* (27). The Midwest has 107 units, distributed in the states of *Goiás* (42), *Mato Grosso* (39), *Mato Grosso do Sul* (23) and the Federal District (3). The northeastern region operates only one unit, in the state of *Ceará*, whereas the northern region has four units, in the states of *Tocantins* (3) and *Amazonas* (1).

To complement this analysis, placed each state in the national scenario. Figure 8 shows the percentages of anaerobic digestion plants and their respective biogas production for each state. *Minas Gerais* state has the highest percentage of units in Brazil and the highest production of biogas from agriculture and livestock, followed by *Paraná* state.

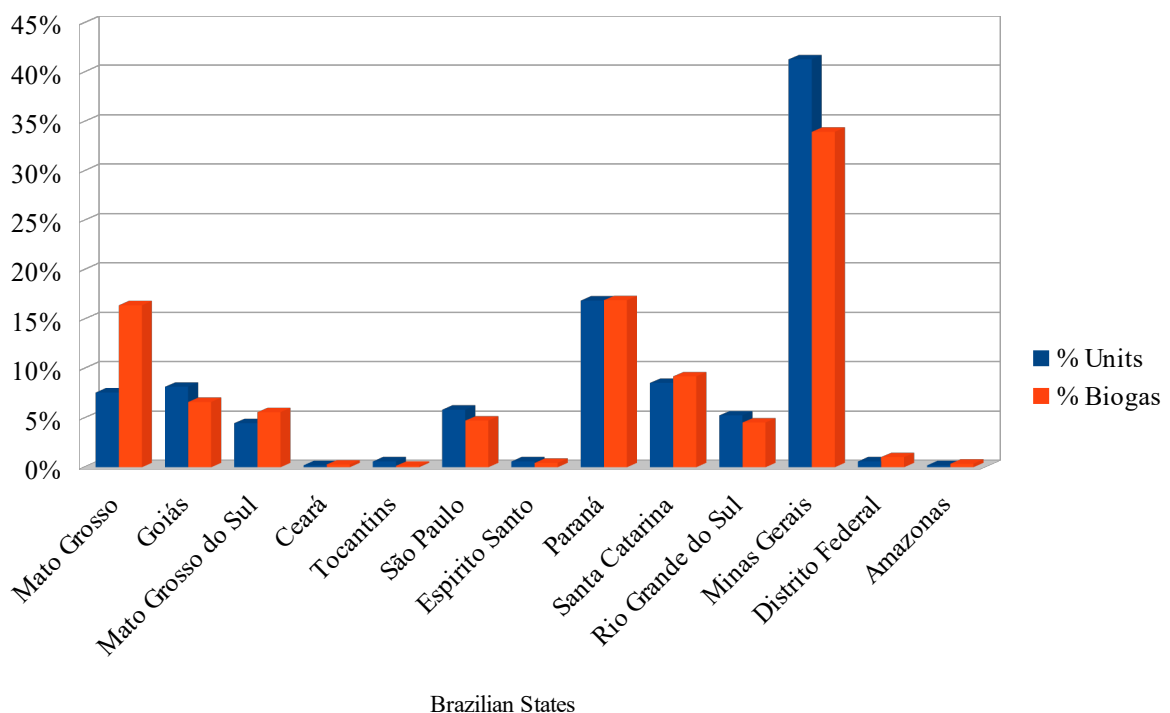


Figure 8: Percentages of anaerobic digestion units and biogas production per state in relation to the total across Brazil

(Source: Author 2021, From *Cibiogás*).

Another important feature of the development of AD in Brazil is that some states already have several units while others still do not use this technology. The preconditions for the incorporation of agricultural AD plants in rural areas can generally differ significantly, as already pointed out by a study carried out on agricultural policies in Poland, Slovakia and the Czech Republic (Chodkowska-Miszczuk et al., 2020). The support by local leaders is a fundamental factor for the development of large AD plants. As several interests are involved

around these technologies, it is necessary that leaders can encourage the development of the technology in a given context (Bourdin and Nadou, 2020).

Brazil is a large country with an important cultural diversity, and it would be necessary to observe each state or region separately to determine which factors drive the development of technology in each case. This would make it possible to think of productive and strategic arrangements for the allocation of AD plants in the country (Oliveira et al., 2021; Rodrigues et al., 2020).

3.3.5 Biogas application

The database analysed here contains four variables regarding the type of technology adopted in the AD plants. Biogas can be transformed according to feasibility or convenience, and thus, AD plants can produce biomethane, electrical energy, mechanical energy or thermal energy. Some units can provide more than one final product and can use biogas in up to three different applications (Table 4).

Table 4: Applications of biogas from agriculture and livestock waste

Biogas use/Port	Small 1		Small 2		Medium size		Large		Total units	
Biomethane + electrical + thermal energy	1	0.25%	1	1.41%					2	0.39%
Biomethane + electrical energy					1	2.6%			1	0.19%
Biomethane	2	0.49%			1	2.6%			3	0.58%
Electrical + mechanical + thermal energy	3	0.74%							3	0.58%
Electrical + mechanical energy	5	1.23%	1	1.41%	1	2.6%			7	1.36%
Electrical + thermal energy	12	2.96%	2	2.82%	2	5.1%			16	3.10%
Electrical energy	360	88%	64	90%	33	84.6%			457	88.5%
Mechanical + thermal energy	5	1.23%					1	100%	6	1.16%
Mechanical energy	4	0.99%			1	2.6%			5	0.97%
Thermal energy	13	3.20%	3	4.23%					16	3.10%
Total	406	100%	71	100%	39	100%	1	100%	516	100%

Source: Author 2021, from *Cibio gás* data

Considering Brazil's characteristics, generating electricity is one of the most interesting alternatives for rural properties. The energy consumption of farm equipment is high, and there is also the possibility of adding the surplus energy into the national electric matrix, which is already the reality for some Brazilian farms (Freitas et al., 2019; Oliveira et al., 2021). On the other hand, depending on the structure of a certain region, it is possible to use biogas for other purposes. For example, in Ireland, researchers argue that it is technically and economically feasible to turn farm biogas into biomethane and add it to the country's extensive natural gas network (Da Motta Pires et al., 2017).

We tried to determine whether there is any relationship between the size of the AD plant and the biogas transformation technology. For this, we grouped the AD units according to the destination given for the biogas and checked the average biogas production of each group of units. The average biogas production of the units capable of producing biomethane was 1.444.792 Nm³/biogas per year. The plants that produce biomethane are usually larger than the other ones (Fig. 9).

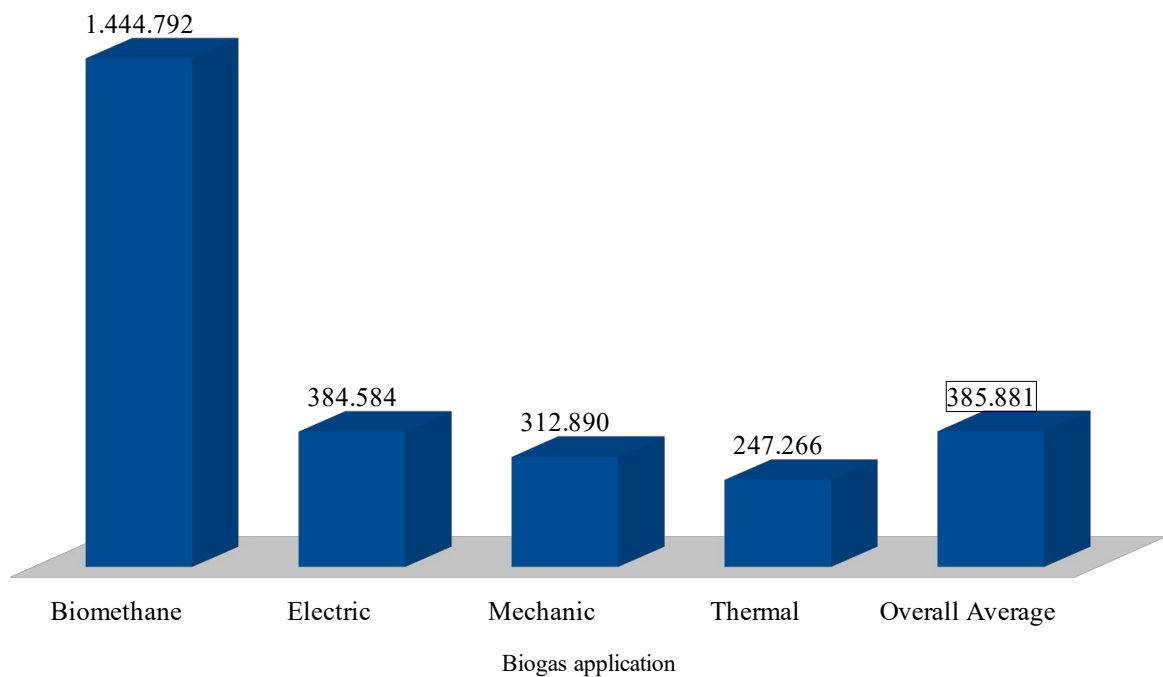


Figure 9: Average biogas production of the grouped units by the application technology (Source: Author 2021, from *Cibiogás* data).

The average biogas production of the plants capable of producing thermal energy is 247.266 Nm³/year, which is the lowest average value of the set. Therefore, using biogas for thermal energy generation or heating is more common among smaller units. Perhaps there is some relationship between the size of the units and the level of the technology adopted.

Smaller units may adopt cheaper and less sophisticated technologies, and thus, the simplicity and operating costs of the systems are important features of small AD plants, along with other characteristics such as the possibility of using or commercialising the energy produced (Li et al., 2021, 2020).

Turning biogas into biomethane or electricity requires the removal of contaminants, mainly carbon dioxide (CO₂), hydrogen sulphide (H₂S) and water vapor (H₂O). Other contaminants are present in smaller quantities (Abatzoglou and Boivin, 2009; Awe et al., 2017; Mulu et al., 2021). However, the removal of impurities from the biogas to avoid the deterioration of the machinery (generators, engines, etc.) increases the investment and operating costs (Awe et al., 2017). Thus, most commercial methods for biogas purification are too expensive for small- and medium-scale digesters (Mulu et al., 2021), and consequently, the selection of the appropriate technology for the treatment and use of biogas is sensitive to the size of the units. For example, in rural communities in developing countries, it is common to use small-scale AD plants (Miranda et al., 2021). The technology is mainly used for heating or even lighting a single residence, and there are an estimated 50,000 digesters in Nepal and about 14 million small-scale digesters in China (Wilkinson, 2011).

3.4 CONCLUSIONS

Most AD plants operating within the Brazilian agricultural sector are small and dispersed, especially in the southeastern, southern and midwestern regions of the country. Most of the AD plants in Brazil (79%) use waste from agriculture or livestock are in agriculture and livestock, but they only produce 11% of the total biomass. Approximately 31% of these plants produce between 150,000 and 200,000 Nm³/biogas per year, and approximately 78% of the agricultural AD plants in Brazil produce less than 500,000 Nm³/biogas per year.

The number of AD plants in operation increased exponentially from 2003 to 2020. In 2003, there were 8 plants, and in 2021, there were more than 500 plants in operation in the agricultural sector in Brazil. The state of *Minas Gerais* has the largest number of units in agriculture (213) and produces 34% of the total biogas, followed by *Paraná* with 87 units and 17%.

The main application of biogas is electricity production. About 89% of the AD plants in agriculture transform biogas into electricity, and only 5.98% of the plants use biogas for more than one purpose, namely to produce electrical and thermal energy. The units that produce biomethane tend to be larger, whereas those that produce thermal energy tend to be

smaller. Based on our results, we can indicate two paths for the development of the AD technology in rural properties in Brazil. One way is the organisation of productive arrangements and the construction of large AD plants, with the availability of large biomass amounts. The other path is the development of small AD plants, as for most rural properties in Brazil, a small AD plant is the ideal solution.

Thus, future studies on AD in Brazil should consider the possibility of organising associations, cooperatives for scale gains in production, as well as the application of technologies suited to the amount and type of biomass to be processed in a given location or property. Also, appropriate regional arrangements according to the characteristics of the local infrastructure, the presence of pipelines, the possibility of electrical compensation, energy sales, etc., are crucial. The forms of public and private financing and the return on these investments must also be investigated. On the other hand, we need to develop an AD plant that is cheap, efficient and economically viable, that is, the initial investment and the operating costs must be low. For this, it is necessary to research and test alternative solutions, use alternative materials and carry out alternative projects to develop safe, efficient and low-cost AD plants. This is one of the keys to bringing the bioeconomy into the context of rural properties in Brazil. Popularising AD in Brazil also means developing viable solutions for small properties.

This article highlights the characteristics of AD plants in Brazil. Our results should help in the design of AD plants, solutions and technologies suitable for the Brazilian scenario. The development of new biogas purification methods and new techniques for the generation of by-products must consider the characteristics of AD plants using agricultural waste, making it one of the ways to popularize the use of AD in the country and to boost the circular bioeconomy in agriculture.

Acknowledgements

Funding: This project was developed with support of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), Brazil, through a scholarship through process n. 88887.486380/2020-00.

3.5 REFERENCES

- Abatzoglou, N., Boivin, S., 2009. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 3, 42–71. <https://doi.org/10.1002/bbb.117>
- ANEEL, A.N. de E.E., 2015. Distributed generation - ANEEL [WWW Document]. URL https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=14461914&_101_type=content&_101_groupId=656827&_101_urlTitle=geracao-distribuida-introduc-1&inheritRedirect=true (accessed 5.26.21).
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., Van Lier, J.B., 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59, 927–934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- ANP, 2017. Resolution 685 of 2017 of the ANP - National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels of Brazil [WWW Document]. URL <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-685-2017-estabelece-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-e-a-especificacao-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao&q=685/2017%20biometano> (accessed 5.26.21).
- ANP, 2015. Resolution 8 of 2015 of the ANP - National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels of Brazil [WWW Document]. URL <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-8-2015?origin=instituicao&q=8/2015%20biometano> (accessed 5.26.21).
- Awe, O.W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D.P., Lyczko, N., 2017. A Review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. *Waste and Biomass Valorization* 8, 267–283. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9826-4>
- Balibrea-Iniesta, J., Rodríguez-Monroy, C., Núñez-Guerrero, Y.M., 2021. Economic analysis of the German regulation for electrical generation projects from biogas applying the theory of real options. *Energy* 231. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120976>
- Barnett, 1988. Outliers and order statistics. *Communications in Statistics - Theory and Methods* 17, 2109–2118. <https://doi.org/10.1080/03610928808829736>
- Barnett, Lewis, T., 1994. Outliers in statistical data, 3rd ed. ed, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Wiley, Chichester; New York.
- BNDES, 2021. Low Carbon Agriculture Program (ABC) of the National Bank for Economic and Social Development of Brazil (BNDES) [WWW Document]. URL <http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/programa-abc> (accessed 5.26.21).
- Boccarossa, M., Di Addario, M., Folino, A., Tatàno, F., 2021. Scenarios of bioenergy recovery from organic fraction of residual municipal waste in the Marche region (Italy). *Sustainability (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/su132011462>
- Bohutskyi, P., Chow, S., Ketter, B., Fung Shek, C., Yacar, D., Tang, Y., Zivojnovich, M., Betenbaugh, M.J., Bouwer, E.J., 2016. Phytoremediation of agriculture runoff by filamentous algae poly-culture for biomethane production, and nutrient recovery for secondary cultivation of lipid generating microalgae. *Bioresource Technology*. 222, 294–308. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.013>
- Bourdin, S., Nadou, F., 2020. The role of a local authority as a stakeholder encouraging the development of biogas: A study on territorial intermediation. *Journal of Environmental Management* 258, 110009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110009>

- Brazil, 2021. Law 14.134, of April 8, 2021 [WWW Document]. URL http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14134.htm (accessed 11.10.21).
- CEPEA, 2021. Brazilian Agribusiness GDP - Center for Advanced Studies in Applied Economics (CEPEA-Esalq/USP) [WWW Document]. URL <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> (accessed 11.13.21).
- Chodkowska-Miszczuk, J., Martinat, S., Kulla, M., Novotný, L., 2020. Renewables projects in peripheries: determinants, challenges and perspectives of biogas plants – insights from Central European countries. *Regional Studies, Regional Science* 7, 362–381. <https://doi.org/10.1080/21681376.2020.1807399>
- Chowdhury, T.H., 2021. Technical-economical analysis of anaerobic digestion process to produce clean energy. *Energy Reports* 7, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.12.024>
- Cibiogas, 2021. Technical Note - Overview of Biogas 2020 [WWW Document]. URL <https://materiais.cibiogas.org/nota-tecnica-panorama-do-biogas-2020-nt-01-2021> (accessed 5.21.21).
- Da Motta Pires, S.R., Veloso, C.G., Kansal, R., Fraizzoli, D., 2017. Study on the feasibility of waste-based biogas for electricity generation in the Irish Grid for a high renewables penetration scenario. Presented at the 2017 6th International Youth Conference on Energy, IYCE 2017. <https://doi.org/10.1109/IYCE.2017.8003721>
- Dalke, R., Demro, D., Khalid, Y., Wu, H., Urgun-Demirtas, M., 2021. Current status of anaerobic digestion of food waste in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151, 111554. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111554>
- Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Stinner, W., Schmalfuß, T., Scheftelowitz, M., Nelles, M., Liebetrau, J., 2018. Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany. *Chemie-Ingenieur-Technik* 90, 17–35. <https://doi.org/10.1002/cite.201700077>
- De Vries, M., de Boer, I.J.M., 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science* 128, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- Dumlu, L., Ciggin, A.S., Ručman, S., Altınay Perendeci, N., 2021. Pretreatment, anaerobic codigestion, or both? Which is more suitable for the enhancement of methane production from agricultural waste? *Molecules* 26. <https://doi.org/10.3390/molecules26144175>
- Esteves, E.M.M., Brigagão, G.V., Morgado, C.R.V., 2021. Multi-objective optimization of integrated crop-livestock system for biofuels production: A life-cycle approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111671>
- Fan, Y., Ni, Z., Wang, S., Zhang, J., Wu, S., 2021. Whole process phosphorus management strategy construction with phosphorus load characteristics, driver and efficiency from the material flow perspective. *Journal of Cleaner Production* 279, 122896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122896>
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O’Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Freitas, F.F., De Souza, S.S., Ferreira, L.R.A., Otto, R.B., Alessio, F.J., De Souza, S.N.M., Venturini, O.J., Ando Junior, O.H., 2019. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>
- González-Castaño, M., Kour, M.H., González-Arias, J., Baena-Moreno, F.M., Arellano-García, H., 2021. Promoting bioeconomy routes: From food waste to green biomethane. A

- profitability analysis based on a real case study in eastern Germany. *Journal of Environmental Management* 300. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113788>
- H. Steinfeld, P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, C. de Haan, 2006. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. FAO, Rome, Italy. URL <https://www.fao.org/3/a0701e/a0701e00.htm>
- Hair, Jr.J.F., Black, W.C., Sant'Anna, A.S., 2000. *Análise multivariada de dados* (6a. ed.). Grupo A - Bookman.
- Herbes, C., Rilling, B., Ringel, M., 2021. Policy frameworks and voluntary markets for biomethane – How do different policies influence providers' product strategies? *Energy Policy* 153. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112292>
- IBGE, 2019. *Agricultural Census: 2017 Agricultural Census of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE)* [WWW Document]. URL <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/> (accessed 7.21.21).
- Joppert, C.L., Garcilasso, V.P., Santos, M.M., Pereira, A.S., Perecin, D., Poveda, M., Coelho, S.T., 2018. The perspectives of biomethane to contribute to increase the natural gas supply in the state of SÃO Paulo. Presented at the European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, pp. 1503–1511.
- Karaeva, J.V., 2021. Hydrogen production at centralized utilization of agricultural waste. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 34089–34096. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.004>
- Kesharwani, N., Bajpai, S., 2021. Pilot scale anaerobic co-digestion at tropical ambient temperature of India: Digester performance and techno-economic assessment. *Bioresource Technology Reports* 15. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100715>
- Khoshnevisan, Benyamin, Duan, N., Tsapekos, P., Awasthi, M.K., Liu, Z., Mohammadi, A., Angelidaki, I., Tsang, D.C.W., Zhang, Z., Pan, J., Ma, L., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Liu, H., 2021. A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, 110033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110033>
- Kolpin, D.W., Furlong, E.T., Meyer, M.T., Thurman, E.M., Zaugg, S.D., Barber, L.B., Buxton, H.T., 2002. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999-2000: A national reconnaissance. *Environmental Science and Technology* 36, 1202–1211. <https://doi.org/10.1021/es011055j>
- Kulkarni, I., Zang, J.W., Leandro, W.M., Parikh, P., Adler, I., Da Fonseca-Zang, W.A., Campos, L.C., 2021. Closed-loop biodigesters on small-scale farms in low-and middle-income countries: A review. *Water (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/w13192744>
- Li, J., Wang, X., Kim, H.H.M., Gates, R.S., Wang, K., 2021. Optimal design of manure management for intensive swine feeding operation: A modeling method based on analytical target cascading. *Journal of Cleaner Production* 282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124550>
- Li, Y., Han, Y., Zhang, Y., Luo, W., Li, G., 2020. Anaerobic digestion of different agricultural wastes: A techno-economic assessment. *Bioresource Technology* 315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123836>
- Lim, J., Cho, H., Kim, J., 2021. Optimization of wet flue gas desulfurization system using recycled waste oyster shell as high-grade limestone substitutes. *Journal of Cleaner Production* 318, 128492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128492>
- MAPA, 2021. *Actions of the Low Carbon Agriculture Plan (ABC)* [WWW Document]. Ministry of Agriculture, Livestock and Supply of Brazil (MAPA). URL <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/acoes-do-plano> (accessed 5.26.21).

- MAPA, 2019. Brazil exceeds goals in sustainable livestock farming using animal waste [WWW Document]. Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA). URL <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-supera-metas-na-pecuaria-sustentavel-com-aproveitamento-de-dejetos-animais> (accessed 8.26.21).
- Mariani, L., 2018. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. Biogas: diagnosis and proposals of actions to encourage its use in Brazil. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2018.1063453>
- Medeiros, S.A.F. de, Sampaio, G.F., Eleneide, D.S., 2019. Diagnóstico da expansão da adoção da tecnologia de Tratamento de Dejetos Animais (TDA) no território brasileiro entre 2010 e 2019. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília. [WWW Document] <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-supera-metas-na-pecuaria-sustentavel-com-aproveitamento-de-dejetos-animais/NotaTecnicaDiagnosticoTratamentodeDejetosAnimaisnoBrasilentre2010e2019MAPA.pdf>
- Miller, K.E., Grossman, E., Stuart, B.J., Davis, S.C., 2020. Pilot-scale biogas production in a temperate climate using variable food waste. *Biomass and Bioenergy* 138, 105568. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105568>
- Miranda, I.T.P., Moletta, J., Pedroso, B., Pilatti, L.A., Picinin, C.T., 2021. A Review on Green Technology Practices at BRICS Countries: Brazil, Russia, India, China, and South Africa. *SAGE Open* 11. <https://doi.org/10.1177/21582440211013780>
- Mulu, E., M'Arimi, M.M., Ramkat, R.C., 2021. A review of recent developments in application of low cost natural materials in purification and upgrade of biogas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111081>
- Nóbrega, H.R. da, 2021. Quem somos. CIBiogás. URL <https://cibiogas.org/quem-somos/> (accessed 1.7.21).
- O'Connor, S., Ehimen, E., Pillai, S.C., Black, A., Tormey, D., Bartlett, J., 2021. Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139, 110580. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110580>
- Oliveira, A.C.L.D., Resende, M.D.O., Silva, E.G.M., Renato, N.D.S., Martins, M.A., Sequinel, R., Machado, J.C., 2021. Evaluation and optimization of electricity generation through manure obtained from animal production chains in two Brazilian mesoregions. *Journal of Cleaner Production* 316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128270>
- Oliveira, A.C.L. de, Renato, N. dos S., Martins, M.A., Mendonça, I.M. de, Moraes, C.A., Resende, M. de O., 2021. Modeling for estimating and optimizing the energy potential of animal manure and sewage in small and medium-sized farms. *Journal of Cleaner Production* 319, 128562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128562>
- Parra-Orobio, B.A., Rotavisky-Sinisterra, M.P., Pérez-Vidal, A., Marmolejo-Rebellón, L.F., Torres-Lozada, P., 2021. Physicochemical, microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. *Sustainable Environment Research* 31. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00085-9>
- Pedroza, M.M., da Silva, W.G., de Carvalho, L.S., de Souza, A.R., Maciel, G.F., 2021. Methane and electricity production from poultry litter digestion in the Amazon region of Brazil: a large-scale study. *Waste and Biomass Valorization* 12, 5807–5820. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01360-x>
- Rahimi, T., Babazadeh, R., Doniavi, A., 2021. Designing and planning the animal waste-to-energy supply chains: A case study. *Renewable Energy Focus* 39, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.07.004>

- Rapp, G., Garcia-Montoto, V., Bouyssiere, B., Thiebaud-Roux, S., Montoya, A., Trethowan, R., Pratt, P., Mozet, K., Portha, J.-F., Coniglio, L., 2021. Indian mustard bioproducts dry-purification with natural adsorbents - A biorefinery for a green circular economy. *J. Clean. Prod.* 286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125411>
- Reis, E., Melo, P., Andrade, R., Calapez, T., 2015. *Estatística Aplicada*, 6th ed. Edições Sílabo, Lisboa.
- Rodrigues, M.F., Da Rosa Abaide, A., Danielsson, G.H., Willers, L., Camponogara, M., 2020. Energy and greenhouse gas emission potential of Northwest Mesoregion of the State of Rio Grande do Sul, Brazil. Presented at the 2020 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D LA 2020. <https://doi.org/10.1109/TDLA47668.2020.9326237>
- Silva dos Santos, I.F., Braz Vieira, N.D., de Nóbrega, L.G.B., Barros, R.M., Tiago Filho, G.L., 2018. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling* 131, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>
- Tena, M., Buller, L.S., Sganzerla, W.G., Berni, M., Forster-Carneiro, T., Solera, R., Pérez, M., 2022. Techno-economic evaluation of bioenergy production from anaerobic digestion of by-products from ethanol flex plants. *Fuel* 309. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122171>
- Tsapekos, P., Khoshnevisan, B., Alvarado-Morales, M., Zhu, X., Pan, J., Tian, H., Angelidaki, I., 2021. Upcycling the anaerobic digestion streams in a bioeconomy approach: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111635>
- Van Der Velden, R., da Fonseca-Zang, W., Zang, J., Clyde-Smith, D., Leandro, W.M., Parikh, P., Borrión, A., Campos, L.C., 2021. Closed-loop organic waste management systems for family farmers in Brazil. *Environ. Technol.* <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1871660>
- Veilleux, N., Marcos, E., 2011. Assessing opportunities in agricultural biogas. *BioCycle* 52, 48–50.
- Wang, Y., Li, C.-X., 2009. Analysis and forecasting on carrying capacity of livestock breeding environment in Heilongjiang Province. Presented at the Proceedings of the 1st International Workshop on Education Technology and Computer Science, ETCS 2009, pp. 647–654. <https://doi.org/10.1109/ETCS.2009.405>
- Weiland, P., 2010. Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* 85, 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- Wilkinson, K.G., 2011. A comparison of the drivers influencing adoption of on-farm anaerobic digestion in Germany and Australia. *Biomass and Bioenergy* 35, 1613–1622. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.013>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T., 2014. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 CONCLUSÃO

A partir da fundamentação teórica, compreendemos a necessidade de se buscar alternativas para a valorização dos resíduos agropecuários. Também, entendemos que existem diversas soluções para o tratamento dos resíduos. Esse resultado motivou a pesquisa bibliométrica onde investigamos quais tecnologias estão sendo estudadas pela comunidade científica atualmente, assim, determinamos que a digestão anaeróbica é a tecnologia mais estudada. Por fim, voltamos nossa atenção para a agropecuária no Brasil, averiguando o perfil e o desenvolvimento da digestão anaeróbica no setor agrícola brasileiro. Atingimos o objetivo de identificar as principais tecnologias que podem ser aplicadas para a valorização de resíduos agropecuários e investigamos a aplicação da digestão anaeróbica no setor agrícola do Brasil.

Voltando às questões iniciais que motivaram a pesquisa, descobrimos que algumas tecnologias como a compostagem e certas soluções de digestão anaeróbica são adequadas para pequenas quantidades de biomassa. Recursos dessa magnitude normalmente geram apenas fertilizantes, mas podem produzir energia em pequena escala. Essas soluções são muito úteis para pequenas propriedades rurais.

Por outro lado, podem ser desenvolvidas refinarias com aparato tecnológico altamente especializado para gerar diversos subprodutos. Processos térmicos e biológicos poderão ser combinados, o que possibilitará uma bioeconomia capaz de originar energia, combustíveis e subprodutos. Esse tipo de solução será adequado para grandes quantidades de biomassa, cooperativas, associações e uma cadeia tecnológica deverá se desenvolver para viabilizar essa demanda.

Em síntese, podemos afirmar que existem soluções muito interessantes para todos os casos. Portanto, há um grande potencial para o desenvolvimento da economia circular e bioeconomia com a ajuda desse tipo de solução tecnológica. A mudança para uma agricultura mais circular é inevitável, precisamos adotá-la o quanto antes, embora haja dificuldades, existe uma grande oportunidade para agricultores, governos, empreendedores e investidores. Milhares de toneladas de resíduos orgânicos estão sendo subutilizados e podem ser aproveitados para suprir carências de energia e de fertilizantes.

Resíduos agrícolas, como madeira, bagaço de cana-de-açúcar, esterco, cascas de frutas e restos animais e vegetais, podem ser reintegrados às cadeias produtivas, principalmente na forma de energia e de fertilizantes. Nesse sentido, o desenvolvimento e a popularização de tecnologias para a gestão de resíduos são um ponto estratégico para que a economia circular e a bioeconomia tornem-se realidade.

Para as propriedades rurais do Brasil, os biodigestores de pequena escala dedicados à produção de eletricidade são a solução mais popularmente adotada. A viabilidade econômica e técnica e a simplicidade do sistema são atualmente variáveis importantes para as pequenas quantidades de biomassa nas propriedades rurais. Talvez esse seja o reflexo da falta de articulação no Brasil, já que ainda não existe legislação, mercado e cadeia de fornecedores estabelecidos para a valorização dos resíduos agrícolas. Assim, o crescimento da tecnologia de digestão anaeróbica no Brasil parece estar relacionado a iniciativas pontuais de alguns projetos em regiões específicas, ou pela iniciativa particular de alguns agricultores.

Os desafios para o desenvolvimento das tecnologias para valorizar resíduos agrícolas são um campo de pesquisa promissor, junto à bioeconomia e à economia circular. Um trabalho de educação e de conscientização da sociedade é imprescindível, pois levará as pessoas voluntariamente a tomarem iniciativas de desenvolvimento sustentável no setor agrícola, o que passa pela evolução das tecnologias para valorização dos resíduos agrícolas. Por outra via, a influência do estado é necessária para desestimular práticas insustentáveis, como o uso de energia fóssil, e fomentar alternativas sustentáveis, como a geração de energia a partir de biomassa de resíduos. As práticas insustentáveis devem ser repensadas e o desenvolvimento sustentável, incentivado, inclusive economicamente. A legislação deve garantir os direitos do bem comum em detrimento de interesses particulares, e o meio ambiente sustentável é um direito e um dever comum da atual e das futuras gerações.

Existe uma série de alternativas tecnológicas que podem ser aplicadas para a geração de valor a partir dos resíduos agrícolas, aliando sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica. Ainda faltam investimento, liderança, articulação política e entre os próprios interessados, pesquisa, conscientização e vontade para que ocorra a popularização dessas novas soluções no Brasil.

A pesquisa que realizamos durante o mestrado abordou apenas alguns aspectos das tecnologias para a valorização de resíduos agropecuários. Para que as tecnologias de gestão de resíduos tornem-se populares no setor agropecuário, uma série de variáveis deve ser articulada, e isso abarca aspectos tecnológicos, econômicos, legais, de pesquisa e de desenvolvimento, motivação, liderança, etc. Por isso, esse estudo pode direcionar a outras pesquisas, mas não encerra o tema.

Trabalhos futuros deverão propor iniciativas de fomento, financiamento, novas soluções tecnológicas adequadas para a realidade da agropecuária no Brasil e em outros países. É fundamental que sejam desenhados e testados protótipos para as tecnologias de

gestão de resíduos, as quais devem ser testadas e aperfeiçoadas na prática a fim de desenvolverem sistemas mais eficientes e economicamente viáveis para a realidade brasileira. A eficiência, a segurança e o custo dos sistemas de gestão de resíduos devem ser pesquisados, novas soluções testadas e desenvolvidas. Existem muitas oportunidades para investimento, pesquisa e desenvolvimento relacionadas às tecnologias de gestão de resíduos.

5. REFERENCIAS

ADAMIC, L. A.; HUBERMAN, B. A. Zipf's law and the Internet. **Glottometrics**, Lüdenscheid, v. 3, n. 1, p. 143–150, 2002.

ALICH, J. A. Jr. Crop, forestry, and manure residues: an energy resource. *In*: CAPTURING THE SUN THROUGH BIOCONVERSION, 1976, Washington, D.C. **Proceedings of a conference on [...]**. Washington, DC: Washington Center for Metropolitan Studies, 1976. p. 127–136.

ANGELIDAKI, I. *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, London, v. 59, n. 5, p. 927–934, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>. Acesso em: 16 dez. 2021.

ANTONIOU, N. *et al.* Contribution to Circular Economy options of mixed agricultural wastes management: coupling anaerobic digestion with gasification for enhanced energy and material recovery. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 209, p. 505–514, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.055>. Acesso em: 8 ago. 2021.

ARANDA-USÓN, A. *et al.* The progressive adoption of a circular economy by businesses for cleaner production: an approach from a regional study in Spain. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 247, [art.] 119648, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119648>. Acesso em: 9 ago. 2021.

BACH, W.; JAIN, A. K. The CFC greenhouse potential of scenarios possible under the Montreal Protocol. **International Journal of Climatology**, New York, v. 10, n. 5, p. 439–450, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.3370100502>. Acesso em: 8 ago. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil supera metas na pecuária sustentável com aproveitamento de dejetos animais**. Brasília, DF, 20 dez. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-supera-metas-na-pecuaria-sustentavel-com-aproveitamento-de-dejetos-animais>. Acesso em: 7 jan. 2021.

BUGGE, M. M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? A review of the literature. **Sustainability**, Basel, v. 8, n. 7, [art.] 691, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su8070691>. Acesso em: 7 jan. 2022.

CAPUTO, A. C. *et al.* Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 28, n. 1, p. 35–51, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.009>. Acesso em: 5 ago. 2021.

CARPENTER, S. R. *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. **Ecological Applications**, Tempe, v. 8, n. 3, p. 559–568, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2). Acesso em: 5 ago. 2021.

CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. PIB do Agronegócio Brasileiro. **Pib do agronegócio cresceu abaixo das projeções**. Piracicaba: CEPEA, 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 23 abr. 2021.

CHEN, W.-T. *et al.* Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from wastewater treatment system into bio-crude oil. **Bioresource Technology**, Barking, v. 152, p. 130–139, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.111>. Acesso em: 8 maio 2021.

CHEW, K. W. *et al.* Abatement of hazardous materials and biomass waste via pyrolysis and co-pyrolysis for environmental sustainability and circular economy. **Environmental Pollution**, Barking, v. 278, [art.] 116836, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116836>. Acesso em: 8 jul. 2021.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, New York, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>. Acesso em: 10 jul. 2021.

CHOWDHURY, T. H. Technical-economical analysis of anaerobic digestion process to produce clean energy. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 7, p. 247–253, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.12.024>. Acesso em: 16 dez. 2021.

CIBIOGÁS - CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Biogasmapp**. [Foz do Iguaçu], 2021. 1 mapa, col. *Online*. Disponível em: <https://mapbiogas.cibiogas.org/>. Acesso em: 7 jan. 2021.

CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **PIB do Brasil apresenta forte retração por conta do coronavírus**. Brasília, DF: CNA 2020. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/boletins/pib-do-brasil-apresenta-forte-retracao-por-conta-do-coronavirus-agropecuaria-e-destaque-e-ainda-apresenta-crescimento>. Acesso em: 4 set. 2020.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, London, v. 387, n. 6630, p. 253–260, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/387253a0>. Acesso em: 1º jan. 2021.

CRESWELL, J. W.; ROCHA, L. O.; SILVA, M. I. C. E. **Projeto de pesquisa métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Porto Alegre: Artmed, 2007.

DANIEL-GROMKE, J. *et al.* Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany. **Chemie-Ingenieur-Technik**, Darmstadt, v. 90, n. 1/2, p. 17–35, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cite.201700077>. Acesso em: 7 fev. 2021.

DE BELLIS, N. **Bibliometrics and citation analysis: from the Science citation index to cybermetrics**. Lanham: Scarecrow Press, 2009.

DE VRIES, M.; DE BOER, I. J. M. Comparing environmental impacts for livestock products: a review of life cycle assessments. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 128, n. 1/3, p. 1–11, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>. Acesso em: 13 nov. 2021.

DEVI, L.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 24, n. 2, p. 125–140, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00102-2). Acesso em: 8 fev. 2021.

DIACONO, M. *et al.* Recycling agricultural wastes and by-products in organic farming: biofertilizer production, yield performance and carbon footprint analysis. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 14, [art.] 3824, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11143824>. Acesso em: 8 jul. 2021.

DUQUE-ACEVEDO, M. *et al.* Agricultural waste: review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. **Global Ecology and Conservation**, Amsterdam, v. 22, [art.]. e00902, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00902>. Acesso em: 2 ago. 2021.

FAN, Y. *et al.* Whole process phosphorus management strategy construction with phosphorus load characteristics, driver and efficiency from the material flow perspective. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 279, [art.] 122896, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122896>. Acesso em: 5 jul. 2021.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Livestock's long shadow: environmental issues and options**. Rome: FAO, 2006. *E-book*.

FOLEY, J. A. *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, London, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature10452>. Acesso em: 3 ago. 2021.

FREITAS, F. F. *et al.* The Brazilian market of distributed biogas generation: overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 101, p. 146–157, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>. Acesso em: 20 nov. 2021.

FU, F.; WANG, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 92, n. 3, p. 407–418, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>. Acesso em: 3 set. 2021.

GABAIX, X. Zipf's law for cities: an explanation. **The Quarterly Journal of Economics**, Cambridge, v. 114, n. 3, p. 739–767, 1999.

GEISSDOERFER, M. *et al.* The circular economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 143, p. 757–768, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em: 5 out. 2021.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The entropy law and the economic process**. 4th print. Cambridge: Harvard University Press, 1981.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 114, p. 11–32, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>. Acesso em: 3 ago. 2021.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002. v. 4

GOLDENBERG, M. **A arte de pesquisar: como fazer pesquisa qualitativa em ciências sociais**. Rio de Janeiro: Record, 2011.

GONTARD, N. *et al.* A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Boca Raton, v. 48, n. 6, p. 614–654, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1471957>. Acesso em: 8 set. 2021.

GRUNBAUM, R. Alternative energy sources in the USSR. **Ambio**, Stockholm, v. 7, n. 2, p. 49–55, 1978.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, Barking, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>. Acesso em: 10 jan. 2021.

HOODA, P. S. *et al.* A review of water quality concerns in livestock farming areas. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 250, n. 1/3, p. 143–167, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00373-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00373-9). Acesso em: 15 jan. 2021.

HUA, K. *et al.* Carbon sequestration efficiency of organic amendments in a long-term experiment on a vertisol in huang-huai-hai plain, China. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 9, n. 9, [art.] e108594, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108594>. Acesso em: 3 ago. 2021.

JJEMBA, P. K. The potential impact of veterinary and human therapeutic agents in manure and biosolids on plants grown on arable land: a review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 93, n. 1/3, p. 267–278, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00350-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00350-4). Acesso em: 18 jan. 2021.

KARSTEN, D. The limits to growth - Malthus revived. **Intereconomics**, Berlin, v. 7, n. 11, p. 343–345, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02929666>. Acesso em: 3 set. 2021.

KHOSHNEVISAN, B. *et al.* A critical review on livestock manure biorefinery technologies: sustainability, challenges, and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 135, [art.] 110033, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110033>. Acesso em: 8 set. 2021.

KOKOROPOULOS, P.; BENGTON, H. H. Methane production from livestock wastes by anaerobic digestion. *In: GATEWAY ENERGY CONFERENCE, 1978. Proceedings of the [...]. [S. l.: s. n.], 1978. p. 177–182.*

KOLPIN, D. W. *et al.* Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999-2000: a national reconnaissance. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 36, n. 6, p. 1202–1211, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es011055j>. Acesso em: 9 nov. 2021.

KREMEN, C.; MILES, A. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. **Ecology and Society**, Ottawa, v. 17, n. 4, [art.] 40, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5751/ES-05035-170440>. Acesso em: 1º ago. 2021.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017. p. 346.

LEIDEN UNIVERSITY. **VOSviewer - Visualizing scientific landscapes**. Leiden: Leiden University, 2021. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 11 fev. 2021.

MAGHANAKI, M. M. *et al.* Potential of biogas production in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 28, p. 702–714, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.021>. Acesso em: 3 maio 2021.

MALTHUS, T. R. **An essay on the principle of population: the 1803 edition**. New Haven: Yale University Press, 2018.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo: UNESP; Brasília: NEAD, 2010.

MCCORMICK, K.; KAUTTO, N. The bioeconomy in Europe: an overview. **Sustainability**, Basel, v. 5, n. 6, p. 2589–2608, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su5062589>. Acesso em: 10 abr. 2021.

MEADOWS, D. H. *et al.* The limits to growth. *In*: CONCA, K.; DABELKO, G. D. (ed.). **Green planet blues: critical perspectives on global environmental politics**. New York: Routledge, 2018. p. 25–29. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9780429493744>. Acesso em: 25 fev. 2021.

MEDEIROS, S. A. F. S.; SAMPAIO, F. G.; SOTTA, E. D. (coord.). **Nota técnica: diagnóstico da expansão da adoção da tecnologia de Tratamento de Dejetos Animais (TDA) no território brasileiro entre 2010 e 2019**. Brasília, DF: ABC, MAPA, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-supera-metas-na-pecuaria-sustentavel-com-aproveitamento-de-dejetos-animais/NotaTecnicaDiagnosticoTratamentodeDejetosAnimaisnoBrasilentre2010e2019MAPA.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2021.

MURRAY, B. C.; GALIK, C. S.; VEGH, T. Biogas in the United States: estimating future production and learning from international experiences. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, Berlin, v. 22, n. 3, p. 485–501, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9683-7>. Acesso em: 18 maio 2021.

PAGE, M. J. *et al.* PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. **The BMJ**, London, v. 372, n. 160, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>. Acesso em: 26 jul. 2021.

PALALLO, F.; ARDI, M.; YUSUF, G. The potency of livestock waste into renewable energy (Biogas) in Palipu District Tana Toraja Regency. *In*: JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, 2018, Makassar, Indonesia. **Proceedings of the [...]**. [S. l.: The

Electrochemical Society], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1028/1/012010>. Acesso em: 3 ago. 2021.

PALERMO, G. C.; D'AVIGNON, A. L. D. A.; FREITAS, M. A. V. Reduction of emissions from Brazilian cattle raising and the generation of energy: Intensification and confinement potentials. **Energy Policy**, Surrey, v. 68, p. 28–38, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.041>. Acesso em: 2 fev. 2021.

PARASCANU, M. M. *et al.* Life cycle assessment of electricity generation from combustion and gasification of biomass in Mexico. **Sustainable Production and Consumption**, Amsterdam, v. 27, p. 72–85, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.021>. Acesso em: 2 nov. 2021.

PARRALEJO, A. I. *et al.* Small scale biogas production with animal excrement and agricultural residues. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 131, p. 307–314, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.059>. Acesso em: 1º maio 2021.

PARRA-OROBIO, B. A. *et al.* Physicochemical, microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. **Sustainable Environment Research**, Amsterdam, v. 31, [art.] 11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00085-9>. Acesso em: 16 dez. 2021.

PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. **Economics of natural resources and the environment**. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990.

POST, P. M. *et al.* Effects of dutch livestock production on human health and the environment. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 737, [art.] 139702, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139702>. Acesso em: 4 fev. 2021.

POSTAWA, K.; SZCZYGIEL, J.; KUŁAŻYŃSKI, M. Innovations in anaerobic digestion: a model-based study. **Biotechnology for Biofuels**, London, v. 14, [art.] 19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01864-z>. Acesso em: 16 dez. 2021.

PRIETO-SANDOVAL, V. *et al.* Key strategies, resources, and capabilities for implementing circular economy in industrial small and medium enterprises. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, Chichester, v. 26, n. 6, p. 1473–1484, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/csr.1761>. Acesso em: 8 nov. 2020.

RAGAUSKAS, A. J. *et al.* The path forward for biofuels and biomaterials. **Science**, Washington, DC, v. 311, n. 5760, p. 484–489, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1114736>. Acesso em: 3 ago. 2021.

RAINE, A.; FOSTER, J.; POTTS, J. The new entropy law and the economic process. **Ecological Complexity**, Amsterdam, v. 3, n. 4, p. 354–360, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2007.02.009>. Acesso em: 20 nov. 2020.

REIS, E. *et al.* **Estatística aplicada**. 6. ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2015. 2 v.

RIBEIRO, E. M. *et al.* Feasibility of biogas and energy generation from poultry manure in Brazil. **Waste Management & Research**, London, v. 36, n. 3, p. 221–235, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X17751846>. Acesso em: 19 out. 2020.

RIBEIRO, E. M. *et al.* Power generation potential in posture aviaries in Brazil in the context of a circular economy. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 18, p. 153–163, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.10.009>. Acesso em: 19 out. 2020.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>. Acesso em: 15 out. 2020.

SANTOS, I. F. S. *et al.* Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, New York, v. 131, p. 54–63, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>. Acesso em: 9 nov. 2021.

SARASWAT, M. *et al.* Impact of variables affecting biogas production from biomass. *In*: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 2019, Greater Noida. [Proceedings ...]. Greater Noida: L Bajaj Institute of Technology and Management, 2019. v. 691, [paper 012043]. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/691/1/012043>. Acesso em: 25 nov. 2021.

SMITH, P. *et al.* Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 363, n. 1492, p. 789–813, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>. Acesso em: 8 jul. 2021.

SOBY, S. Thomas Malthus, Ester Boserup, and agricultural development models in the age of limits. **Journal of Agricultural and Environmental Ethics**, Dordrecht, v. 30, n. 1, p. 87–98, 2017.

SONG, C. C. S. The limits to growth. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 8, n. 4, p. 837–837, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1972.tb05230.x>. Acesso em: 5 ago. 2021.

SONODA, Y. Fuel gas production from organic wastes. **Journal of the Fuel Society of Japan**, Tokyo, v. 55, n. 592, p. 666–675, 1976. Disponível em: https://doi.org/10.3775/jie.55.8_666. Acesso em: 21 ago. 2021.

THE DOCUMENT FOUNDATION. **LibreOffice - A melhor suite office livre**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://pt-br.libreoffice.org/>. Acesso em: 24 abr. 2021.

TIAN, C. *et al.* Hydrothermal liquefaction for algal biorefinery: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 38, p. 933–950, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.030>. Acesso em: 19 out. 2021.

- TILMAN, D. *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, London, v. 418, n. 6898, p. 671–677, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature01014>. Acesso em: 5 nov. 2020.
- TILMAN, D. *et al.* Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. **Science**, Washington, DC, v. 294, n. 5543, p. 843–845, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1060391>. Acesso em: 5 nov. 2020.
- TOLBA, M. K.; BISWAS, A. K. (org.). **Earth and us: population, resources, environment, development**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991.
- TURNER, G. M. A comparison of the limits to growth with 30 years of reality. **Global Environmental Change**, Oxford, v. 18, n. 3, p. 397–411, 2008.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, Amsterdam, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.
- VILLA, R. *et al.* Ensiling for anaerobic digestion: a review of key considerations to maximise methane yields. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 134, [art.] 110401, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110401>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- VOORBURG, J. H. Intensive livestock farming and the environment (Dutch). **Bedrijfsontwikkeling**, Den Haag, v. 5, n. 9, p. 756–760, 1974a.
- VOORBURG, J. H. Some waste problems in pig production. **Agriculture and Environment**, Amsterdam, v. 1, n. 2, p. 175–190, 1974b. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0304-1131\(74\)90051-4](https://doi.org/10.1016/0304-1131(74)90051-4). Acesso em: 5 mar. 2021.
- WALTER, R. **The new worlds of Thomas Robert Malthus: rereading the principle of population**. [S. l.]: Taylor & Francis, 2019.
- WANG, Y.; LI, C.-X. Analysis and forecasting on carrying capacity of livestock breeding environment in Heilongjiang Province. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP ON EDUCATION TECHNOLOGY AND COMPUTER SCIENCE - ETCS 2009, 1., 2009, Wuhan, China. **Proceedings of the [...]**. Piscataway: IEEE, 2009. p. 647–654. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ETCS.2009.405>. Acesso em: 9 out. 2021.
- WANG, Y.-C. *et al.* Emissions, measurement, and control of odor in livestock farms: a review. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 776, [art.] 145735, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145735>. Acesso em: 4 set. 2021.
- WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v. 85, n. 4, p. 849–860, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>. Acesso em: 29 out. 2021.
- ZEA FERNANDEZ, J. S. *et al.* Virtual tool for the promotion of anaerobic conversion technologies of residual biomass in Colombian rural areas. *In*: IBERIAN CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES - CISTI, 15., 2020, Seville, Spain. **[Proceedings ...]**. Piscataway: IEEE, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.23919/CISTI49556.2020.9140945>. Acesso em: 27 out. 2021.

ZHAI, X.; SHANGJIE. Integrated evaluation PPC model of agricultural circular economy in the perspective of ecological restoration. **Advanced Materials Research**, Stafa-Zurich, v. 113–116, p. 750–756, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.113-116.750>. Acesso em: 25 jun. 2021.

ZHANG, C. *et al.* Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 38, p. 383–392, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>. Acesso em: 16 jun. 2021.

ZHANG, Q.-Q. *et al.* Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: Source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 49, n. 11, p. 6772–6782, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00729>. Acesso em: 17 fev. 2021.

ZHANG, Y. Study on corporate environmental performance evaluation based on circular economy. **Applied Mechanics and Materials**, Zug, v. 675–677, p. 1815–1818, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.675-677.1815>. Acesso em: 26 jan. 2021.