



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Jéssica Carvalho Sobczak

Produção de biofertilizante com resíduos da suinocultura: avaliação da influência da economia circular nas dimensões da sustentabilidade no agronegócio catarinense

Florianópolis
2021

Jéssica Carvalho Sobczak

Produção de biofertilizante com resíduos da suinocultura: avaliação da influência da economia circular nas dimensões da sustentabilidade no agronegócio catarinense

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestrado em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Caroline Rodrigues Vaz, Dra.

Coorientador: Prof. Mauricio Uriona Maldonado, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sobczak, Jéssica Carvalho

Produção de biofertilizante com resíduos da suinocultura
: avaliação da influência da economia circular nas
dimensões da sustentabilidade no agronegócio catarinense /
Jéssica Carvalho Sobczak ; orientadora, Caroline Rodrigues
Vaz, coorientador, Mauricio Uriona Maldonado, 2021.
117 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Biofertilizante. 3.
Economia Circular. 4. Dinâmica de Sistemas. 5. Simbiose
Industrial. I. Rodrigues Vaz, Caroline. II. Uriona
Maldonado, Mauricio. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção. IV. Título.

Jéssica Carvalho Sobczak

Produção de biofertilizante com resíduos da suinocultura: avaliação da influência da economia circular nas dimensões da sustentabilidade no agronegócio catarinense

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Mônica Cavalcanti Sá de Abreu, Dra.
Universidade Federal do Ceará

Prof. Hans Michael Van Bellen, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestra em Engenharia de Produção.

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.
Coordenador do Programa

Profa. Caroline Rodrigues Vaz, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2021.

Esse trabalho é dedicado as pessoas que estiveram ao meu lado nessa jornada, em especial, a minha mãe, Mirella Carvalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me dar forças para concluir o mestrado e a minha mãe Mirella, pelo apoio na minha decisão e por todo amor, paciência, incentivo e orações durante esse período, foi e é essencial ter você ao meu lado. Também agradeço ao meu noivo Fabio, pelos cuidados, dedicação e por estar ao meu lado em todos os momentos e ao meu padrasto Ernani, pelo apoio e carinho. Sei que tenho o amor de vocês para todas as minhas decisões.

Agradeço também a minha orientadora professora Caroline e ao meu coordenador professor Mauricio pela confiança ao me escolherem, pela ajuda e orientação. Apesar dos percalços durante esses 2 anos, finalizamos essa fase com muito sucesso.

Agradeço também aos colegas do grupo SINERGIA, em especial a Tainara, não poderia ter encontrado alguém melhor para compartilhar as dificuldades e alegrias dessa etapa tão cheia de emoções, é uma pessoa que levarei como amiga para a vida toda.

Por último, mas com certeza não menos importante, quero agradecer ao meu fiel companheiro, meu cachorro Kim, por estar há anos me acompanhando nessas loucuras da vida acadêmica, tem sido minha companhia em todos os dias que passei em frente ao computador por horas. É um amor incondicional, meu anjo.

“We are looking for patterns not certainty, because certainty does not exist, but the pattern gives us insight about which direction to move in. A circular economy reflects this more contemporary scientific understanding of how the world works”
(Ken Webster, Ellen MacArthur Foundation)

RESUMO

A cadeia do biogás atua de forma eficiente no gerenciamento residual devido ao seu processo ter como matéria-prima os resíduos orgânicos. Dentre seus benefícios, como a mitigação das emissões de gases do efeito estufa (GEEs), também pode auxiliar de forma satisfatória na redução do uso de fertilizantes minerais na agricultura por meio da utilização do biofertilizante. O biofertilizante trata-se de subproduto derivado da cadeia do biogás. Por isso, devido a essa cadeia produtiva se tratar de um processo que tem como princípio fechar o *loop* de materiais, o objetivo desse trabalho consistiu estimar o potencial da produção de biofertilizante da suinocultura de Santa Catarina e analisar as influências da circularidade nas dimensões da sustentabilidade. A metodologia adotada nesse estudo foi a revisão de literatura estruturada utilizando o método *Scientometric and Systematic Yielding Mapping Process* (SYSMAP) e a modelagem computacional por meio da Dinâmica de Sistemas. Com base nas informações e dados coletados, construiu-se um modelo para setor de suínos que então, possibilitou a simulação de diferentes cenários para estimar o potencial de produção de biofertilizante entre os anos de 2000 a 2050 e, posteriormente, identificar fatores que influenciam as dimensões da sustentabilidade: ambiental, econômica e social, relacionadas ao conceito da Economia Circular (EC). Até 2050 estima-se uma produção de 5,2 mil m^3 de biofertilizante. Dessa forma, os resultados da simulação, bem como da análise qualitativa, demonstram que esse potencial de produção de biofertilizante e sua cadeia apresentam benefícios ambientais quando se trata de emissões de GEEs e também do uso sustentável de recursos finitos ao incrementar o uso de biofertilizantes na agricultura, reduzindo assim, o consumo de fertilizantes minerais e, conseqüentemente, as emissões de N_2O . Ademais, apesar de ainda não apresentar grandes proporções, a produção de biofertilizante pode suprir um nicho de consumidores que desejam modelos de agricultura mais sustentáveis, em que essa sustentabilidade pode ser obtida não apenas na agricultura, mas também no gerenciamento adequado dos resíduos de outras cadeias para o fechamento do ciclo, como é o caso da suinocultura. No entanto, fatores negativos também são identificados no que diz respeito aos investimentos para a adesão dessa tecnologia quando comparadas a outros meios de tratamento, pois, a falta de subsídios para o setor se torna uma barreira e um desafio para os produtores devido ao alto custo. Por isso, aspectos identificados na Simbiose Industrial (SI) evidenciam que as políticas que visem promover práticas sustentáveis e que forneçam subsídios, além das demais ações que estimulem o conhecimento e troca de experiência para unir atores que possuam objetivos em comum, podem reduzir de forma significativa o tempo de ajuste para atingir metas e obter resultados mais satisfatórios relacionados ao tratamento de resíduos para a produção de biofertilizante. Destaca-se que estudo forneceu *insights* de fatores nas dimensões da sustentabilidade referentes a produção de biofertilizante para a suinocultura de Santa Catarina (SC), contudo, pode fornecer informações além desse setor e demais países, visto que a valorização residual e fechamento de ciclos é um dos pontos-chave para a EC.

Palavras-chave: Biofertilizante. Economia Circular. Dinâmica de Sistemas. Simbiose Industrial. Dejetos Suínos.

ABSTRACT

The biogas chain acts efficiently in the residual management due to its process using organic waste as raw material. Among its benefits, such as the mitigation of greenhouse gas emissions (GHGs) emissions, it can also satisfactorily assist in reducing the use of mineral fertilizers in agriculture through the use of biofertilizer. The biofertilizer is a sub-product derived from the biogas chain. For this reason, due to the fact that this production chain is a process that has the principle of closing the loop of materials, the objective of this work was to estimate the potential of biofertilizer production in the Santa Catarina swine industry and analyze the influences of circularity in the dimensions of sustainability. The methodology adopted in this study was the review of structured literature using the SYSMAP method and computational modeling through Systems Dynamics. Based on the information and data collected, a model for the swine sector was built, which then enabled the simulation of different scenarios to estimate the potential for biofertilizer production between the years 2000 to 2050 and, subsequently, identify factors that influence the dimensions of sustainability: environmental, economic and social, related to the concept of *circular economy* (CE). By 2050 it is estimated to produce 5.2 thousand m^3 of biofertilizer. In this way, the results of the simulation, as well as the qualitative analysis, demonstrate that this biofertilizer production potential and its chain present environmental benefits when it comes to emissions of GHGs and also the sustainable use of finite resources by increasing the use of biofertilizers in agriculture, thus reducing the consumption of mineral fertilizers and, consequently, emissions of N_2O . In addition, although it still does not have large proportions, the production of biofertilizer can supply a niche for consumers who want more sustainable models of agriculture, in which this sustainability can be obtained not only in agriculture, but also in the proper management of waste from other chains for the closing of the cycle, as is the case of pig farming. However, negative factors are also identified with regard to investments for the adhesion of this technology when compared to other means of treatment, since the lack of subsidies for the sector becomes a barrier and a challenge for producers due to the high cost. Therefore, aspects identified in Industrial Symbiosis (IS) show that policies that aim to promote sustainable practices and that provide subsidies, in addition to other actions that stimulate knowledge and exchange of experience to bring together actors that have common goals, can significantly reduce the adjustment time to achieve goals and obtain more satisfactory results related to the treatment of residues for the production of biofertilizer is significant. It is noteworthy that a study provided insights of factors in the dimensions of sustainability related to the production of biofertilizer for the swine farming of SC, however, it can provide information beyond this sector and other countries, since the residual valuation and closing cycles is one of the key points for CE.

Keywords: Biofertilizer. Circular Economy. Systems Dynamics. Industrial Symbiosis. Swine Wastes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de fertilizantes nitrogenados e emissão de N_2O (em CO_2 equivalente, AR5) na agricultura brasileira entre 1970 e 2016	19
Figura 2 – Economia linear versus economia circular.	26
Figura 3 – Definições da Economia Circular.	28
Figura 4 – Economia circular para o desenvolvimento sustentável.	29
Figura 5 – Representação de diferentes tipos de simbiose industrial.	30
Figura 6 – Fluxograma do projeto Monfort Boys Town em Fiji.	31
Figura 7 – Etapas do processo da digestão anaeróbica.	36
Figura 8 – (a) Modelo esquemático do reator CSTR; (b) Biodigestor CSTR.	37
Figura 9 – (a) Modelo esquemático do biodigestor de lagoa coberta; (b) Biodigestor de lagoa coberta.	37
Figura 10 – (a) Modelo esquemático do reator UASB; (b) Biodigestor UASB.	38
Figura 11 – (a) Modelo esquemático do reator anaeróbico com tecnologia Dranco; (b) Reator com tecnologia Dranco.	39
Figura 12 – Ciclo da cadeia do biogás.	39
Figura 13 – Aproveitamentos energéticos para biogás e biometano.	41
Figura 14 – Fluxograma das etapas metodológicas.	45
Figura 15 – Método SYSMAP (<i>Scientometric and sYStematic yielding MApping Process</i>).	46
Figura 16 – Etapas da revisão estruturada para biogás ou digestão anaeróbica.	47
Figura 17 – Etapas da revisão estruturada para biofertilizante.	48
Figura 18 – Etapas de modelagem.	49
Figura 19 – Polaridades: interpretação, representação matemática e exemplo.	51
Figura 20 – Modelo de simulação do setor de suínos utilizando o <i>software Stella</i>	54
Figura 21 – Conversão biológica nos sistemas anaeróbicos.	57
Figura 22 – Emissões de óxido nitroso da aplicação de fertilizantes orgânicos.	60
Figura 23 – Emissões de óxido nitroso da aplicação de ureia.	61
Figura 24 – Dados históricos e simulados referente ao número de cabeças de suínos.	63
Figura 25 – Análise de sensibilidade.	64
Figura 26 – Consumo mundial de fertilizantes: passado e projeções (1960 – 2050).	65
Figura 27 – Estimativa de emissões do setor agropecuário em 2019.	67
Figura 28 – Tratamento de dejetos de suínos em Santa Catarina	73
Figura 29 – Potencial de produção de biofertilizante - BAU	74
Figura 30 – Emissão de óxido nitroso - biofertilizante (CO_2eq)	75
Figura 31 – Emissão de óxido nitroso - uréia (CO_2eq)	76
Figura 32 – Emissão de óxido nitroso - uréia (CO_2eq)	77

Figura 33 – Variáveis de relação na dimensão ambiental	78
Figura 34 – Variáveis de relação na dimensão econômica	79
Figura 35 – Variáveis de relação na dimensão social	81
Figura 36 – Relações entre as três dimensões da economia circular: ambiental, econômica e social	82
Figura 37 – Dejetos tratados com tempo de ajuste de 30 anos	84
Figura 38 – Objetivos estratégicos do Programa Nacional de Bioinsumos - Pro- grama Nacional de Bioinsumos (PNB)	85
Figura 39 – Dejetos tratados em diferentes tempos de ajustes	88
Figura 40 – Relação de fatores da simbiose industrial na cadeia de biofertilizante (em roxo).	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Barreiras/facilitadores para a SI.	32
Quadro 2 – Objetivos específicos e metodologia	44
Quadro 3 – Ações para as barreiras para a SI na agropecuária.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição típica do biofertilizante.	41
Tabela 2 – Parâmetros para o cálculo do potencial oriundo de resíduos suínos.	55
Tabela 3 – Parâmetros para aplicação de fertilizantes orgânicos.	59
Tabela 4 – Parâmetros para aplicação de ureia.	60
Tabela 5 – Indicadores de acurácia.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
BAU	<i>Business-as-Usual</i>
CE	<i>circular economy</i>
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
CLD	<i>Causal Loop Diagram</i>
CSTR	<i>Continuous Flow Stirred Tank Reactor</i>
DA	digestão anaeróbica
DAP	Di-Amônio-Fosfato
DQO	demanda química de oxigênio
DS	Dinâmica de Sistemas
EC	Economia Circular
EI	Ecologia Industrial
GEEs	gases do efeito estufa
GHGs	greenhouse gas emissions
GWP	Global Warming Potential
IS	Industrial Symbiosis
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MAP	Mono-Amônio-Fosfato
MP	material particulado
Plano ABC	Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono
PNB	Programa Nacional de Bioinsumos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RSU	resíduos sólidos urbanos
SC	Santa Catarina
SI	Simbiose Industrial
SYSMAP	<i>Scientometric and Systematic Yielding Mapping Process</i>
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i>
WoS	<i>Web of Science</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

N_2O	óxido nitroso
CO_2	dióxido de carbono
CH_4	metano
ton	toneladas
H_2O	água
O_2	oxigênio
S_2	enxofre
H_2S	sulfeto de hidrogênio
NO_2	dióxido de nitrogênio
N	nitrogênio
P	fósforo
K	potássio
R^2	Coeficiente de Determinação
kg	quilograma
m^3	metro cúbico
CO_{2eq}	dióxido de carbono equivalente
NH_3	amônia
NO_x	óxidos de nitrogênio
ha	hectare
NH_4^+	amônio
C	carbono
Tm	Terametro - 10^{12} metros
NO_3^-	nitrato
Mt	Megatonelada - 10^6 toneladas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	JUSTIFICATIVA	22
1.4	ESCOPO DA PESQUISA	24
1.5	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	25
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	ECONOMIA CIRCULAR	26
2.2	SIMBIOSE INDUSTRIAL	29
3	CADEIA DO BIOGÁS – BIOFERTILIZANTE	34
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	43
4.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	43
4.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	44
4.2.1	Revisão de literatura estruturada - SYSMAP	45
4.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS	49
4.3.1	Diagrama de relações causais	50
5	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS	53
5.1	MODELO DE SIMULAÇÃO	53
5.1.1	Setor de suínos	53
5.1.2	Emissões de N_2O	58
5.2	VALIDAÇÃO DO MODELO	61
5.2.1	Testes de validação estrutural	61
5.2.2	Testes de validação comportamental	62
5.2.3	Análise de sensibilidade	63
6	RESULTADOS	65
6.1	REVISÃO DE LITERATURA ESTRUTURADA	65
6.1.1	Biofertilizante e Economia Circular	65
6.1.2	Biofertilizante e Simbiose Industrial	72
6.2	ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE	73
6.2.1	Cenário BASE - BUSINESS AS USUAL (BAU)	73
6.3	ANÁLISE DA SIMBIOSE INDUSTRIAL PARA A ECONOMIA CIRCULAR	84
6.3.1	Políticas para a redução de tempo de ajuste	87
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92

7.1	LIMITAÇÕES DO ESTUDO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – EQUAÇÕES RETIRADAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO CONSTRUÍDO NO SOFTWARE STELLA	114

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a sociedade se depara com diversos desafios ambientais como a escassez de recursos naturais, degradação do solo, superpopulação e, em especial, as mudanças climáticas. Isso se deve principalmente ao aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEEs), em que de acordo com o IPCC (2018), são constituintes gasosos da atmosfera, naturais e antropogênicos que absorvem e emitem radiação em comprimentos de onda específicos dentro do espectro da radiação terrestre emitida pela superfície da Terra, a própria atmosfera e pelas nuvens.

As emissões de GEEs são decorrentes de diversas atividades, sobretudo as relacionadas ao uso de combustíveis fósseis, tendo como um dos fatores de impacto nesse consumo, o constante crescimento populacional global. Esse crescimento causa aumento na demanda de alimentos e energia, contribuindo significativamente com as emissões, à proporção que a alimentação implica na intensificação do setor agropecuário para suprir essa necessidade. Além disso, sabe-se que embora os gases como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) sejam emitidos de forma natural na atmosfera, as atividades humanas mudaram as suas concentrações.

Em geral, esses gases são dominados pelo CO_2 , porém, as emissões que são não- (CO_2) , como metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), representam mais de 34% do total de emissões de GEEs, incluindo a Mudança de Uso da Terra (UNEP, 2019). Além do mais, as fontes agrícolas estão entre as maiores fontes global de emissões não- (CO_2) , responsáveis por 65% das emissões antrópicas de N_2O , sendo a grande maioria decorrente de mudanças de terras, fertilizantes sintéticos e aplicação de esterco (CORNEJO; WILKIE, 2010).

Por essas razões, prevenir e limitar esses efeitos das ações humanas nas mudanças climáticas tem recebido cada vez mais atenção dos formuladores de políticas, organizações, indústrias e cidadãos, ou seja, constata-se que a necessidade de tecnologias sustentáveis, ações e políticas são cruciais para mitigar as mudanças climáticas (NIZAMI *et al.*, 2017). Ainda nesse cenário, é possível perceber a existência de uma lacuna entre sustentabilidade ambiental e crescimento econômico, visto que para esse crescimento não são contabilizados a degradação dos ecossistemas e perda dos recursos naturais, causando uma degradação do meio ambiente de forma mais acelerada.

Tendo em vista a necessidade da implementação de tecnologias mais sustentáveis na agropecuária, a cadeia do biogás, a qual gera biogás e biofertilizante, emerge como uma opção interessante para tal finalidade, partindo do princípio que se trata de uma fonte energética renovável proveniente de resíduos orgânicos, satisfazendo também pontos importantes como a gestão dos resíduos, bem como sua valorização. Ademais, o biogás é uma alternativa que possui benefícios adicionais, em razão que não reduz apenas a emissão de CO_2 e CH_4 , mas também de óxidos de nitrogênio,

hidrocarbonetos e partículas (BÖRJESSON; BERGLUND, 2006).

Um ponto fundamental, é que durante a produção de biogás, tem-se a geração de um subproduto denominado digestato, também chamado de biofertilizante, que é o produto de ênfase e interesse para esse estudo tratando-se da cadeia do biogás. Quando utilizado na agricultura, é considerado uma maneira eficiente de reciclar a biomassa e os nutrientes, beneficiar o solo, reduzir a fabricação e o uso de fertilizantes minerais, mitigar as emissões de GEEs e aumentar o sequestro de carbono no solo (TSACHIDOU *et al.*, 2019a), evidenciando assim o conceito da economia circular (EC).

De acordo com a Ellen MacArthur Foundation (2017), a EC é concebida como um ciclo contínuo de desenvolvimento positivo que preserva e aprimora o capital natural, otimiza a produtividade de recursos e minimiza riscos sistêmicos gerando estoques finitos e fluxos renováveis. Nesse caso, a destinação de resíduos para o tratamento por meio da digestão anaeróbica (DA) representa um sistema integrado de produção de energia renovável, utilização de recursos, tratamento de resíduos orgânicos, reciclagem e a redistribuição de nutrientes, gerando benefícios agrícolas e ambientais interligados (HOLM-NIELSEN *et al.*, 2009). Isso acontece porque há o fechamento do ciclo produtivo ao reaproveitar o que seria descartado para gerar valor agregado.

Uma alternativa para promover essa circularidade nos processos produtivos é por meio da simbiose industrial (SI). A SI acontece quando as empresas colaboram na troca e compartilhamento de materiais em excesso, água e subprodutos de uma empresa na matéria-prima de produção de outra com o objetivo básico de reduzir economicamente seus impactos ambientais (CHERTOW, 2000), por isso, se apresenta como uma ferramenta importante para que o modelo de EC venha a se torna predominante em relação a atual economia linear.

Portanto, a falta de uma análise quantitativa e qualitativa das barreiras e benefícios ambientais, econômicos e sociais, obtidos com o fechamento de ciclos objetivando a transição para a economia circular por meio da simbiose industrial na agropecuária, ainda é uma lacuna que prejudica o entendimento do grau de importância do desenvolvimento do setor com a adoção de práticas sustentáveis.

Com isso, para compreensão do desenvolvimento dessa pesquisa, no próximo tópico apresenta-se o problema de pesquisa.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

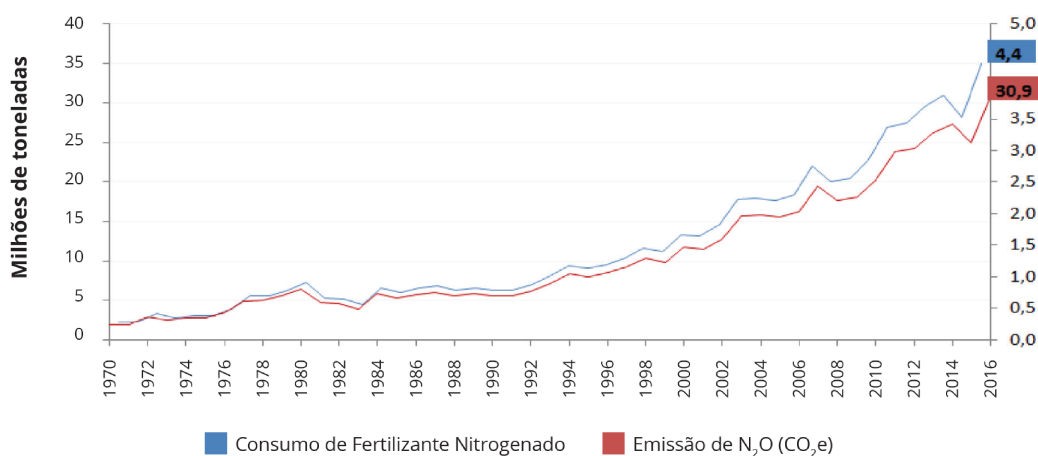
Com o crescimento populacional, estima-se que em 2050, a nível global, a produção anual de cereais aumentará em 46% (em torno de 940 milhões de toneladas) e a produção de carne em quase 76% (aproximadamente 200 milhões de toneladas), ainda que este setor exigiria amplos aumentos na produção de alimentos concentrados. Como exemplo, quase 60% dos 443 milhões de toneladas adicionais de milho produzidos anualmente até 2050 seriam para ração animal e a produção de soja precisaria

aumentar em quase 80% (390 milhões de toneladas) em 2050 (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012).

Entre os anos de 2000 a 2015, o uso de fertilizantes no Brasil cresceu 87%, contribuindo, em parte, para o significativo aumento de 150% na produção de grãos, no mesmo período. Entretanto, a produção nacional de fertilizantes é historicamente muito inferior à demanda interna, não apresentando crescimento similar ao demandado. Em razão disso, a dependência em relação às importações vem aumentando ano após ano, e, em 2015, entre 65% e 70% do consumo total foi suprido por importações (CRUZ *et al.*, 2017).

Conforme ilustrado na figura 1, é possível perceber que as emissões de N_2O - expressas em CO_2 equivalente (resultado da multiplicação das toneladas emitidas de gases de efeito estufa pelo seu potencial de aquecimento global), relativas ao uso de fertilizantes é expressiva e vem crescendo entre os anos de 1970 - 2016, devido ao aumento da demanda agrícola.

Figura 1 – Consumo de fertilizantes nitrogenados e emissão de N_2O (em CO_2 equivalente, AR5) na agricultura brasileira entre 1970 e 2016



Fonte – SILVEIRA *et al.* (2018), p. 25

A agricultura mundial é responsável por aproximadamente 10 a 12% do total das emissões antropogênicas globais de gases de efeito estufa (GEEs), que representam 60% e 50% das emissões globais de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), respectivamente (LINQUIST *et al.*, 2012).

Com isso, para evitar maior aceleração da poluição ambiental causada pela produção e uso de fertilizantes minerais na agricultura, a reciclagem de resíduos orgânicos digeridos anaerobicamente da pecuária, parece ser uma abordagem promissora (TSACHIDOU *et al.*, 2019b).

Os resíduos animais (esterco), quando mal tratado ou mal gerido tornam-se uma importante fonte de poluição do ar e da água, como a lixiviação de nutrientes,

principalmente nitrogênio e fósforo, evaporação de amônia e contaminação por patógenos são algumas das principais ameaças (HOLM-NIELSEN *et al.*, 2009). A ideia de considerar o esterco como um recurso, não como um desperdício, tem sido central para grande parte do pensamento mais recente sobre todo o assunto do bom gerenciamento agrícola (BURTON; TURNER, C., 2003).

Esses resíduos da pecuária estão resultando em problemas cada vez maiores devido as suas projeções de crescimento. Conforme destacado por Mathias (2014), o Brasil é um dos maiores produtores (4^o lugar) e também exportadores de carne suína (4^o lugar), sendo que, de acordo com a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), em 2019 foram exportados 750 mil ton de carne suína, e mais da metade desse montante foi decorrente da criação em Santa Catarina (SC), correspondendo a 55,65% dessas exportações. Nesse mesmo ano, foram contabilizadas 7.590.827 cabeças de suínos no estado, representando 27,25% da produção brasileira e gerando aproximadamente 6,2 milhões de ton de dejetos nesse período. Isso significa que, o setor de suínos de SC representa uma parcela significativa da produção e exportação do país, que em sistemas intensivos, produzem uma grande quantidade de resíduos, sendo assim, foi definida como a região de estudo.

Além disso, de acordo com dados da Companhia Integrativa de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina - CIDASC (2021), a exportação de carne suína no estado cresceu mais de 25% em 2020 com relação a 2019, indicando que há uma tendência de crescimento na criação para os próximos anos visando suprir a demanda. Com isso, o tratamento e manejo desses resíduos da suinocultura é de grande preocupação nas áreas rurais devido aos seus impactos ambientais.

Nesse cenário, as tecnologias renováveis são consideradas como uma rota importante para a sustentabilidade e – conseqüentemente – há grandes esforços políticos para aumentar sua participação no consumo global (RAVEN *et al.*, 2009). E diante dos desafios atuais, os processos de transição começaram a ganhar relevância na sociedade, onde esses processos significam a incorporação de novas tecnologias e conseqüentes mudanças em setores estratégicos significativos (GEELS, 2010).

Esses mudanças estão relacionadas em parte ao modelo produtivo, que atualmente é predominante linear, extração > consumo > descarte. Em contrapartida, o modelo de EC tem como objetivo manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de vida útil e valor ao fechar os ciclos de produção, propondo-se alcançar ganhos nas três dimensões da EC: ambiental, econômica e social. Por isso, destinar corretamente os dejetos suínos para reaproveitamento é a maneira mais adequada para essa finalidade.

No tratamento dos resíduos de animais, o propósito é reaproveitar os dejetos de maneira que haja uma redução nos riscos de poluição ambiental, além de aproveitar os nutrientes para a agricultura (CARDOSO *et al.*, 2015). Há diversos processos

que visam tratamento como as lagoas de decantação, esterqueiras, biodigestores, compostagem, entre outros.

No caso da suinocultura no estado, de acordo com Kunz *et al.* (2005), a maior parte da produção de suínos concentra-se nas regiões oeste e sul, caracterizada por pequenas propriedades e, a dimensão das propriedades e o relevo acidentado da região fazem com que não haja área agrícola suficiente para a aplicação agrônômica de todo o resíduo gerado pela suinocultura nessas propriedades, fazendo com que grande parte dos dejetos sejam depositados no solo sem qualquer tipo de tratamento. Isso indica que apesar de haver meios de tratamento, nem sempre os produtores podem absorver essa demanda e os recursos são desperdiçados no setor.

Por isso, buscando facilitar essa transição para processos fechados e circulares, a SI traz uma abordagem de coletividade através de troca de recursos e, assim como na EC, cria “situações ganha-ganha” para todas as empresas envolvidas, bem como medidas de desempenho ambiental aprimoradas a partir das atividades de simbioses criadas (MARTIN; EKLUND, 2011). Sendo assim, políticas, ações e demais aspectos que possam incentivar essa cooperação entre atores no gerenciamento residual, pode auxiliar no processo de circularidade para o beneficiamento desse subproduto ser distribuído a demais produtores e agricultores ao ser produzido por indústrias de fertilizantes.

Isto é, ao fechar os *loops* dos processos anteriormente lineares por meio do gerenciamento adequado dos resíduos, a DA pode enfrentar esses desafios relacionados ao desperdício, energia, produção sustentável de alimentos e reciclagem de nutrientes de maneira sustentável e circular, à medida em que o uso do digestato, além de fornecer o acesso aprimorado das plantas ao nitrogênio, reduz as emissões de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) (LYBÆK; KJÆR, 2017), também reduzindo a dependência de fertilizantes minerais. Por esses motivos, realizar uma análise qualitativa de cenários futuros e identificar os fatores – os benefícios e as barreiras – nas dimensões da sustentabilidade associadas a essa produção de biofertilizante, além de quais aspectos podem favorecer a circularidade, se tornam importante para o setor da agropecuária.

Diante do exposto, definem-se as seguintes perguntas de pesquisa:

1. Qual o potencial de produção de biofertilizante proveniente de dejetos suínos da região de Santa Catarina até 2050?
2. Quais são os fatores¹ que influenciam as dimensões econômica, ambiental e social na produção de biofertilizantes?
3. Quais aspectos da simbiose industrial podem promover a circularidade na agropecuária por meio da produção de biofertilizante?

¹ Elementos que contribuem ou influenciam na obtenção de um resultado - positivos ou negativos.

1.2 OBJETIVOS

Apresenta-se a seguir os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial da produção de biofertilizante da suinocultura de Santa Catarina e analisar as influências da circularidade nas dimensões da sustentabilidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a. Fundamentar a definição do biofertilizante como o produto da cadeia do biogás relacionando-o ao conceito de economia circular;
- b. Construir um modelo de dinâmica de sistemas para a cadeia do biogás a fim de estimar o potencial de produção de biofertilizante;
- c. Identificar os fatores nas três dimensões da economia circular relativos a produção de biofertilizante;
- d. Analisar aspectos da simbiose industrial para impulsionar a economia circular na agropecuária por meio da produção de biofertilizante.

1.3 JUSTIFICATIVA

O aumento das emissões de GEEs, o aumento do consumo global, a poluição da água, a diminuição da fertilidade da terra e a gestão de resíduos ineficiente, são os resultados do mau gerenciamento dos recursos naturais em todo o mundo, onde a cadeia do biogás mostra-se como um componente importante para combater esses problemas (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019).

Em geral, nas pesquisas referentes a cadeia do biogás a ênfase é dada apenas para o biogás, tanto para a finalidade de produção de energia elétrica e/ou térmica quanto da transformação em biocombustível. Porém, o subproduto digestato, é de grande importância ao se considerar as emissões de N_2O na agricultura e seu potencial de aquecimento global, bem como o uso desenfreado dos fertilizante minerais que ocasionam diversos problemas ambientais.

Ao gerenciar os resíduos orgânicos provenientes da pecuária para a produção de biofertilizante, busca-se valorizar esses dejetos como recursos ativo e trazer novamente para a cadeia produtiva, estabelecendo um grande avanço nas questões ambientais, sendo de suma importância para o controle das emissões de GEEs, como o CH_4 , bem como na mitigação do uso de recursos virgens e finitos para a geração de novos produtos, como é o caso dos fertilizantes minerais.

Nesse contexto, tem-se o conceito de economia circular, que se baseia no reaproveitamento, valorização, reciclagem e aproveitamento dos ciclos naturais. De acordo com Chojnacka *et al.* (2020), na concepção de tecnologias de fertilizantes de base biológica, os seguintes aspectos são importantes: o impacto ambiental deve ser minimizado, os recursos devem ser usados de forma regenerativa com a consideração da questão da escassez de recursos, as tecnologias devem assegurar lucratividade e benefícios econômicos.

Por isso, identificar quais os benefícios e as barreiras para a adoção da tecnologia por meio da DA para o tratamento de dejetos, pode auxiliar os atores e partes interessadas a analisar quais são as vantagens desse tratamento e quais pontos podem ser otimizados para que esse potencial de ganha-ganha em todas as dimensões seja real.

Além disso, visando a circularidade na agropecuária, foi empregue o conceito de SI para analisar fatores relacionados ao sistema e que podem ter influência direta no estímulo para a produção de biofertilizante. Pois, de acordo com Domenech *et al.* (2019), SI foi identificada como uma abordagem prática para fechar o ciclo dos processos de fabricação, transformando os resíduos de diferentes processos em matéria-prima para outras partes e, portanto, permitindo a transição de sistemas com desperdício para sistemas de ciclo fechado, como é o caso da cooperação entre produtores-indústrias.

Isto significa que, esses fatores identificados, tanto relacionados a EC quanto a SI, podem servir como apoio para formuladores de políticas para a criação de programas, ações e demais atividades que visem promover essa tecnologia e modelo produtivo sustentável por meio destinação adequada dos dejetos e sua valorização, bem como a troca entre partes interessadas objetivando a produção de biofertilizante.

Em complemento as duas teorias e devido a complexidade do sistema, para melhorar a sua compreensão, foi utilizada a modelagem de Dinâmica de Sistemas (DS), pois segundo Dianati *et al.* (2021), o sistema de resíduos envolve processos distintamente dinâmicos, como a acumulação, esgotamento e degradação dos estoques de resíduos.

Essa metodologia tem sido utilizada em outros trabalhos, como é o caso de Turner *et al.* (2016) que teve como objetivo discutir o papel da DS para aplicações relacionadas aos desafios do século XXI referentes as questões de agricultura e gerenciamento de recursos naturais. Já no caso dos resíduos, em especial os resíduos sólidos urbanos (RSU), os autores Dianati *et al.* (2021) trazem em seu estudo a DS para investigar o impacto esperado nas emissões de GEEs e $PM_{2.5}^2$ de (i) uma iniciativa de conversão de resíduos em biogás e (ii) uma proibição regulatória da queima a céu aberto de resíduos em aterros.

Também utilizando a metodologia de DS, mas de forma a analisar as relações,

² Partículas finas de poluição com menos de 2,5 milionésimos de metro.

no trabalho de Roubik *et al.* (2020), os autores fazem uso do Diagrama de *Loop* Causal – *Causal Loop Diagram* (CLD) para compreender o desenvolvimento da tecnologia do biogás na perspectiva dos agricultores. Com esse estudo qualitativo, é possível analisar as variáveis do sistema e quais possuem maior influência na decisão dos agricultores quanto a produção de biogás.

Portanto, por se tratar de um sistema complexo e que envolve diversas partes interessadas como produtores, agricultores, indústrias de fertilizantes, consumidores, entre outros, a modelagem de DS que permite uma análise quantitativa e qualitativa, pode fornecer dados relevantes para compreender de forma mais efetiva essas relações entre as diferentes variáveis do sistema.

Dessa forma, a importância dessa pesquisa consiste em gerar conhecimento e informações úteis de como esses recursos podem ser otimizados e aproveitados dentro do ciclo produtivo para mitigar problemas relacionados ao desenvolvimento sustentável, trazendo uma visão mais abrangente e visual do processo por meio da simulação e dos diagramas de *loop* causal. Ou seja, busca identificar e apresentar como os fatores relacionados ao gerenciamento dos resíduos da suinocultura, tanto em aspectos ambientais, como econômicos e sociais, podem ser benéficos ou uma barreira para a economia circular no setor agropecuário ao reduzir o uso de fertilizante minerais e favorecer o gerenciamento residual, podendo fornecer *insights* para formuladores de políticas. Além disso, visa analisar os fatores relacionados a simbiose industrial, que é um conceito que pode estimular a circularidade e beneficiar diferentes atores por meio da cooperação entre produtores e indústrias que possuem objetivos em comum.

1.4 ESCOPO DA PESQUISA

O escopo dessa pesquisa é referente a produção de biofertilizante com dejetos provenientes da suinocultura da região de SC. Esse processo de tratamento por meio da digestão anaeróbica (DA) permite que ocorra a circularidade na agropecuária ao gerar um produto de valor agregado a partir de dejetos e que retorna para a agricultura por meio da substituição e/ou complemento aos fertilizantes minerais.

Dessa forma, por se tratar de um processo que visa o fechamento de ciclos no setor, essa circularidade permite que sejam identificados fatores que possuem influência nas três dimensões da sustentabilidade na agropecuária com relação ao conceito de economia circular e simbiose industrial, objetivando assim, uma análise qualitativa e quantitativa apenas com relação ao processo de produção de biofertilizante.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Essa pesquisa é de caráter simulacional que utiliza a abordagem de Dinâmica de Sistemas, considerada uma metodologia e técnica de simulação computacional para esquematizar, entender e discutir problemas e assuntos complexos, seu uso é para estimar e analisar o potencial da produção de biofertilizante provenientes de dejetos suínos em Santa Catarina a fim de identificar aspectos qualitativos nas dimensões sustentáveis da economia circular.

Com isso, a pesquisa se delimita aos aspectos técnicos apenas relacionados ao dados indispensáveis para a construção do modelo computacional, não adentrando em termos técnicos, dados técnicos e demais processos posteriores para o uso final do produto, pois trata-se uma análise quantitativa e qualitativa de como a digestão anaeróbica pode influenciar na sustentabilidade.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente documento está estruturado em 7 capítulos:

Capítulo 1: corresponde à contextualização, o problema de pesquisa, além da apresentação dos objetivos, justificativas e delimitação da pesquisa do presente estudo.

Capítulo 2: envolve a teoria de fundamentação, caracterizada pela Economia Circular e Simbiose Industrial.

Capítulo 3: apresenta a teoria acerca da cadeia de biogás para a produção de biofertilizante.

Capítulo 4: envolve a classificação da pesquisa e método científico, descrição das etapas metodológicas definidas para alcance dos objetivos propostos nesse trabalho, a revisão de literatura estruturada utilizada – SYSMAP e as etapas adotadas para a construção do modelo de simulação e diagrama de *loop* causal.

Capítulo 5: apresenta os dados inerentes a construção do modelo, o modelo de simulação e a sua validação.

Capítulo 6: apresenta os resultados da revisão de literatura, dos cenários simulados e a descrição dos fatores nas três dimensões da economia circular. Além disso, também traz o conceito de simbiose industrial como ferramenta para impulsionar a economia circular no setor.

Capítulo 7: nesse capítulo são feitas as considerações finais referente ao trabalho, além das limitações da pesquisa e recomendações futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ECONOMIA CIRCULAR

O modelo econômico linear de produção, é uma forma de produção baseada na extração crescente de recursos naturais, em que os produtos feitos a partir desses recursos são utilizados até virarem resíduos. Porém, devido aos impactos ambientais negativos, esse modelo a longo prazo atingirá os limites planetários, ou seja, limites ambientais seguros dentro dos quais a humanidade pode se desenvolver sem que os impactos causados ao meio ambiente sejam irreversíveis, e chegarão a níveis insustentáveis de continuação.

As questões ambientais relacionadas as mudanças climáticas, esgotamento dos recursos naturais e perdas de biodiversidade, são fatores exógenos aos regimes predominantes (principalmente aos que são relacionados ao uso dos combustíveis fósseis), com isso, esses fatores exercem uma pressão, forçando esses regimes a buscarem alternativas de reagir e se adaptar a essas mudanças necessárias. Porém, para que as mesmas venham a ocorrer, é imprescindível que essas alterações sejam feitas a nível global, associadas as mudanças culturais, políticas, tecnológicas, bem como padrões de consumo.

Figura 2 – Economia linear versus economia circular.



Fonte – Adaptado de Sauv  et al. (2016), p. 52.

Conforme a figura 2, a economia linear (representada   esquerda), que atualmente   o modelo mais predominante globalmente, n o considera os impactos ambientais que acompanham o consumo de recursos e a disposi o dos res duos, o que acarreta na extra o desenfreada, polui o e desperd cio de materiais virgens. Como   um processo de in cio-fim,   frequentemente ilustrada como uma linha, sendo da extra o   disposi o, onde os potenciais retornos   Terra s o perdidos pela polui o. No caso da economia circular (  direita), considera-se o impacto do consumo de mate-

riais e desperdícios no meio ambiente, criando um ciclo "fechado", onde os recursos estão em movimentos circulares dentro de um sistema de produção e consumo.

Com isso, a EC se destaca pelo fato de enfatizar a importância da busca de soluções científicas para fechar o ciclo, que, ao invés de encerrar a produção e o consumo com a disposição de resíduos, o lixo é minimizado na origem e devolvido à economia para reutilização (BALANAY; HALOG, 2019). Indo em direção oposta a da reciclagem tradicional, a EC enfatiza a reutilização de produtos, componentes e materiais, remanufatura, acondicionamento, reparos, cascadeamento e beneficiamento, bem como solar, eólica, biomassa e utilização de energia derivada de resíduos em toda a cadeia de valor do produto e ciclo de vida do "berço ao berço" (KORHONEN *et al.*, 2018).

Apesar do seu conceito não estar totalmente definido e a expressão "economia circular" ainda permaneça aberta, em geral deve incluir pelo menos a noção de redução de insumos, reutilização e reciclagem de resíduos (HOMRICH *et al.*, 2018). Ou seja, na prática, visa minimizar o desperdício e a utilização excessiva de recursos transformando mercadorias no final da sua vida útil e resíduos gerados durante a fabricação e utilização de mercadorias em recursos para a fabricação de outros produtos (INGRAO *et al.*, 2018).

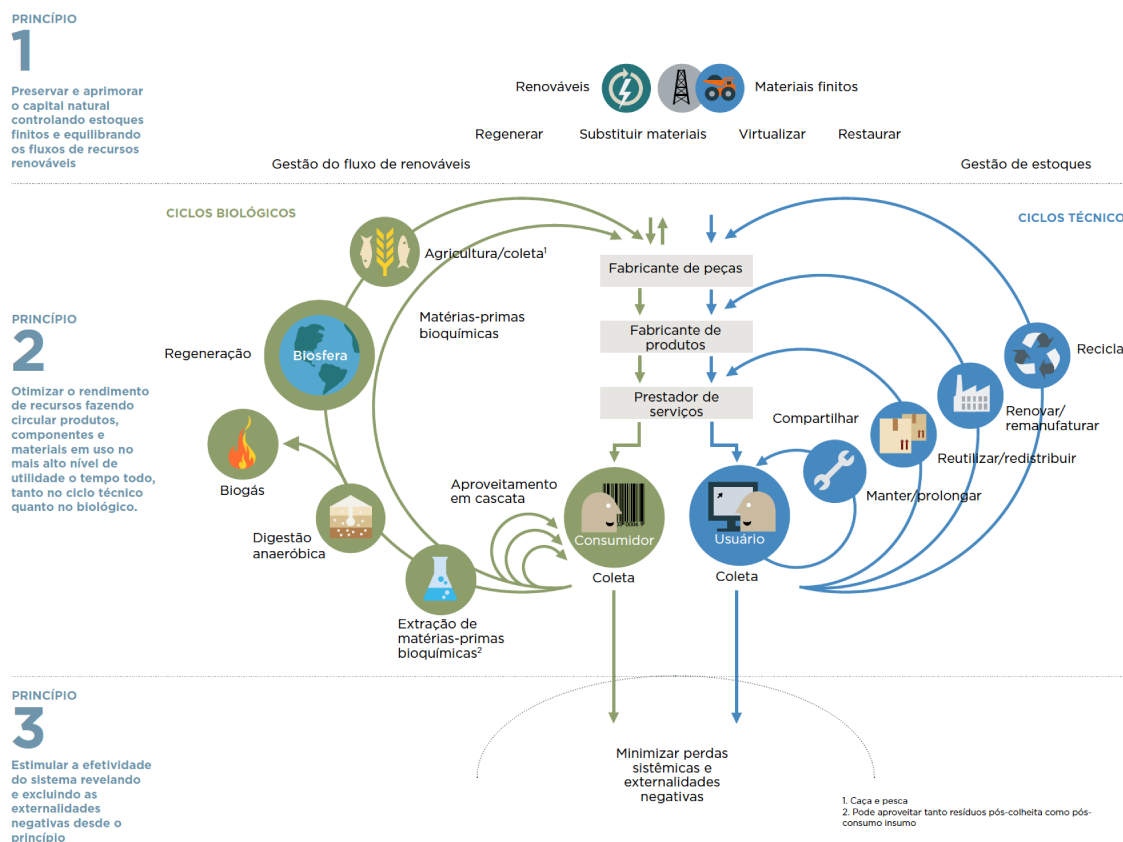
A Ellen MacArthur Foundation (2017), possui três princípios que apoiam o conceito de economia circular, conforme a figura 3. O princípio 1 diz respeito a preservação e aprimoramento do capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis. O princípio 2 é baseado na otimização do rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico. E por fim, o princípio 3 se refere a estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio.

Há também princípios que permitem o desenvolvimento da circularidade, e, de acordo com CIRAIG (2015), baseiam-se nas argumentações da adoção do pensamento sistêmico (efeitos e impactos refletidos em todo o sistema e todos devem se preocupar), onde: os resíduos são tão essenciais quanto os alimentos (e não deve ser apenas jogado fora), a força na diversidade (multipartidária, multissetorial e multilateral na participação, coordenação e cooperação), a otimização dos resíduos (encontrar o valor agregado) e uso das energias renováveis (para evitar o esgotamento de fontes de energia não renováveis, como combustíveis fósseis).

Além disso, segundo Korhonen *et al.* (2018), uma economia circular que obtém bons resultados é decorrente da contribuição nas três dimensões do desenvolvimento sustentável: ambiental, econômico e social. Os autores ainda apresentam as vantagens relacionadas a essas dimensões na entrada e saída dos processos, conforme figura 4.

A sustentabilidade ambiental é definida como a desmaterialização da atividade

Figura 3 – Definições da Economia Circular.

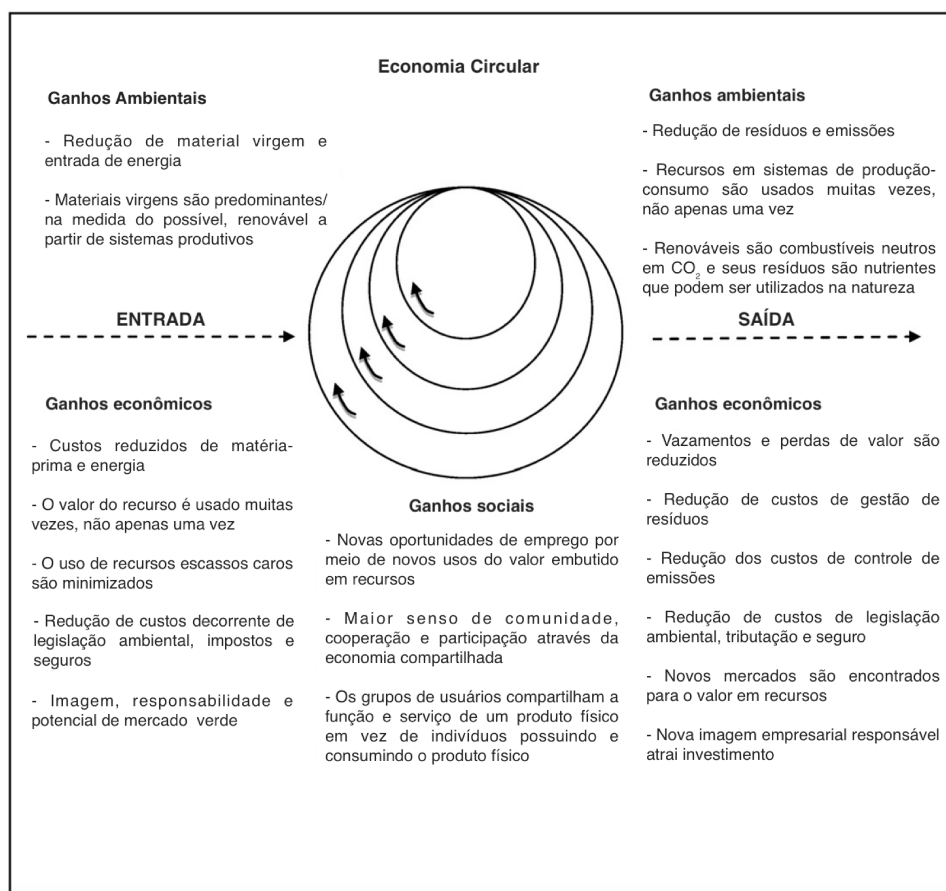


Fonte – Ellen MacArthur Foundation (2017), p. 6.

econômica, pois uma diminuição do processamento de material pode reduzir a pressão sobre os sistemas naturais e ampliar a prestação de serviços ambientais (BARTELMUS, 2003), isto é, uma redução absoluta ou relativa na quantidade de materiais necessários para atender as funções econômicas. Vindo de encontro a essa definição, a sustentabilidade econômica pode ser definida como a manutenção do capital natural e produzido, condição necessária para um crescimento econômico seja positivo e não decrescente. A rigor, essa sustentabilidade na dimensão econômica só pode ser melhorada, e não garantida, pela manutenção do capital natural (BARTELMUS, 2003). Por fim, a sustentabilidade social se refere ao comprometimento com a sociedade e comunidade em geral, podendo apresentar de maneiras como a proteção ambiental, planejamento da comunidade, igualdade nas oportunidades de emprego, serviços sociais em geral de conformidade com o interesse público (VENTURINI, 2015).

No entanto, apesar de avanços referentes ao desenvolvimento sustentável, a economia global ainda é dominada pelo modelo linear de produção, o qual baseia-se predominantemente pela extração e descarte, não levando em consideração modos mais sustentável. Dessa modo, visando promover essa circularidade através de objetivos em comum, a SI pode ser considerada uma ferramenta para auxiliar nessa

Figura 4 – Economia circular para o desenvolvimento sustentável.



Fonte – Adaptado de Korhonen *et al.* (2018), p. 40.

transição sustentável, como uma estratégia para fechar o fluxo de materiais por meio da cooperação entre diferentes partes interessadas (SAAVEDRA *et al.*, 2018).

2.2 SIMBIOSE INDUSTRIAL

O conceito da SI surge por meio da Ecologia Industrial (EI), a qual visa projetos de sistemas industriais, onde os subprodutos, considerados resíduos por uma empresa, possam ser utilizados como matéria-prima por outra empresa, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais causados pelas indústrias, à medida em que forma ciclos fechados de material e uso de energia dentro do sistema (POSCH, 2010; CHERTOW, 2000).

A simbiose industrial foi definida como o envolvimento de “setores tradicionalmente separados em uma abordagem coletiva para obter vantagem competitiva envolvendo a troca física de materiais, energia, água e subprodutos.”(CHERTOW, 2007). Para Jensen *et al.* (2011), a relação simbiótica acontece quando ocorre uma parceria e aproximação entre dois ou mais atores de setores, que em situações normais de atividades não possuiriam contato e conseqüentemente, não haveria a necessidade

de conhecimentos práticos dos processos operacionais uns dos outros.

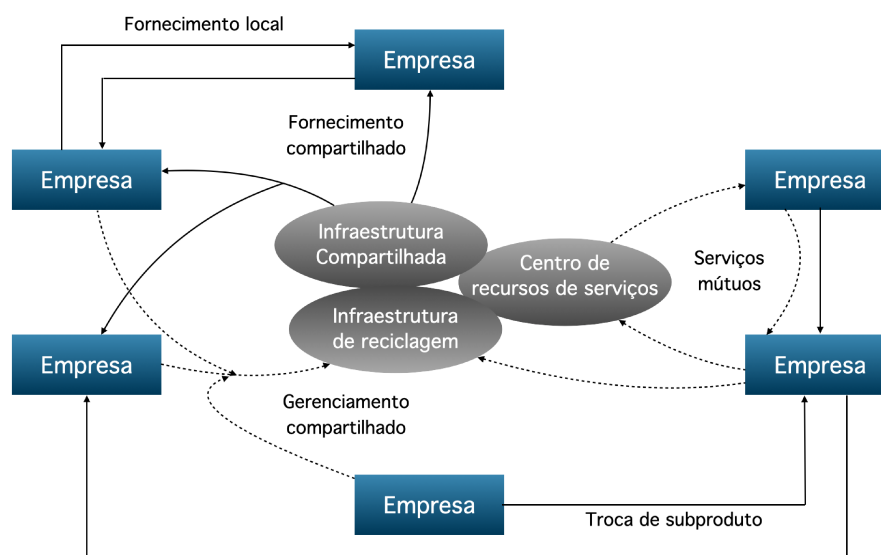
E como destacado por Chertow (2000), a SI tem como pontos principais a colaboração e as possibilidades sinérgicas decorrentes da proximidade geográfica. Assim como Posch (2010) afirma que, em geral, o conceito de EI não se aplica a apenas uma empresa, mas sim a nível local ou regional, para que possa ocorrer de fato a cooperação interorganizacional para o desenvolvimento sustentável.

No entanto, os autores Lombardi e Laybourn (2012) abordam que não necessariamente a proximidade geográfica é um fator decisivo para ocorrer a simbiose, pois esse embasamento é feito por meio dos custos do transporte do materiais comparados aos benefícios da cooperação, se são viáveis para essa relação.

Dessa forma, a simbiose vem despertando cada vez mais atenção por conta dos seus benefícios, pois seus elementos têm contribuído para uma transição sustentável e principalmente, auxiliando no que diz respeito ao desenvolvimento da economia circular (LINDFORS *et al.*, 2020), a qual possui visões importantes para que a economia linear se torne menos predominante.

Conforme a figura 5, a ISIE (2015) ilustra as várias redes de possibilidade de simbiose industrial, onde é possível analisar como as redes de colaboração podem criar um ecossistema de produção sustentável, visando reduzir o desperdício e a poluição, enquanto promove a eficiência e o compartilhamento de conhecimento.

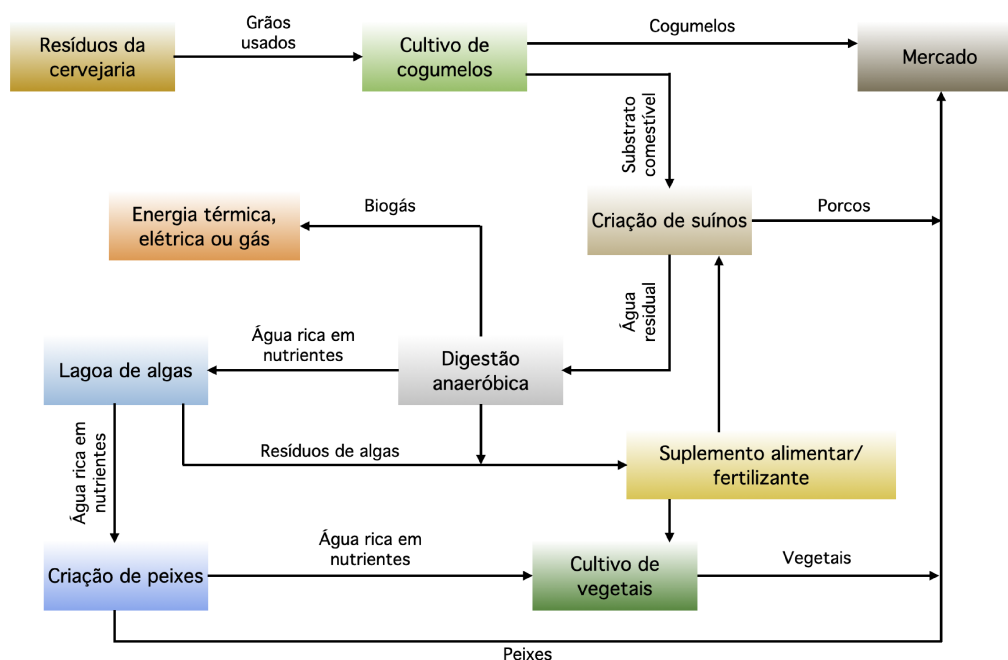
Figura 5 – Representação de diferentes tipos de simbiose industrial.



Fonte – Adaptado de ISIE (2015), p. 4.

Um exemplo prático é apresentado por Chertow (2000), no qual o projeto Monfort Boys Town em Fiji foi idealizado para os resíduos gerados por uma cervejaria, onde os grãos utilizados seriam lançados ao mar, causando problemas ambientais em especial para os corais. A figura 6 ilustra essa rede de cooperação.

Figura 6 – Fluxograma do projeto Monfort Boys Town em Fiji.



Fonte – Adaptado de Chertow (2000), p. 324.

Nesse projeto, os resíduos da cervejaria são utilizados como substratos no cultivo de cogumelos, os quais decompõem resíduos que se tornam alimento para a criação de suínos. Posteriormente, os resíduos gerados na criação de suínos são processados por um digestor anaeróbico, e esse processo fornece produto para diferentes setores, como é o caso do biogás para a geração de energia e o subproduto tratado é destinado para a criação de peixes, bem como como fertilizante orgânico para o cultivo de vegetais. Esse tipo de projeto que mistura agricultura e indústria, é conhecido como um bioecossistema integrado.

Desse modo, além fatores relacionados a cooperação como visto anteriormente, há um conceito importante para a SI que trata a respeito da capacidade institucional. Essa teoria se relaciona a capacidade institucional interna dos atores envolvidos para se engajar e desenvolver a colaboração e cooperação em direção a simbiose.

Segundo Healey *et al.* (2003), a capacidade institucional tem três dimensões: recursos de conhecimento, recursos relacionais e capacidade de mobilização. Os recursos de conhecimento são com base em conhecimento explícitos e tácitos, sistematizados e experienciais, aos quais os atores têm acesso. Os recursos relacionais são relativos a gama de atores envolvidos e o alcance do conhecimento, é o grau de qualidade dessas interações. Por fim, a capacidade de mobilização é referente a estrutura e os meios pelos quais os recursos de conhecimento e os recursos relacionais são formados e mobilizados (HEALEY *et al.*, 2003; WANG, Q. *et al.*, 2017; BOONS *et al.*, 2011)

Portanto, o desenvolvimento da SI reflete a habilidade das diferentes partes interessadas relevantes de abordar coletivamente o problema e buscar juntos soluções para tal. Isso se dá por meio dos conhecimentos através de experiências, relação de confiança e troca entre os atores, além da busca de um ambiente favorável para mobilizar recursos necessários.

Essa teoria se trata da manutenção de recursos visando um melhor sistema da gestão ambiental em direção a economia circular. Contudo, barreiras institucionais, regulatórias e financeiras podem ocasionar dificuldades nessas mudanças. De acordo com os autores Golev *et al.* (2014), as barreiras podem ser resumidas a 7 (sete) categorias: compromisso com o Desenvolvimento Sustentável, Informação, Cooperação, Técnico, Regulatório, Comunidade, Econômico, apresentados no quadro 1:

Quadro 1 – Barreiras/facilitadores para a SI.

Categoria	Descrição
1. Compromisso com o Desenvolvimento Sustentável	A estratégia organizacional, as metas e as métricas de desempenho devem motivar os gestores a se engajarem em projetos sinérgicos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da empresa.
2. Informação	Os dados qualitativos e quantitativos detalhados sobre os fluxos de resíduos e as necessidades de materiais/água/energia das indústrias locais fornecem o início da sinergia entre as empresas.
3. Cooperação	A cooperação e a confiança entre os atores, o compartilhamento de informações e o desenvolvimento de redes são fatores essenciais para novos projetos de sinergia.
4. Técnico	A viabilidade técnica é condição indispensável. A falta de conhecimento técnico dentro das indústrias pode ser uma barreira adicional para um novo projeto.
5. Regulatório	As incertezas na legislação ambiental e as dificuldades para obter aprovações para projetos de reaproveitamento de resíduos por parte das autoridades regulatórias também podem ser um obstáculo. Contudo, requisitos legais obrigatórios para reciclar materiais específicos, impostos mais altos para descarte de resíduos e assim por diante, servem como incentivos.
6. Comunidade	A conscientização da comunidade (dos impactos ambientais e econômicos que as indústrias geram) pode servir tanto para iniciar ou interromper o desenvolvimento de projetos. Dessa forma, a comunicação bem estabelecida entre as indústrias e a comunidade local, bem como programas de educação ambiental, ajudam a garantir o <i>status</i> legítimo de novas sinergias.
7. Econômico	Com a sinergia entre as empresas, são esperados resultados econômicos positivos aliado aos benefícios ambientais. A viabilidade econômica pode resultar em aumento de receita, redução de custos de insumos, redução de custos operacionais e diversificação e/ou garantia de abastecimento de água, energia e materiais.

Fonte – Adaptado de Golev *et al.* (2014), p. 143

A questão da sustentabilidade é o foco desse conceito, porém, para que essa transição sustentável aconteça é necessário o envolvimento de todos os atores relevantes, como as indústrias, reguladores, diferentes grupos de interesse, consumidores, famílias, e assim por diante (POSCH, 2010).

3 CADEIA DO BIOGÁS – BIOFERTILIZANTE

O uso e produção de biogás tem crescido rapidamente ao longo dos anos, principalmente devido à crescente importância da implantação de energias renováveis no que diz respeito à mitigação estruturada de emissões de GEEs e a necessidade de manejo sustentável de resíduos orgânicos (POESCHL *et al.*, 2012).

Essa produção faz parte do ciclo global do carbono. Anualmente, a biodegradação natural de matéria orgânica em condições anaeróbicas libera entre 590 milhões e 800 milhões de toneladas de metano na atmosfera (MILANEZ *et al.*, 2018).

Ao realizar a digestão anaeróbica controlada do material orgânico, de acordo com Ward *et al.* (2008), pode trazer benefícios ao meio ambiente de duas formas:

- Ao conter os processos de decomposição em um ambiente fechado, o CH_4 potencialmente prejudicial é impedido de ser liberado na atmosfera, e a subsequente queima do gás libera CO_2 neutro em carbono de volta ao ciclo do carbono.
- A energia obtida com a combustão do metano, poderá substituir os combustíveis fósseis, reduzindo assim a produção de CO_2 que não faz parte do recente ciclo do carbono.

Com isso, os sistemas de recuperação de biogás exploram esses processos bioquímicos para decompor vários tipos de biomassa. Destaca-se que o biogás tem “pegada negativa de carbono”, pois não somente é de baixa emissão, como também mitiga a poluição que seria causada, em caso de não aproveitamento, pelos próprios resíduos que constituem suas fontes de matéria-prima. Assim, o metano que iria para a natureza, poluindo o solo e a atmosfera, se transforma em fonte de energia. (MILANEZ *et al.*, 2018).

A produção de biogás acontece por meio da digestão anaeróbica (DA), alimentada com uma variedade de biomateriais (BACIOCCHI *et al.*, 2013; WARD *et al.*, 2008), sendo esse um processo pelo qual quase todo resíduo orgânico pode ser convertido biologicamente na ausência de oxigênio. Este é um processo complexo, pois requer condições ambientais específicas e diferentes populações bacterianas. Populações bacterianas mistas degradam compostos orgânicos, produzindo assim, o produto final, uma valiosa mistura de alta energia de gases (principalmente CH_4 e CO_2) denominada biogás (LASTELLA *et al.*, 2002).

De acordo com Nkoa (2013), existem sete linhas principais de exploração da digestão anaeróbica: (a) tratamento de lodo de esgoto municipal, (b) tratamento de águas residuais industriais de agro-alimentos e indústrias de fermentação, (c) tratamento de resíduos de animais (esterco), (d) tratamento de orgânicos da fração de resíduos sólidos urbanos, (e) co-digestão de resíduos animais e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, (f) tratamento de culturas energéticas e (g) co-digestão de pastas de animais com culturas energéticas.

Independente do substrato utilizado, o processo de digestão anaeróbia ocorre através do mesmo processo, podendo ser dividido em quatro fases, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos e podem requerer diferentes condições ambientais.

Os principais parâmetros que influenciam o processo de digestão anaeróbia são:

Ausência de oxigênio: as bactérias metanogênicas são essencialmente anaeróbias. Quando em presença de oxigênio, a decomposição não produz metano, apenas CO_2 ;

Composição do substrato: a matéria-prima é um dos fatores determinantes da eficiência do processo. Quanto maior a carga orgânica contida no substrato, maior a produção de biogás;

Temperatura: a alteração da temperatura pode acarretar em desequilíbrio das bactérias e culturas envolvidas no processo de digestão, por isso o processo pode ser mesofílico¹ ou termofílico²;

pH: o pH também tem influência direta na atividade dos microrganismos, sendo que cada fase do processo tem um valor considerado ideal.

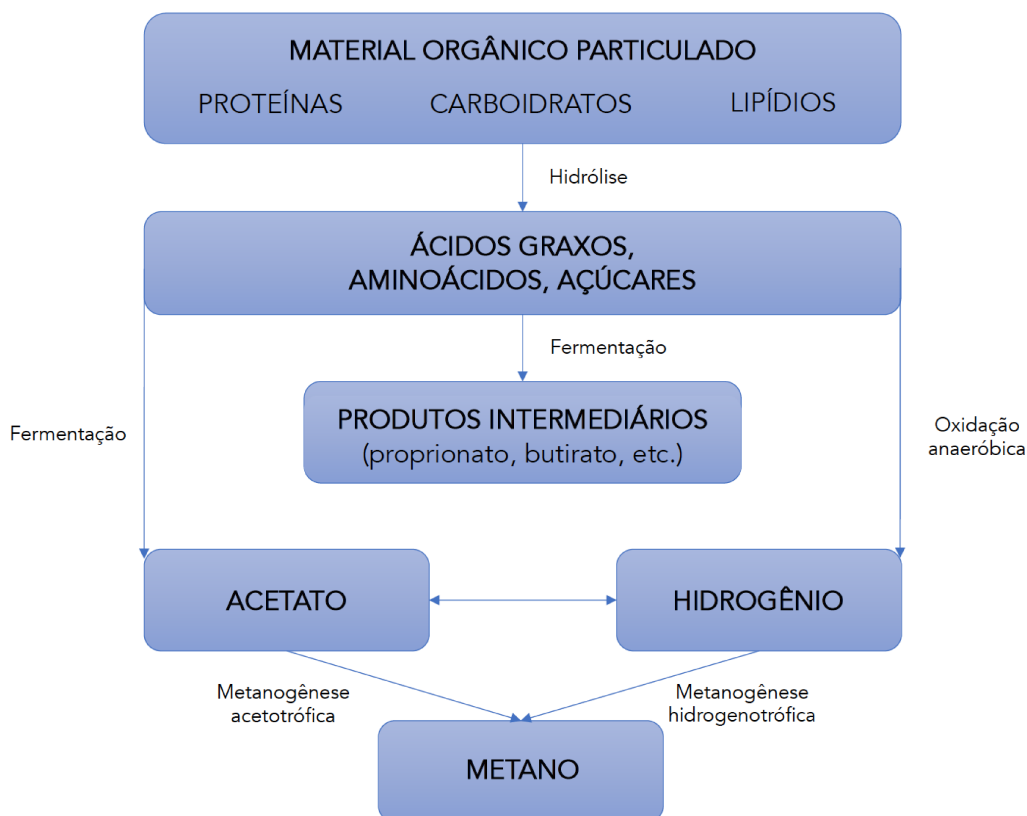
Ou seja, a bioquímica e a microbiologia da DA é um processo biogênico complexo que envolve várias populações microbianas, frequentemente ligadas por seus substratos individuais e especificidades do produto. Como mostrado na figura 7, a conversão de ingredientes complexos do substrato ocorre através da formação de vários produtos intermediários. O primeiro grupo de organismos que ocorre na digestão anaeróbica são as bactérias fermentativas hidrolíticas (acidogênicas). Essas bactérias hidrolisam o substrato polimérico complexo em ácidos orgânicos, álcoois, açúcares, hidrogênio e dióxido de carbono. O segundo grupo são organismos produtores de hidrogênio e acetogênicos, que convertem os produtos de fermentação da etapa anterior (hidrólise e acidogênese) em acetato e dióxido de carbono. O terceiro grupo são os metanógenos, que convertem compostos simples como ácido acético, metanol e dióxido de carbono + hidrogênio em metano (HUTNAN *et al.*, 2000). A metanogênese é a etapa de maior sensibilidade do processo. Qualquer concentração de oxigênio é tóxica aos microrganismos e pH baixo inibem sua atividade (PROBIOGÁS, 2015).

Tratando-se dos equipamentos utilizados para esse processo, Karellas *et al.* (2010) destacam que os digestores anaeróbicos são separados de acordo com seu tipo de operação. Os requisitos básicos de um projeto de digestor anaeróbico são: permitir uma taxa de carga orgânica continuamente alta e sustentável, um tempo de retenção hidráulico curto (para minimizar o volume do reator) e produzir o volume máximo de metano (WARD *et al.*, 2008).

¹ Os microrganismos que crescem geralmente em temperaturas que variam de 20 a 40 °C.

² São microrganismos que crescem geralmente em temperaturas que variam de 45 a 80 °C.

Figura 7 – Etapas do processo da digestão anaeróbica.

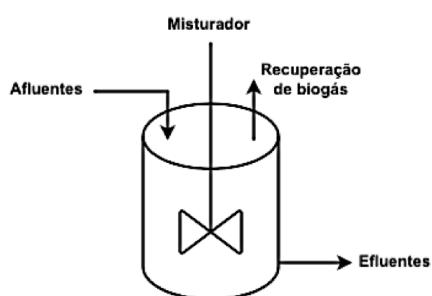


Fonte – Adaptado de Hutnan *et al.* (2000), p. 375.

Os reatores *Continuous Flow Stirred Tank Reactor* (CSTR), são reatores tanque agitados continuamente, assumindo uma mistura perfeita. Por se tratar de uma agitação contínua, não há alterações de concentração e temperatura dentro do reator, o material é disperso uniformemente por todo o vaso (FOGLER, 2014). A mistura serve para garantir a transferência eficiente de material orgânico para a biomassa microbiana ativa, além da liberação de bolhas de gás presas no meio e também impedir a sedimentação de material particulado mais denso (WARD *et al.*, 2008). A PROBIOGÁS (2015) aborda que há duas versões: 1) versão básica: especialmente empregados para o tratamento de dejetos animais, têm construção, equipamentos, operação e manutenção relativamente simples; 2) versão avançada: são utilizados para substratos complexos, com altas cargas orgânicas e têm processo de construção mais elaborado, com reatores mais altos e misturadores centrais, necessitando de um maior investimento. Normalmente são reatores utilizados para tratamento de resíduos da agricultura (cana-de-açúcar) e também em alguns casos de resíduos de animais (esterco) (OLIVEIRA, L. G. S. D.; NEGRO, 2019).

No caso dos resíduos de animais, segundo L. G. S. De Oliveira e Negro (2019), geralmente são utilizadas lagoas cobertas. Este sistema tira proveito do baixo requisito de manutenção de uma lagoa enquanto captura o biogás sob uma cobertura imper-

Figura 8 – (a) Modelo esquemático do reator CSTR; (b) Biodigestor CSTR.



(a)

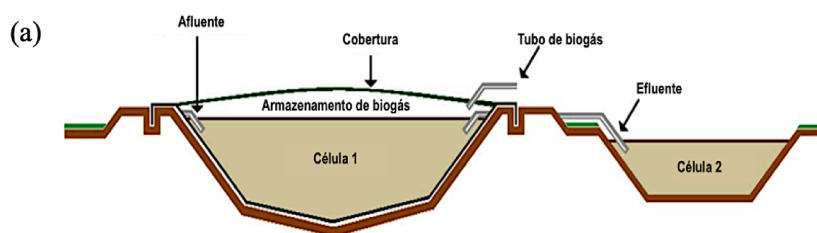


(b)

Fonte – (a) Autoria própria (2020); (b) Portal do Biogás (2017).

meável. A primeira célula de uma lagoa de duas células é coberta e a segunda célula é descoberta (figura 9). Ambas as células são necessárias para o sistema operar devidamente. Uma lagoa fornece armazenamento e também tratamento. O nível de líquido da segunda célula deve subir e descer para gerar armazenamento. O nível da primeira célula permanece constante para promover a decomposição eficiente do esterco (HAMILTON, 2014).

Figura 9 – (a) Modelo esquemático do biodigestor de lagoa coberta; (b) Biodigestor de lagoa coberta.



(a)

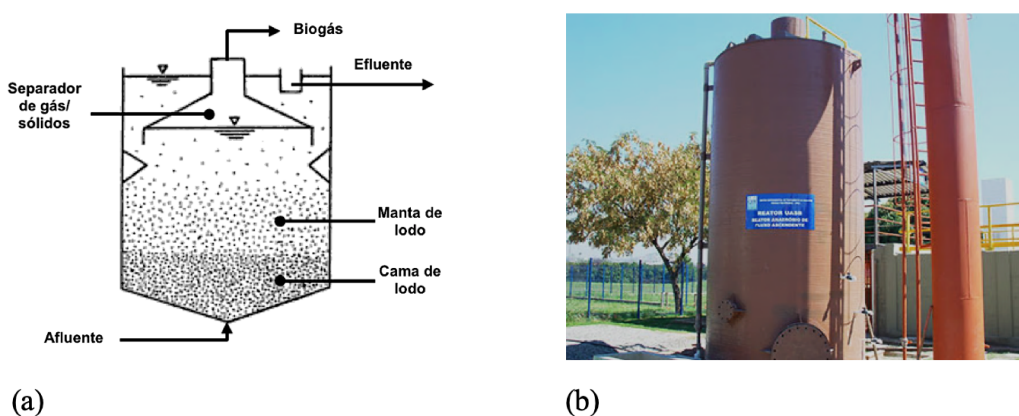


Fonte – (a) Adaptado de Hanif (2013), p. 14; (b) AQUALIMPIA ENGINEERING E.K. (2020).

Já os reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor* (UASB), também co-

nhecido como reator anaeróbico de manta de lodo, são os reatores mais compactos utilizados para o tratamento de efluentes industriais e esgoto sanitário (PROBIOGÁS, 2015). Esse modelo consiste em um tanque que contém no fundo um sistema de digestão e na parte superior um decantador precedido por um sistema de separação de gás, conforme figura 10. O resíduo líquido sendo tratado é distribuído uniformemente no reator a partir do fundo e então atravessa uma camada biológica de lama, a qual permite que a matéria orgânica insolúvel permaneça presa, reduzindo o tempo de retenção de matéria orgânica no biodigestor, posteriormente transformando o material orgânico em biogás (NOGUEIRA, 1986).

Figura 10 – (a) Modelo esquemático do reator UASB; (b) Biodigestor UASB.



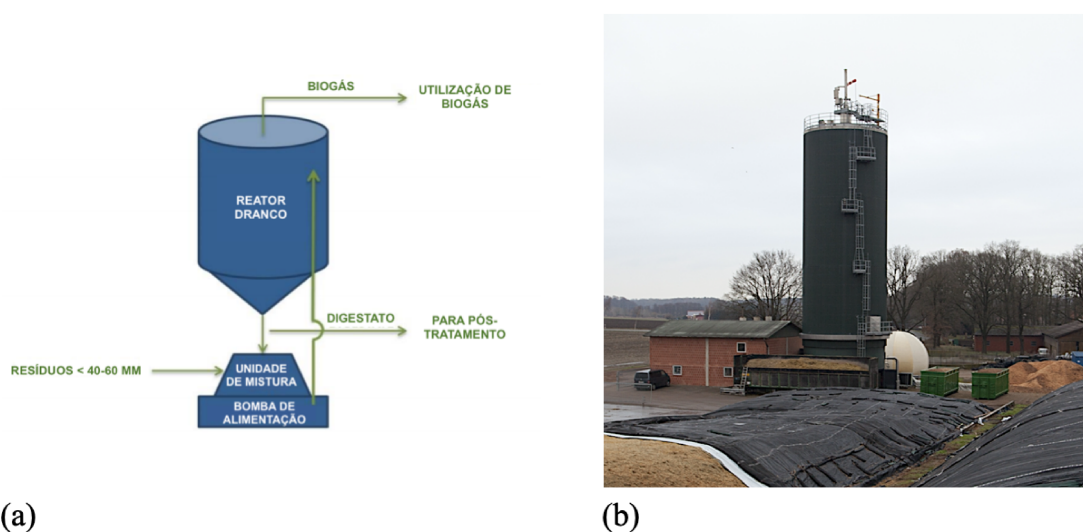
Fonte – (a) Adaptado de Silva *et al.* (2016), pág. 518; (b) Versiani (2005), p. 27.

Outro tipo de reator que pode ser utilizado são os reatores de digestão anaeróbica seca, podendo ser dividido em dois tipos: úmidos ou secos. Reatores úmidos são aqueles com um valor total de sólidos de 16% ou menos, enquanto reatores secos têm entre 22% e 40% de sólidos totais, e aqueles que se enquadram entre úmidos e secos são considerados semi-secos. Esse tipo de reator é utilizado para resíduos sólidos urbanos (MATA-ALVAREZ, 2015; PROBIOGÁS, 2015). Um exemplo de reator é o Dranco (Compostagem Anaeróbica Seca), sendo um processo de digestão anaeróbica de fluxo contínuo, composto de estágio único (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese em um único reator) capaz de processar substratos com alto teor de sólidos (15% a 40%) (LIMA, H.; MARTINS, 2014), conforme a figura 11.

Porém, a PROBIOGÁS (2015) destaca que a escolha de tecnologias para o tratamento e aproveitamento do biogás depende da composição, quantidade, continuidade de produção do biogás e das condições locais da planta e não do tipo de substrato utilizado.

A figura 12 representa de forma ilustrativa e simplificada esse processo. Inicialmente tem-se os resíduos, os quais podem ser de animais, resíduos sólidos urbanos, da agricultura e saneamento (podendo ter outros, conforme citado anteriormente), os

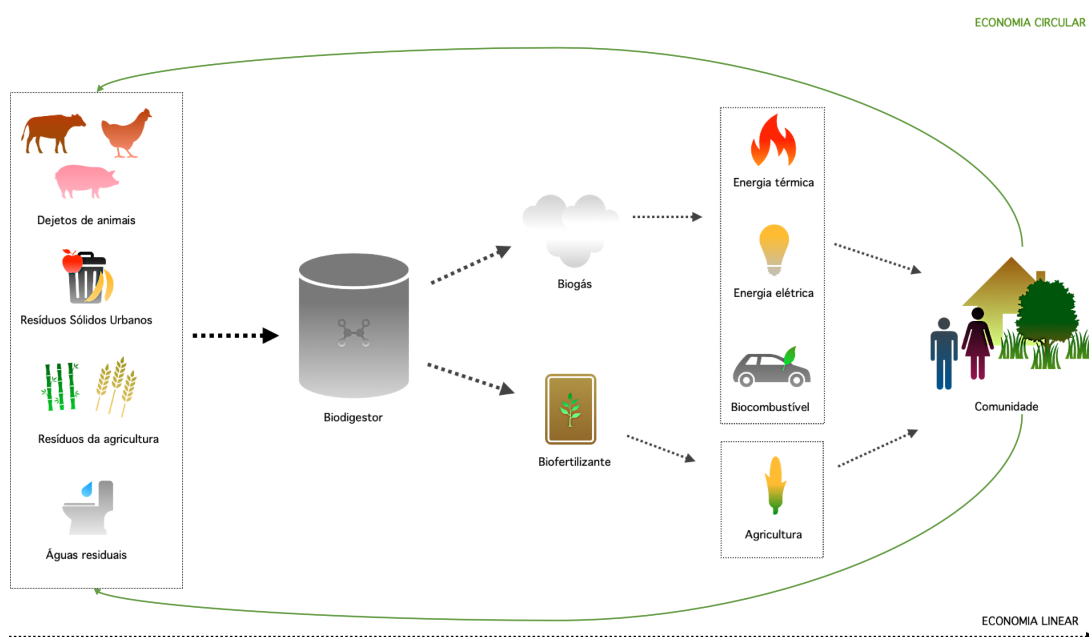
Figura 11 – (a) Modelo esquemático do reator anaeróbico com tecnologia Dranco; (b) Reator com tecnologia Dranco.



Fonte – (a) Adaptado de Heleno Lima e Martins (2014), p. 8; (b) OWS (2020).

quais em seguida são direcionados para biodigestores, onde ocorre a digestão anaeróbica de maneira controlada e nos parâmetros ideais, e então, esses resíduos orgânicos são convertidos em produtos como o biogás e digestato. No caso do biogás, ele pode posteriormente ser transformado em energia térmica, energia elétrica e biocombustível (biometano). Já o digestato, poderá retornar a agricultura como biofertilizante e então para a comunidade por meio de alimentos e demais produtos agrícolas.

Figura 12 – Ciclo da cadeia do biogás.



Fonte – Autoria própria, 2020.

Assim como o gás natural fóssil, o principal componente que determina o conteúdo energético do biogás é o metano inflamável (CH_4). Dependendo do substrato digerido na planta de biogás, o teor de metano do biogás pode variar entre 50% e 75%. Em seguida, o componente de maior porcentagem é o dióxido de carbono (CO_2), representando entre 25% e 50%. Os outros componentes são água (H_2O), oxigênio (O_2) e traços de enxofre (S_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) (GOMEZ, 2013; KOUGIAS; ANGELIDAKI, 2018).

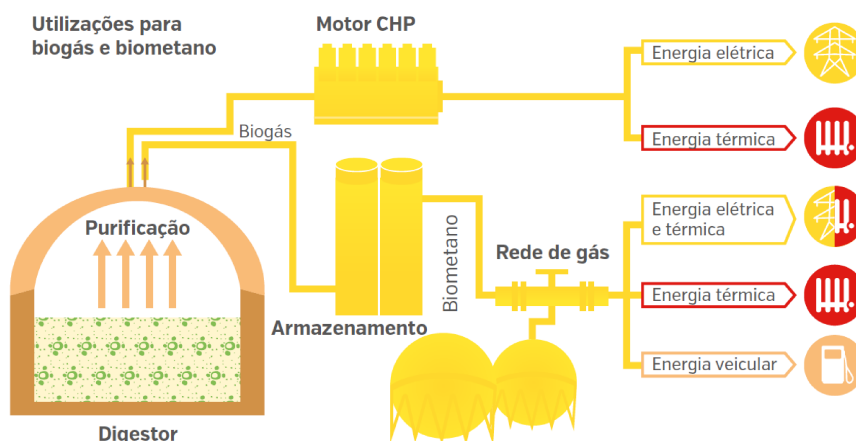
Atualmente, é considerado uma opção promissora por ser tratar de uma fonte de energia renovável multilateral que pode substituir os combustíveis convencionais para produzir calor e energia e também pode ser usado como combustível gasoso em aplicações automotivas. Além disso, o biometano (biogás beneficiado) pode substituir o gás natural na produção de produtos químicos, bem como o biofertilizante (digestato), que pode substituir fertilizantes minerais (ACHINAS *et al.*, 2017).

Porém, para a sua utilização é necessário selecionar tecnologias e projetar sistemas para tratar o biogás até o nível exigido pelo tipo de aproveitamento e, ao remover as maiores contaminações, principalmente o gás H_2S que é altamente corrosivo para a maioria dos equipamentos utilizados nos processos de conversão energética, podendo então ser utilizado para a produção de energia elétrica e energia térmica (aquecer, secar, resfriar), por meio do motor *Combined Heat and Power* (CHP), o qual apresenta uma produção simultânea de energia elétrica e energia térmica útil a partir de uma única fonte de energia (PROBIOGÁS, 2015). O biometano, por sua vez, resulta de uma purificação muito mais exigente aplicada em grandes e constantes volumes de biogás, com aproximadamente 98% de CH_4 em uma estação de tratamento de biogás, o biometano terá as mesmas propriedades que o gás natural (GOMEZ, 2013).

A purificação do biogás para o biometano é ambientalmente mais sustentável em termos de emissões de GEEs e na redução de emissão local de NO_x (como NO_2) e material particulado (MP), quando comparado a combustão de biogás em uma unidade combinada de calor e energia (CHP) (CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2016). Dessa forma, a preparação e purificação do biogás depende da finalidade, conforme apresentado na figura 13.

Além dessas aplicações apresentadas para o produto principal do processo, há o subproduto denominado digestato, também chamado de biofertilizante, sendo este definido como uma mistura de matéria orgânica parcialmente degradada, biomassa microbiana e compostos inorgânicos (ALBURQUERQUE *et al.*, 2012). De acordo com OLIVER *et al.* (2008), trata-se de um adubo orgânico e que pode contribuir de maneira eficiente no reestabelecimento do teor de húmus do solo, funcionando como melhorador de suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Tratando-se de rapidez de ação (absorção de elementos pelas plantas), assemelha-se a fertilizantes minerais, uma vez que os elementos nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) estão facilmente

Figura 13 – Aproveitamentos energéticos para biogás e biometano.



Fonte – PROBIOGÁS (2015), p. 70.

disponíveis para as plantas.

A qualidade e a composição do sólido digerido dependem da matéria-prima e do processo de digestão. Além disso, o processo separa o digerido em duas frações: a fibra e o efluente líquido. A fibra é volumosa e contém um baixo nível de nutrientes vegetais, podendo assim ser usada como um condicionador do solo e como fertilizante de baixo grau. Considerando que, o efluente líquido, por outro lado contém uma grande proporção de nutrientes e pode ser usado como fertilizante. O alto teor de água do licor facilita sua aplicação através de métodos convencionais de irrigação. Assim, o uso de fibra e licor de digestão anaeróbica leva a uma melhor utilização de fertilizantes e, portanto, menor consumo de produtos químicos em sistemas de cultivo (OWAMAH *et al.*, 2014).

De acordo com a tabela 1 com dados apresentados por Junqueira (2014), o fertilizante proveniente da biodigestão é um adubo orgânico de alta qualidade, contendo bons teores de N, P e K.

Tabela 1 – Composição típica do biofertilizante.

Componente	Quantidade (%)
Nitrogênio (N)	1,5 - 2,0
Fósforo (P)	1,0 - 1,5
Potássio (K)	0,5 - 1,0

Fonte – Adaptado de Junqueira (2014).

Com isso, a ação biofertilizante desse digestato vai se tornando um produto estratégico para produções agropecuárias, devido aos aumentos previstos para os adubos fosfatados (Mono-Amônio-Fosfato (MAP) e Di-Amônio-Fosfato (DAP) e para os adubos nitrogenados (ureia) (BLEY JUNIOR, 2015).

E sob o ponto de vista de Kunz *et al.* (2019), quando esses resíduos orgânicos são manejados corretamente, se constituem em uma fonte segura de nutrientes para a agricultura que podem substituir de maneira eficiente os fertilizantes minerais, com impactos positivos para o ambiente e contribuindo com a viabilidade econômica dos empreendimentos agropecuários e agroindustriais, podendo também trazer retornos benéficos, tanto financeiros como ambientais, para as plantas de biogás. Porém, conforme destaca Tampio *et al.* (2017), o planejamento para a utilização desse subproduto ainda não recebe muita atenção durante os investimentos nas plantas de biogás, visto que as mesmas se concentram na produção de energia renovável e atualmente também, o biocombustível.

De uma maneira geral, a cadeia do biogás tem inúmeros benefícios, especialmente no que diz respeito a destinação e gerenciamento dos resíduos orgânicos. Quando esses resíduos não recebem o tratamento adequado podem, acarretar em malefícios ao meio ambiente como as emissões de GEEs (principalmente CH_4) e na agricultura o N_2O , contaminação do solo e água, odores desagradáveis, entre outros. Com isso, o tratamento por digestão anaeróbica se mostra uma alternativa, quando considerado que além do tratamento dos resíduos, alia-se a produção de energias, combustível mais limpo e biofertilizante, trazendo benefícios ambientais, sociais e econômicos, auxiliando no desenvolvimento sustentável, também contribuindo fortemente para a economia circular.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa se caracteriza como de natureza teórica em relação ao tema abordado e de método indutivo, pois, a partir da observação do fenômeno, é possível chegar a uma conclusão que não estão contidas nas premissas (GIL, 2008). Quanto aos seus procedimentos técnicos, enquadra-se como um estudo bibliográfico e documental, pois tratará de dados e verificações provindas diretamente de trabalhos já realizados do assunto pesquisado, além de materiais não científico.

No que se refere a abordagem, será mista: qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa preocupa-se com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, centrando-se na compreensão e explicação da dinâmica das relações (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Enquanto, a pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre variáveis, etc., sendo caracterizada pela mensuração das variáveis, de forma a transformar números em informações para análise de cenários (GIL, 2008). A utilização conjunta da pesquisa qualitativa e quantitativa permite recolher mais informações do que se poderia conseguir isoladamente.

Com relação aos procedimentos técnicos, será feito o uso de simulação para desenhar o comportamento do estudo (GIL, 1999). O processo de modelagem e simulação fornece uma ferramenta importante para diagnosticar problemas de desempenho, experimentar a complexidade dinâmica, bem como projetar e testar novas políticas e estratégias (MORECROFT, 2015).

Na classificação da metodologia qualitativa da modelagem, esse estudo pode ser definido como uma pesquisa empírica descritiva, pois está principalmente interessada em criar um modelo que descreva de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, levando a uma compreensão dos processos reais (CAUCHICK MIGUEL *et al.*, 2012).

Do ponto de vista dos objetivos, classifica-se como exploratória e descritiva, pois buscará informações específicas e características do que está sendo estudado. A pesquisa exploratória e descritiva tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Essas pesquisas podem ser classificadas como: pesquisa bibliográfica, desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos e pesquisa documental, que utiliza fundamentalmente das contribuições dos diversos autores sobre determinado assunto, onde a pesquisa documental vale-se de materiais que não recebem ainda um tratamento analítico (GIL, 2007) e método SYSMAP abordado na seção 4.2.1.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos estão descritos abaixo de acordo com os cinco objetivos específicos do presente trabalho. O quadro 2 apresenta sumariamente os objetivos específicos e como serão alcançados. Logo em seguida, em tópicos, serão descritos os procedimentos.

Quadro 2 – Objetivos específicos e metodologia

Objetivos específicos	Metodologia
a. Fundamentar a definição do biofertilizante como o produto da cadeia do biogás relacionando-o ao conceito de economia circular;	Pesquisa bibliográfica Método SYSMAP
b. Construir um modelo de dinâmica de sistemas para a cadeia do biogás a fim de estimar o potencial de produção de biofertilizante;	Modelagem de Dinâmica de Sistemas utilizando o <i>software Stella Architect</i>
c. Identificar os fatores nas três dimensões da economia circular relativos a produção de biofertilizante;	Modelagem de Dinâmica de Sistemas utilizando o <i>software Stella Architect</i> Pesquisa exploratória Pesquisa bibliográfica
d. Analisar aspectos da simbiose industrial para impulsionar a economia circular na agropecuária por meio da produção de biofertilizante.	Modelagem de Dinâmica de Sistemas utilizando o <i>software Stella Architect</i> Pesquisa exploratória Pesquisa bibliográfica

Fonte – Autoria própria, 2020.

Para o cumprimento do primeiro objetivo foi realizada uma pesquisa bibliográfica para fundamentar o biofertilizante como o produto de interesse para o estudo, considerando que a cadeia produtiva gera o biogás como produto principal e o digestato, denominado biofertilizante, como subproduto do processo. Para essa pesquisa bibliográfica, as buscas foram feitas em três bancos de dados: *Scopus*, *Web of Science (WoS)* e *Science Direct* e com palavras-chave apresentadas na seção 4.2.1. Posteriormente, foi efetuada a revisão de literatura estruturada por meio do método SYSMAP.

Para a construção do modelo de simulação, a metodologia utilizada foi a de dinâmica de sistemas por meio do *software Stella Architect*. O modelo é referente a cadeia produtiva de suínos para a produção de biofertilizante e foi construído com base em diferentes etapas descritas por Ford (2009) e apresentadas na seção 4.3.

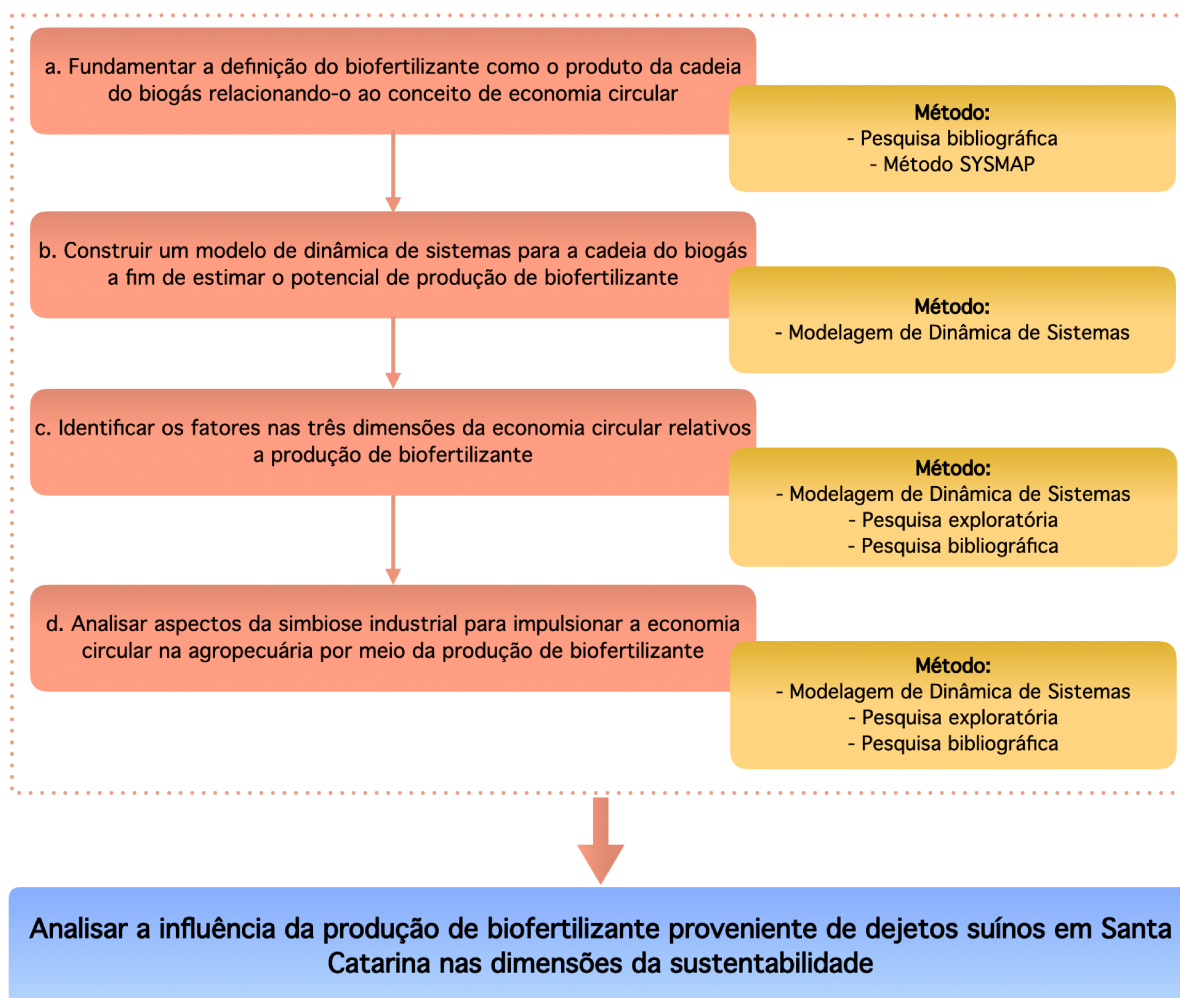
Após a construção do modelo no *software Stella Architect*, visando atingir o objetivo (c), foram testados e simulados diferentes cenários para estimar o potencial de produção de biofertilizante, bem como em conjunto com pesquisa exploratória, pesquisa bibliográfica e CLD, identificando fatores nas três dimensões da sustentabilidade

relacionados a EC na agropecuária.

Por fim, por meio da modelagem de DS para a simulação de cenários, juntamente com pesquisa exploratória e pesquisa bibliográfica, foram analisados aspectos da SI que podem contribuir para estimular a circularidade na agropecuária.

O fluxograma referente as etapas para atingir os objetivos específicos estão ilustradas na figura 14:

Figura 14 – Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte – Autoria própria, 2021.

4.2.1 Revisão de literatura estruturada - SYSMAP

O modelo proposto é o SYSMAP, que tem por objetivo apresentar de uma forma estruturada os principais processos para realização de uma revisão de literatura de um tema que o pesquisador não tem conhecimento ou na qual o pesquisador busca identificar detalhes específicos sobre determinado aspecto e/ou contexto, através da combinação da análise cientométrica e análise de conteúdo (VAZ; MALDONADO, 2017).

O modelo consiste em quatro (4) fases, sendo elas:

- i) Construção da coleção de artigos, sendo feita através de buscas em diferentes bancos de dados através de palavras-chave de interesse;
- ii) Processo de filtrações, onde os artigos encontrados são filtrados por meio da exclusão de duplicados, disponíveis e correspondentes ao assunto;
- iii) Análise cientométrica, a qual estabelece a relação entre os autores, palavras-chaves e outros pontos de interesse entre os artigos;
- iv) Análise de conteúdo, em que é realizada uma análise mais aprofundada dos artigos a respeito do conteúdo e posterior construção das lacunas/oportunidades de pesquisa dos campos emergentes no assunto.

Figura 15 – Método SYSMAP (*Scientometric and sYStematic yielding MApping Process*).



Fonte – Vaz e Maldonado (2017).

Uma das pesquisas foi realizada em novembro de 2019, utilizando três bancos de dados: *Scopus*, *WoS* e *Science Direct*. A utilização de todas essas bases foi com o intuito de obter o maior número possível de artigos relacionados com as palavras-chaves da busca. Os termos utilizados foram "biogas" ou "anaerobic digestion" relacionados com a palavra "circular economy". O software de gerenciador de referências MENDELEY foi utilizado para a compilação dos arquivos das buscas nos bancos de dados e também para posterior auxílio na filtração.

Na base da **Scopus** a pesquisa foi realizada por *article tittle*, *abstract* e *keywords*. No filtro a busca foi feita apenas por artigos. Nessa base de dados, para as pesquisas de "biogas" ou "anaerobic digestion" e "circular economy", as restrições foram para

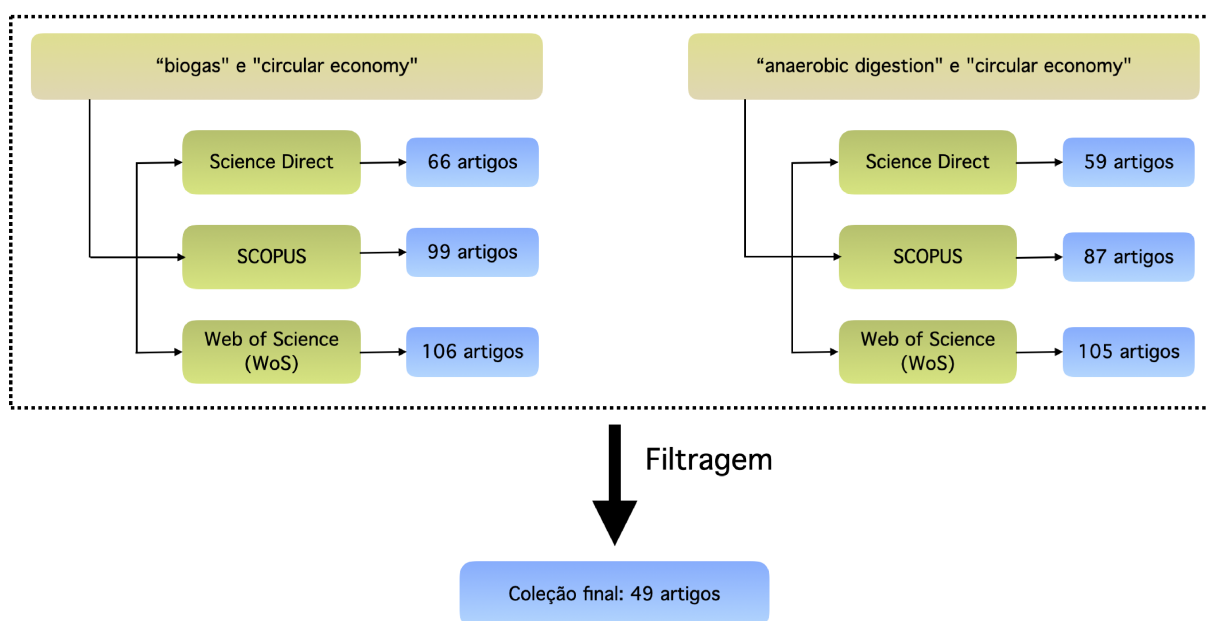
artigos que contivessem as palavras-chave: *biogas*, *anaerobic digestion* e/ou *circular economy*. Na base **Web of Science (WoS)** a pesquisa foi realizada por "todos os campos" nas combinações as quais tem poucos documentos. E na **Science Direct** a busca foi realizada por palavras-chave e somente restringida por *Review Articles*, *Research Articles* e *Data Articles*.

Posteriormente, todos os arquivos relacionados a cada uma das buscas nos três bancos de dados foram reunidos na mesma pasta para serem filtrados. Essas filtragens são feitas pelo descarte de artigos duplicados, bem como análise do conteúdo por meio do título, palavras-chave e *abstract*.

Para a filtragem da pesquisa relacionando "*circular economy*" e "*biogas*" ou "*anaerobic digestion*" foram aplicadas: *agricultural fertilizer*, *agricultura residue*, *agricultural waste*, *agricultural wastes*, *agriculture*, *anaerobic digestate*, *anaerobic digestion*, *bioeconomy*, *biofertilizer*, *biogas*, *biogas fertilizer*, *circular economy*, *digestate*, *fertilisation*, *fertilizer*.

A construção do banco de dados utilizando a revisão de literatura estruturada SYSMAP é apresentada na figura 16.

Figura 16 – Etapas da revisão estruturada para biogás ou digestão anaeróbica.



Fonte – Autoria própria, 2021.

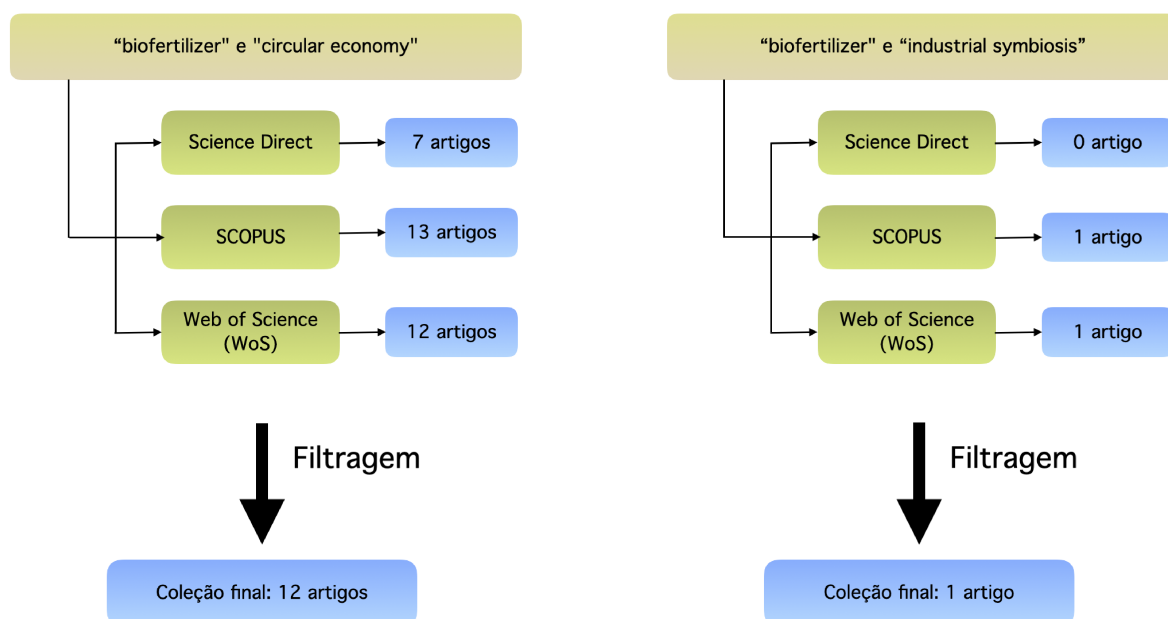
Outras pesquisas relacionadas ao biofertilizante foram realizadas em fevereiro de 2020 e, posteriormente, em fevereiro de 2021, utilizando três bancos de dados: *Scopus*, *WoS* e *Science Direct*. Os termos utilizados foram "*biofertilizer*" relacionados com a palavra "*circular economy*" e "*industrial symbiosis*". Também foi utilizado o *software* MENDELEY para a compilação dos arquivos das buscas nos bancos de dados e também para posterior auxílio na filtragem.

Na base da **Scopus** a pesquisa foi realizada por *article tittle*, *abstract* e *keywords*. No filtro a busca foi feita apenas por artigos. Nessa base de dados, para as pesquisas de "*biofertilizer*" e "*circular economy*", as restrições foram para artigos que contivessem as palavras-chave *circular economy* e *biofertilizer* e excluindo artigos que tivessem nas palavras-chave *microalga* e *algae*. No caso da simbiose industrial não houve restrições. Na base **Web of Science (WoS)** a pesquisa foi realizada por "todos os campos" se restringindo apenas a artigos e excluindo artigos que continham nas palavras-chave *microalga* e *algae*. E na **Science Direct** a busca foi realizada por palavras-chave e somente restringida por *Review Articles* e *Research Articles* e também excluindo artigos que continham nas palavras-chave *microalga* e *algae*.

Posteriormente, todos os arquivos relacionados a cada uma das buscas nos três bancos de dados foram reunidos na mesma pasta para serem filtrados. Essas filtrações são feitas pelo descarte de artigos duplicados, bem como análise do conteúdo por meio do título, palavras-chave e *abstract*.

Os resultados das pesquisas após as filtrações são apresentados na figura 17.

Figura 17 – Etapas da revisão estruturada para biofertilizante.



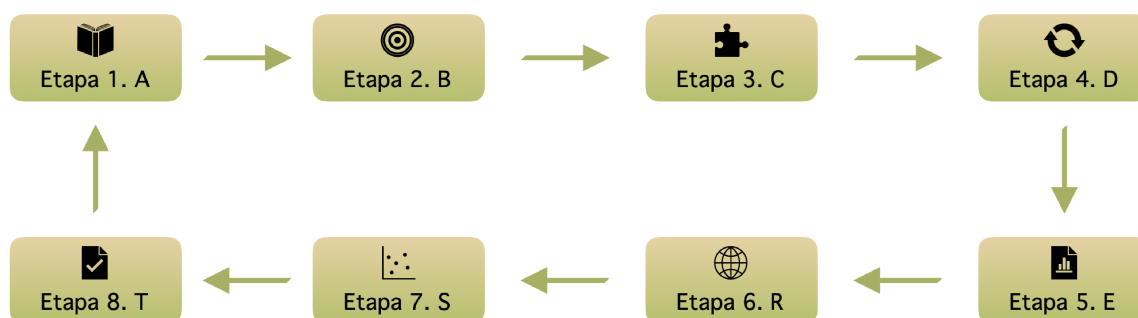
Fonte – Autoria própria, 2021.

Essa metodologia será aplicada para fundamentar a definição do biofertilizante, subproduto da cadeia do biogás, ao conceito de economia circular e também analisar fatores da simbiose industrial para estimular a circularidade. Os resultados dessas pesquisas são explorados na seção 6.1.1 e 6.1.2.

4.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Para a modelagem de dinâmica de sistemas, foi usado como base as etapas descritas por Ford (2009), conforme figura 18:

Figura 18 – Etapas de modelagem.



Fonte – Autoria própria, 2021.

Com isso, para a construção do modelo foram adotadas todas as etapas que são descritas a seguir.

Etapa 1. A – Familiarização do problema: na etapa de familiarização do problema, buscou-se compreender como a cadeia do biogás poderia auxiliar tanto como um método de gerenciamento de resíduos orgânicos da suinocultura ao serem aproveitados como matéria-prima para o processo quanto como uma alternativa para o uso excessivo de fertilizantes minerais na utilização do subproduto da DA. Além disso, analisar como esse ciclo dos resíduos e posterior uso, pode promover a economia circular (EC);

Etapa 2. B – Definição do problema: com a análise, definiu-se os seguintes problemas: qual o potencial produtivo de biofertilizante – produto resultante da cadeia do biogás e como esse potencial pode auxiliar na economia circular para que a agropecuária se torne mais sustentável.

Etapa 3. C – Construção do diagrama de estoque e fluxo: em seguida, para a construção do diagrama de estoque e fluxo, utilizou-se o trabalho de Santos *et al.* (2018), onde os autores calculam o potencial de produção de biogás para o ano de 2012 apresentando as equações para o setor de animais. Com isso, no setor de suínos, tem como estoque a quantidade de cabeças de animais e os resíduos gerados são calculados de acordo com a produção por cabeça de animal e os demais parâmetros referentes ao processo. Já com relação ao fluxo, esse será definido de acordo com a taxa de "crescimento" além da taxa de saturação do mercado para o estoque, sendo estes explanados na seção ??;

Etapa 4. D – Desenho do diagrama de *loop* causal: após o estudo do sistema, foram construídos diagramas de *loop* causal, conforme descritos abaixo na subseção 4.3.1;

Etapa 5. E – Estimação de parâmetros: com relação aos parâmetros, esses foram obtidos por meio de dados técnicos, artigos como Santos *et al.* (2018) e demais documentos oficiais, os quais apresentam dados importantes para a construção do modelo. No que se refere a taxa de conversão de biofertilizante, foi definido um valor de 5% de matéria seca, porém, na seção de validação é apresentado uma análise de sensibilidade para faixa entre 3,9% e 6,5%, conforme literatura;

Etapa 6. R – Execução do modelo para o modo de referência: com os parâmetros estimados e dados históricos da variável principal (cabeça de suínos), realizou-se a execução do modelo para analisar se os parâmetros correspondem ao modo de referência. Nessa etapa fez-se o uso de validação por meio de métodos estatísticos como o Coeficiente de Determinação (R^2), Raiz do Erro Quadrático Médio – *Root Mean Square Error* (RMSE) e Erro Médio Absoluto – *Mean Absolute Error* (MAE), descritos na seção 5.2;

Etapa 7. S – Realizar análise de sensibilidade: após essas etapas, foi feita também a análise de sensibilidade por meio de comportamentos extremos, aplicando alterações nos parâmetros do modelo e então, analisado o comportamento dos resultados para constatar se são plausíveis e condizentes com o esperado;





Etapa 8. T – Teste de impacto das políticas: por fim, como a parte principal desse estudo, testa-se os impactos das políticas para analisar se estes trazem as mudanças comportamentais desejadas e como influenciam no potencial de produção de biofertilizante.

4.3.1 Diagrama de relações causais

Para melhor compreensão do sistema, também foram construídos diagramas de relações causais ou CLD para identificar os principais fatores relacionados a três dimensões da economia circular: ambiental, econômica e social. Essas relações são representadas pela notação de setas composta por um sinal de '+' ou '-' que indica sua causa e efeito, conforme a figura 19.

As ligações orientadas por polaridade mostram como a variável independente afeta a variável dependente. Os loops de *feedback* são importantes para o comportamento do sistema. Os *feedbacks* podem ser positivos (auto-intensificação, rotulados como o sinal '+' ou a letra R como reforço) ou negativos (balanceamento, rotulados como o sinal '-' ou a letra B como equilíbrio). A polaridade do *loop* descreve o efeito da mudança em uma das variáveis ao longo de todo o *loop*. Caso a mudança do valor

Figura 19 – Polaridades: interpretação, representação matemática e exemplo.

Símbolos	Interpretação	Representação matemática	Exemplos
	<p>Se X aumenta (diminui), então Y aumenta (diminui) acima (abaixo) do que teria sido.</p>	$\partial y/\partial x > 0$	
	<p>Se X aumenta (diminui), então Y diminui (aumenta) abaixo (acima) do que teria sido.</p>	$\partial y/\partial x < 0$	

Fonte – Sterman (2000), p. 139.

das consequências das variáveis no reforço da mudança original a malha seja positiva, quando o efeito de *feedback* for negativo à mudança inicial, a malha é negativa (ROUBIK *et al.*, 2020).

Para a construção dos diagramas, inicialmente analisou-se quais as partes interessadas, variáveis e seus relacionamentos para cada uma das dimensões para poder descrever o comportamento do sistema. Além disso, para todas as dimensões foram levados em conta informações encontradas anteriormente na literatura de revisão, bem como aspectos referentes ao sistema e que foram observados durante o desenvolvimento do estudo.

Na dimensão ambiental observou-se que as variáveis estavam relacionadas principalmente ao manejo dos dejetos, tratamento para a produção de fertilizantes e posterior uso. Esses fatores impactam em outros pontos do sistemas como o uso de fertilizantes minerais, modelo de agricultura – tornando-se mais sustentável – e, como consequência, influencia positivamente para a redução das emissões de GEEs. Nessa dimensão, tem-se a visão dos recursos finitos e seus problemas ambientais, como acontece com o uso de combustíveis fósseis, degradação ambientais e emissões de gases poluentes.

No caso da dimensão econômica, as variáveis são na sua maioria derivadas dos aspectos ambientais, sendo direcionadas em relação aos custos. As taxas ambientais e as taxas cambiais do dólar para a importação de fertilizantes minerais tem um peso importante nas relações para a adesão do tratamento por DA, assim como a demanda de fertilizantes minerais e os subsídios financeiros para estimular os produtores a investirem na tecnologia. Nessa dimensão, são levado em consideração variáveis que possuam um impacto econômico para o sistema, seja positivo ou negativo.

Na dimensão social considerou-se a comunidade como um todo, onde as variáveis também estavam ligadas as outras duas dimensões – ambiental e econômica. Na

parte social os aspectos mais relevantes identificados foram relacionados aos novos modelos de negócios, geração de emprego e senso de coletividade da comunidade, pois, nessa dimensão, objetiva-se analisar como os fatores sociais podem impactar na produção de biofertilizante, incluindo o estímulo por meio da cooperação e simbiose industrial entre as partes interessadas.

Por fim, para a inserção de novas variáveis relacionadas a SI, foram analisadas políticas, ações e demais atividades que fomentam a produção de biofertilizante e, em seguida, observou-se em qual parte do CLD esses fatores teriam relação, seja positivo ou negativo.

Dessa forma, os diagramas permitem uma visualização mais clara de como as relações impactam no sistema como um todo, além de permitir uma análise qualitativa de cada uma das dimensões da sustentabilidade, servindo como apoio para a simulação e trazendo informações de como determinadas práticas podem afetar o comportamento do sistema, conforme apresentados na seção 6.2

5 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

5.1 MODELO DE SIMULAÇÃO

5.1.1 Setor de suínos

Os dejetos provenientes da criação de suínos ocasionam inúmeros problemas ambientais, incluindo o aumento das emissões atmosféricas (GEEs), bem como produz grandes quantidades de resíduos com altas cargas de nutrientes – fósforo (P) e nitrogênio (N), matéria orgânica, sedimentos, patógenos, metais pesados (cobre e zinco utilizados nas rações como promotores de crescimento, por exemplo), hormônios e antibióticos (KUNZ *et al.*, 2005). Além disso, também provoca a diminuição da qualidade da água. Esses problemas podem ser observados em todos os segmentos da cadeia de suprimentos, desde a produção de grãos e animais até os elos de processamento, distribuição e consumo (KUNZ *et al.*, 2009).

No entanto, apesar do problema ser recorrente em vários pontos do segmento da cadeia, é a produção animal que tem sido central nas discussões públicas devido à grande quantidade de resíduos gerados pelas operações suínas e seu potencial impacto no ar, solo e recursos hídricos (KUNZ *et al.*, 2009). Por isso, destaca-se a importância de tratamentos adequados para reduzir essa quantidade de dejetos que vão para o meio ambiente devido ao manejo inadequado. A utilização de biodigestores permite agregar valor aos resíduos por meio da geração de biogás e biofertilizante.

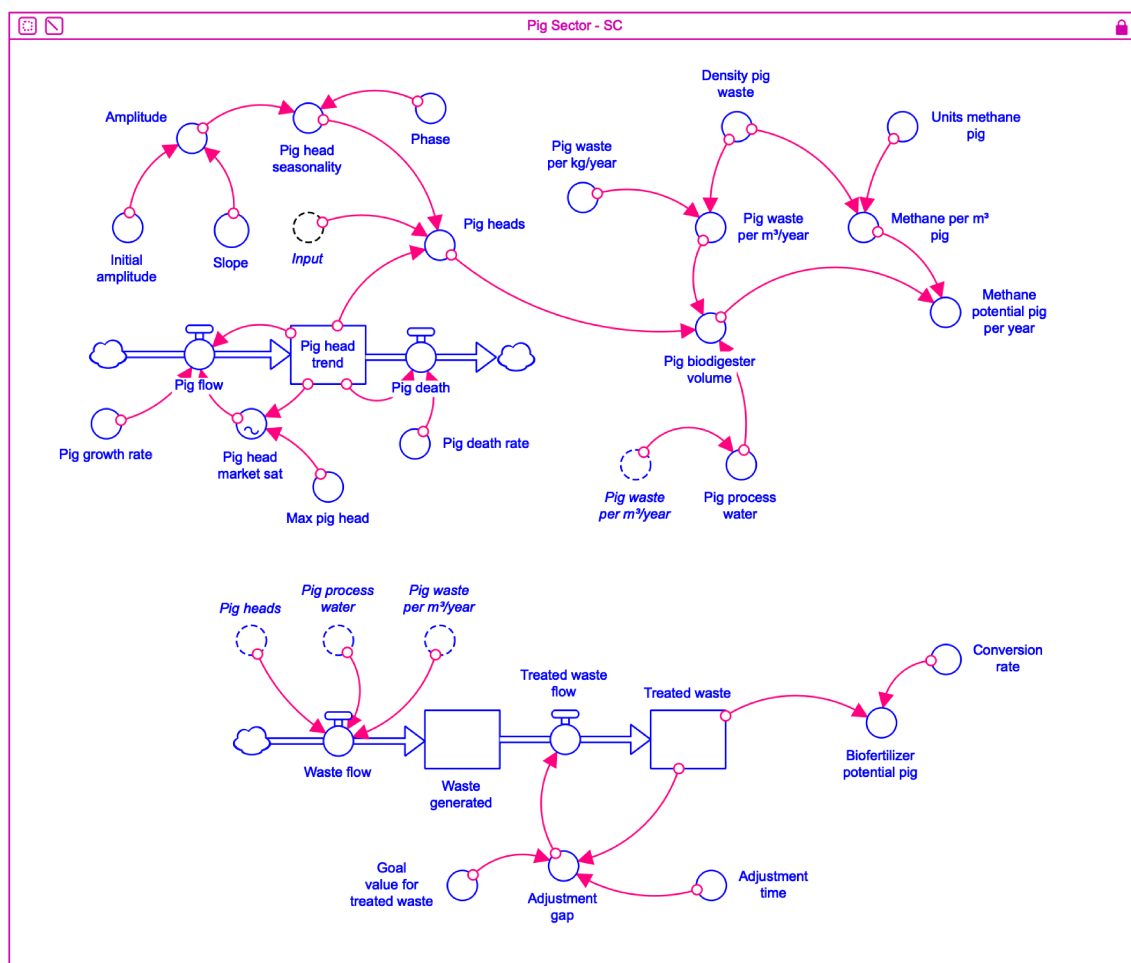
No sistema da suinocultura, o modelo de estoque inicial é alimentado pelo fluxo de entrada referente a quantidade de cabeça de suíno, variando com base na saturação de mercado e na taxa de crescimento. Porém, tratando-se da quantidade de cabeças de suínos considerada para a produção de biofertilizante, devido as variações nos dados históricos, foram inseridos parâmetros que causam oscilações na produção anual para ficar mais próximo ao sistema real. Posteriormente, variáveis de processo foram acrescentadas ao modelo, como a geração de esterco de cada animal, densidade do esterco e quantidade de água.

Dessa forma, para o fluxo referente ao estoque de dejetos gerados foram considerados as variáveis de quantidade de cabeças de suínos, a quantidade de água e a quantidade de esterco gerado em m^3/ano . Assim, essa quantidade de dejetos gerados alimenta o fluxo do estoque de dejetos tratados, porém, também são consideradas as metas de tratamento e seus respectivos tempos de ajustes, sendo o tempo estipulado para alcançar os valores do tratamento de dejetos. Por fim, esse estoque representa a quantidade de dejetos tratados e por meio de uma taxa de conversão, é possível estimar o potencial de produção de biofertilizante com base nos dejetos da suinocultura.

A representação da cadeia do setor de suínos conforme a construção do modelo

é apresentada na figura 20:

Figura 20 – Modelo de simulação do setor de suínos utilizando o *software Stella*.



Fonte – Autoria própria, 2020.

Para calcular o potencial de metano do setor, foi utilizada a equação 1 apresentada por Santos *et al.* (2018), posteriormente, por meio dela foi possível adicionar demais dados inerentes ao modelo.

$$\text{Methane Potential Feedstock} = N \times I \times f \quad (1)$$

Onde:

- N = número de animais;
- I = produção de dejetos por animal;
- f = produção de biogás por dejetos.

Os parâmetros referentes a quantidade de animais no estoque, produção de dejetos e rendimento para a produção específica de biogás a partir de esterco, são mostrados na tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros para o cálculo do potencial oriundo de resíduos suínos.

Parâmetros	Valores
$N_f (t = 2000)$	183.494,626 cabeças
l_{sb}	821,25 kg/ano.cabeças
f_{sb}	0,012 - 0,024 $m^3 CH_4/kg$

Fonte – Adaptado de Santos *et al.* (2018), IBGE (2018).

No que diz respeito as taxas de crescimento do estoque, com valor inicial apresentado na tabela 2, foi considerado que haverá uma saturação em determinado momento, ou seja, há um limite superior de crescimento, descrita pela curva S (*S-Shaped*). A curva S é frequentemente usada para descrever e prever o desenvolvimento de processos sociais e econômicos, como por exemplo a evolução da população (KWASNICKI, 2013). Nesse tipo de curva, inicialmente há um crescimento mais lento, passando em seguida por um período de expansão mais acelerada e novamente outra fase de desaceleração, até que há um momento de saturação, onde os recursos disponíveis atinge seu máximo e então o crescimento diminui consideravelmente ou estagna, conforme esperado para o modelo.

$$\text{Market Saturation} = \frac{\text{Stock}}{\text{Saturation Stock}} \quad (2)$$

Essa curva de crescimento é representada pela equação 2, onde o mercado de saturação é representado pelo estoque de cada setor e seu respectivo estoque de saturação.

Porém, por se tratar de um sistema complexo e possuir variações de crescimento e decaimento produtivo ao decorrer dos anos, também foi necessário adequar o modelo para representar essas variáveis históricas do número de cabeças de suínos. Essa sazonalidade de $P_S^h(t)$ é representada pela equação 3, a qual implementa uma onda senoidal com amplitude variável $\alpha(t)$ e com período τ , nesse caso definido em $\tau=11,7$ anos.

$$P_S^h(t) = \alpha(t) \times \sin(wt) \quad (3)$$

A amplitude variável $\alpha(t)$ da onda senoidal é dada pela equação 4, a qual é diretamente proporcional à taxa pendente de declive constante de -0,4%, que na verdade pode ser de decréscimo ou de incremento, conforme as respectivas funções

degrau $\delta(t)$ incidentes no instantes t_0 que foram definidos durante a calibração.

$$\alpha(t) = \alpha(t_0) + (c \times t) \times [\delta(t_0 = 2001) - 2 \times \delta(t_0 = 2010)] \quad (4)$$

Sabendo que a frequência f de uma onda senoidal é dada por $f = 1/\tau$, dada a definição da frequência angular ω pela equação 5, temos por fim a equação 6, que melhor representa as sazonalidades de cabeças de porcos.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\tau} \quad (5)$$

$$P_s^h(t) = \alpha(t) \times \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \quad (6)$$

No modelo também foi incluída uma variável de ruído, denominada como *input*, a qual produz variações aleatórias para a produção de cabeças de suíno a cada ano, simulando um comportamento mais semelhante ao real.

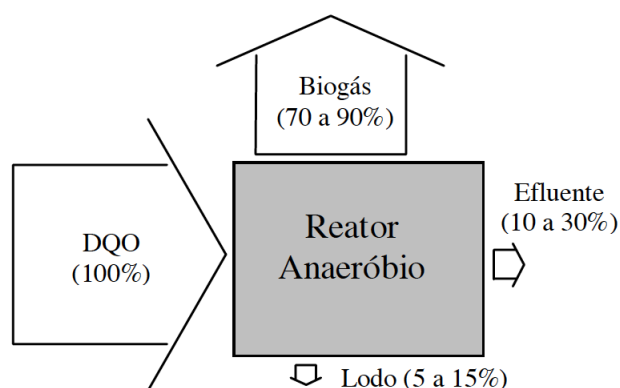
Além disso, para a simulação foram utilizados alguns outros parâmetros e suposições necessárias para que fosse possível obter o potencial de biofertilizante dos setores.

É válido lembrar que a produção de biofertilizantes é decorrente do processo de fermentação anaeróbica, ou seja, da atividade dos micro-organismos na decomposição da matéria orgânica e complexação de nutrientes, sendo possível obter com a simples mistura de água e esterco fresco (TIMM *et al.*, 2004). Isto é, o teor de água é um dos fatores que podem afetar o processo. No entendimento de Arruda *et al.* (2002), para uma boa eficiência da digestão anaeróbica, a água deve estar ao redor de 90% do conteúdo total de biomassa, de acordo com a origem da mesma. A diluição deve estar em torno de 1:1 e 1:2 de água para substrato. O excesso de água pode atrapalhar a hidrólise, exigindo uma elevada carga de biomassa (JUNQUEIRA, 2014). Tendo como base essas informações, para a construção do modelo supõe-se que a proporção será 1:1 de água para resíduos gerados, levando em conta que a produção de resíduos é diretamente relacionada a uma função de taxa de crescimento anual.

Outro ponto importante é sobre a necessidade de adequar a porcentagem de carga orgânica nos produtos finais do processo. De acordo com Chernicharo *et al.* (2001), nos sistemas anaeróbicos, observa-se que cerca de 70 a 90% do material orgânico biodegradável presentes no afluente é convertido em biogás, que por sua vez é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Apenas cerca de 5 a 15% do material orgânico é convertido em biomassa microbiana, constituindo-se o lodo excedente (digerido). Além da pequena quantidade produzida, o lodo excedente apresenta-se mais concentrado e com melhores características de desidratação. A parcela restante deixa o reator como material não degradado (10 a 30%). Para esse modelo, estima-se que da carga orgânica do substrato contido no biodigestor, a parcela

de 85% transforma-se em biogás, 5% sai no digerido (biofertilizante) e 10% é material não degradado, conforme figura 21 abaixo:

Figura 21 – Conversão biológica nos sistemas anaeróbicos.



Fonte – Chernicharo *et al.* (2001), p. 2.

Essas estimativas tratam-se para sistemas baseados em demanda química de oxigênio (DQO). No caso de matéria seca¹, Risberg *et al.* (2017) coletou amostra de digestato de diferentes substratos (entre eles esterco), onde 7 vieram de plantas operadas em condições termofílicas e 13 de plantas operadas em condições mesofílicas. De acordo com a tabela 2 apresentada no artigo de Risberg *et al.* (2017) (p. 531), foram considerados os valores das amostras 5, 8 e 9, pois as mesmas possuem maior composição de resíduos provenientes de animais, entre elas suínos, sendo a média de matéria seca entre 3,9 – 6,5% no digestato após o processamento final. Com isso, para efeitos de cálculo do modelo, o parâmetro de conversão para biofertilizante será atribuído em 5%, conforme porcentagem mínima apresentada por Chernicharo *et al.* (2001).

Por fim, tendo em conta que o digerido final é em fração líquida (m^3/ano) e os resíduos entram no processo na forma sólida (kg/ano), foi necessário transformar os valor de produção de resíduos anuais por meio do valor de densidade, sendo a densidade de suínos correspondente a $1032,15 kg/m^3$ (KUNZ; OLIVEIRA, P. A. V. de, 2006).

A equação 7 define a forma de conversão das unidades para as consideradas no modelo:

$$Resíduos Gerados_{conv} = Resíduos_{kg} \times Densidade \quad (7)$$

Onde:

¹ Porcentagem ou peso restante da matéria após extrair toda a água.

Resíduos Gerados_{conv} = Resíduos gerados convertidos em m^3/ano ;

Resíduos_{kg} = Resíduos gerados em kg/ano ;

Densidade = Densidade do substrato em kg/m^3 ;

Conforme todos os dados, variáveis e parâmetros apresentados, o modelo foi adequado e construído para simular o potencial de produção de biofertilizante. De acordo com Scherer (1997), a utilização de dejetos de suínos, como fonte primária de biofertilizantes, pode ser altamente benéfica para a produção de grãos. No entanto, tem sido dada grande ênfase apenas à capacidade de produção, não focando também nos aspectos ambientais do processo. Porém, devido ao conceito de economia circular, fechamento de laços para minimização do uso de recursos finitos e mitigação dos GEEs, atualmente tem-se uma preocupação maior com relação as questões ambientais de todo processo produtivo e a carga residual gerada, abordado anteriormente.

5.1.2 Emissões de N_2O

Conforme apresentado anteriormente, as emissões de GEEs são os principais responsáveis pelo aquecimento global.

As emissões de não- CO_2 representam mais de 30% desse total emitido, sendo que as emissões de N_2O são em sua maioria decorrentes das atividades agrícolas, como o uso de fertilizantes sintéticos e a disposição direta de dejetos de animais no solo. Essas emissões serão apresentadas na forma de CO_{2eq} . Considerada uma medida métrica utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa (GEEs) baseado no potencial de aquecimento global de cada um. Então, utilizando a conversão do Global Warming Potential (GWP), onde de acordo com o GWP-100 do AR4 essa conversão do potencial do óxido nitroso é 298.

Além disso, de acordo com o IPCC (2006), há um conjunto de princípios metodológicos, ações e procedimentos foram definidos para o desenvolvimento de inventários nacional de GEEs. Com isso, tem-se o conceito do Tier (camadas), onde uma camada representa um nível de complexidade metodológica. Normalmente, três camadas são fornecidas. Para as equações utilizadas, os dados são relacionados ao Tier 1 e Tier 2, onde o Tier 1 é recomendado para situações onde não há disponibilidade de fatores de emissão específicos para o país, normalmente para as populações dos rebanhos, como é o caso do setor de suínos, enquanto Tier 2 é recomendado para situações onde existe a disponibilidade de fatores de emissão específicos para as principais condições do país ou região e/ou maior detalhamento para os dados das atividades (WRI BRASIL, 2015).

A modelagem para a simulação das emissões pela aplicação de fertilizantes orgânicos (biofertilizantes) com intuito de substituição aos fertilizantes sintéticos, foi feita de acordo com a equação 9 apresentada no documento de Metodologia do GHG

Protocol da agricultura da WRI BRASIL (2015), a qual:

$$\text{Oxido Nitroso}_{biof} = Q_{org} \times N_{ad} \times (1 - \text{FRAC}_{gasm}) \times EF_1 \times 44/28 \quad (8)$$

Onde:

$\text{Oxido Nitroso}_{biof}$ = é a emissão de óxido nitroso associada à aplicação de fertilizantes orgânicos ($kg N_2O/kg$ de adubo aplicado/ano);

Q_{org} = é a quantidade de adubo orgânico aplicado (kg);

N_{ad} = é o percentual de nitrogênio (N) do adubo orgânico (%);

FRAC_{gasm} = é a fração do N aplicado que volatiliza na forma de NH_3 e NO_x (%);

EF_1 = é o fator de emissão (%);

44/28 é a conversão de $N-N_2O$ para N_2O .

Os valores dos parâmetros utilizados para os cálculos das emissões são informados na tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros para aplicação de fertilizantes orgânicos.

Parâmetros	Valor	Tier
FRAC_{gasm} (%)	0,20	Tier 1
EF_1 (%)	0,01	Tier 2
N_{ad} (%)	1,60	Tier 2

Fonte – Adaptado de WRI BRASIL (2015), IPCC (2006).

A modelagem dessas emissões é exibida na figura 22, onde a quantidade de biofertilizante aplicado se dá com base no potencial de produção estimado pelo modelo da cadeia de suínos, além de uma taxa de aplicação dessa produção.

No caso das emissões proveniente da aplicação de fertilizantes nitrogenados, como é o caso da ureia, um dos fertilizantes nitrogenados mais utilizados, a equação também é da WRI BRASIL (2015):

$$\text{Oxido Nitroso}_{ureia} = N_{fert} \times (1 - \text{FRAC}_{gasfu}) \times EF_1 \times 44/28 \quad (9)$$

Onde:

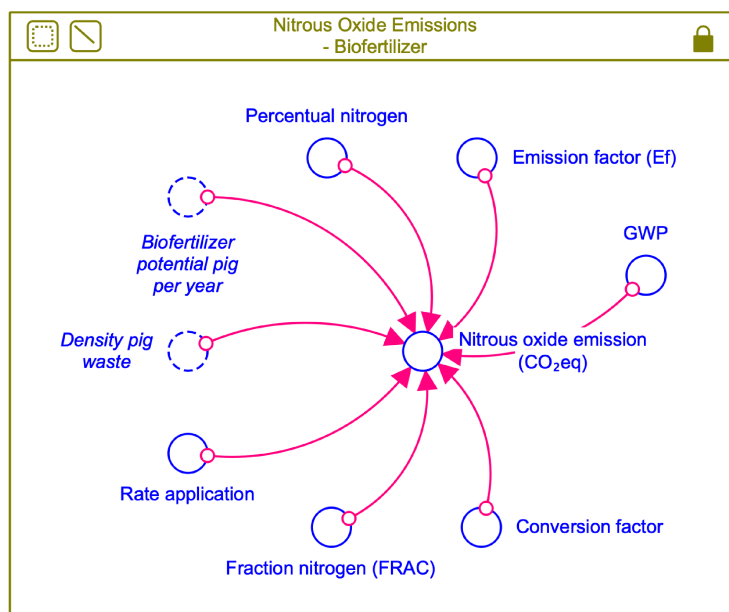
$\text{Oxido Nitroso}_{ureia}$ = é a emissão de óxido nitroso associada à aplicação de ureia ($kg N_2O/kg$ de adubo aplicado/ano);

N_{fert} = é a quantidade de N aplicado como ureia (kg);

FRAC_{gasfu} = é a fração do N aplicado que volatiliza na forma de NH_3 e NO_x (%);

EF_1 = é o fator de emissão (%);

Figura 22 – Emissões de óxido nitroso da aplicação de fertilizantes orgânicos.



Fonte – Autoria própria, 2020.

44/28 é a conversão de $N-N_2O$ para N_2O .

Os valores dos parâmetros utilizados para os cálculos são informados na tabela 4:

Tabela 4 – Parâmetros para aplicação de ureia.

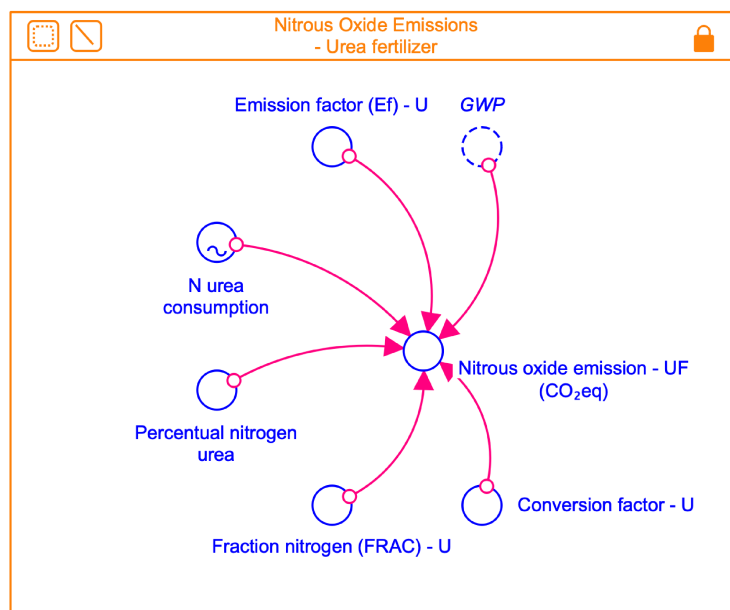
Parâmetros	Valor	Tier
$FRAC_{gasfu}$ (%)	30,0	Tier 2
EF_1 (%)	0,80	Tier 2
N_{fert} (%)	44,0	-

Fonte – Adaptado de WRI BRASIL (2015).

A modelagem dessas emissões é exibida na figura 23, onde também se considera o potencial de produção estimado pela cadeia e uma taxa de aplicação, para que seja possível analisar proporcionalmente os resultados.

Esses modelos servirão como base para a formulação de cenários que serão discutidos na próxima seção relacionando em direção à Economia Circular (EC) no setor agropecuário.

Figura 23 – Emissões de óxido nítrico da aplicação de ureia.



Fonte – Autoria própria, 2020.

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação de modelo é uma parte essencial da construção de modelos e serve como um parâmetro de confiabilidade se o modelo se comportar semelhante ao sistema de referência. Nesse caso, será validado o modelo referente ao setor de suínos. Os testes são divididos em estrutural e comportamental (STERMAN, 2000).

5.2.1 Testes de validação estrutural

Os testes estruturais tem como objetivo verificar se o modelo atende adequadamente a sua finalidade.

- **Adequação de limites:** a adequação de limites avalia o ajuste dos limites do modelo para o objetivo em questão, ou seja, se as relações estruturais conforme as variáveis adotadas são adequadas para o resultados esperados. Como essa modelagem foi desenvolvida especialmente para a cadeia do biogás a fim de estimar o potencial de biofertilizante, esse teste foi afirmativo.
- **Verificação da estrutura:** esse teste visa comparar a estrutura do modelo com a estrutural real. O modelo foi construído com base nas revisões de literatura e dados técnicos sobre o assunto, sendo coerente com a realidade.
- **Consistência dimensional:** a consistência dimensional verifica se as unidades de todos os parâmetros, variáveis e constantes do modelo estão corretas. Dentro do *software Stella Architect* utilizado para a modelagem é possível verificar a regularidade nas unidades e equações no "*check units*", com isso, esse teste foi

positivo.

- **Verificação de parâmetros:** esse teste certifica-se da validade dos parâmetros e/ou constantes definidas no modelo e se condizem com a realidade. Os dados em sua maioria foram obtidos por meio de relatórios, artigos e dados técnicos, sendo então validados. Com isso, essa verificação também apresenta resultados positivos.

5.2.2 Testes de validação comportamental

Os testes de reprodução comportamental visam comparar o comportamento gerado pelo modelo com o comportamento real do sistema.

- Reprodução comportamental

A medida de ajuste mais amplamente relatada é o Coeficiente de Determinação (R^2), que mede a fração da variação nos dados apresentados pelo modelo. Seu valor fica entre 0 e 1 (adimensional). Além disso, há outras duas métricas: RMSE e MAE. A Raiz do Erro Quadrático Médio – RMSE é a medida que calcula "a raiz quadrática média" dos erros entre valores reais e da modelagem, considerando os erros grandes com muito mais força do que os pequenos. E o Erro Médio Absoluto – MAE calcula o "erro absoluto médio" entre esses os valores reais e simulados, porém, pondera os erros linearmente. Ambas medem o erro nas mesmas unidades que a própria variável.

O comportamento do modelo foi verificado em relação a dados de séries temporais para cabeças de suínos, pois é a variável na qual podemos analisar através de dados oficiais da Pesquisa da Pecuária Municipal do IBGE (2018).

De acordo com resultados apresentados, é verificado que o comportamento do modelo simulado apresentado está próximo aos dados históricos, pois, há uma estrutura que gera ruídos (variações) na simulação para a produção de cabeças de suínos. Além disso, por se tratar de um sistema dinâmico, não é possível prever com exatidão seu comportamento, refletindo assim nos testes e na simulação para os próximos anos, conforme a figura 24.

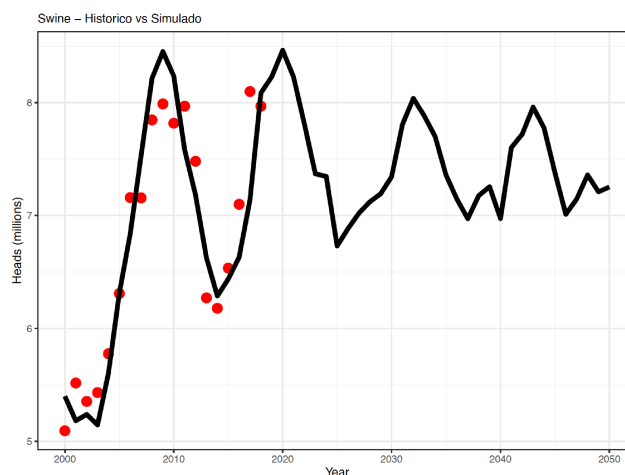
Na tabela 5, são apresentados os indicadores de acurácia, os quais representam a proximidade entre o valor obtido experimentalmente e o valor real, para o setor de estudo.

Tabela 5 – Indicadores de acurácia.

	R^2	RMSE	MAE
Suínos	0.88	372462.4	313274.8

Fonte – Autoria própria, 2020.

Figura 24 – Dados históricos e simulados referente ao número de cabeças de suínos.



Fonte – Autoria própria, 2020.

Além disso, também foram feitos outros testes como comportamentais inerentes ao modelo, sendo eles:

- **Anomalia de comportamento:** esse teste visa identificar comportamentos anômalos (irregulares) no modelo. O teste foi calibrado, então não apresenta anomalias.
- **Membro familiar:** tem como objetivo verificar se o modelo é aplicável para outros sistemas semelhantes. Considerando que o modelo é específico para a cadeia do biogás, é possível adaptar o setor de suínos para outros animais, validando esse teste.
- **Comportamento surpresa:** averiguar se há algum comportamento não previsto no modelo decorrente da modelagem ou se é um comportamento do sistema real. Devido a calibração e validação conforme testes anteriores, não espera-se comportamentos surpresas referentes ao processo de modelagem.

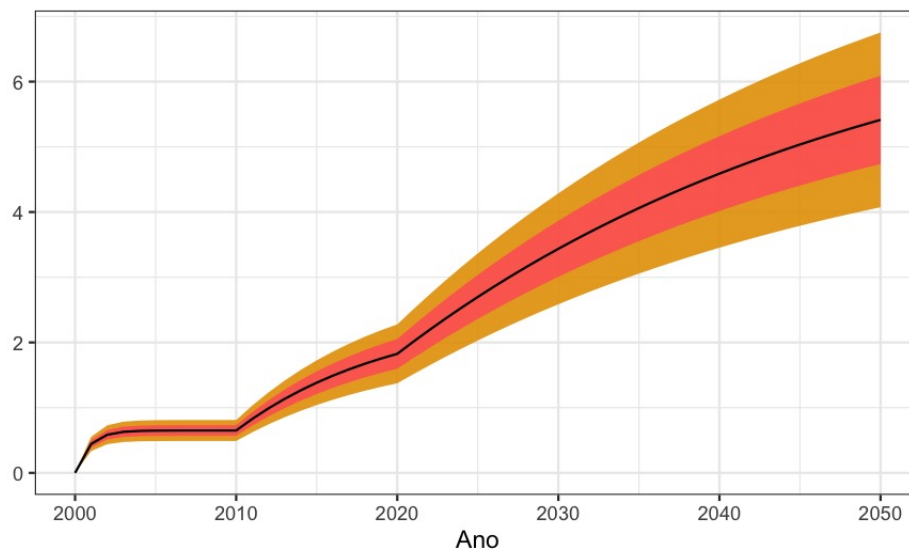
5.2.3 Análise de sensibilidade

Devido a taxa de conversão referente ao biofertilizante ser considerada para o estudo de 5%, há dados que apresentam valores entre 3,9% e 6,5%, por isso, foi feita uma análise de sensibilidade para verificar como o modelo se comporta com relação a essa variação de valores, conforme a figura 25.

A linha preta representa a média da simulação após 100 rodadas. O mínimo apresentado é para o valor de 4,0 mil m^3 enquanto o máximo é de 6,7 mil m^3 em 2050. A média obtida é de aproximadamente 5,4 mil m^3 de produção de biofertilizante, próximo ao valor considerado para o estudo, que é de 5,2 mil m^3 .

Figura 25 – Análise de sensibilidade.

Intervalos percentis para 100 simulações (Milhares de m³/ano)
Intervalo de 100% em amarelo e Intervalo Interquartil em laranja



Fonte – Autoria própria, 2021.

6 RESULTADOS

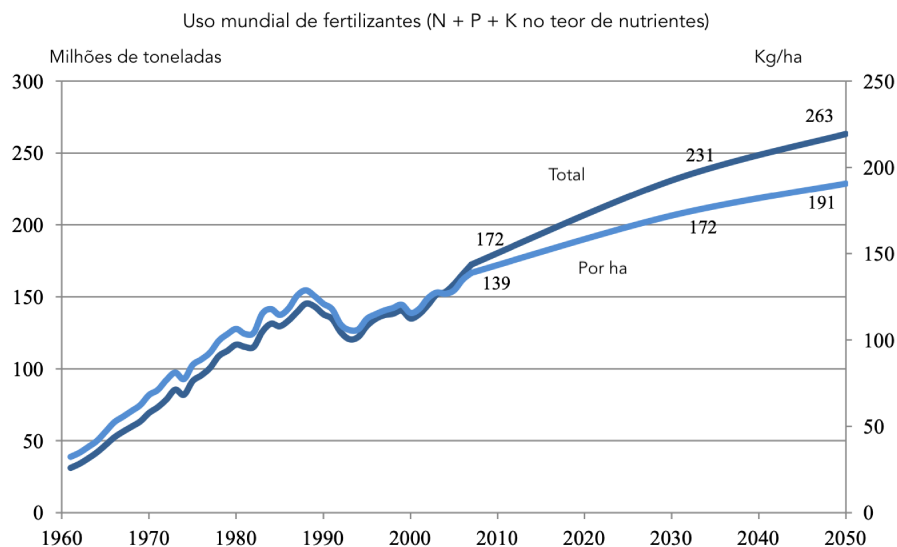
6.1 REVISÃO DE LITERATURA ESTRUTURADA

6.1.1 Biofertilizante e Economia Circular

Devido à moderna agricultura intensiva, a falta de nutrientes no solo é suprida com o uso de fertilizantes minerais, e assim, levando a vários problemas, como alto custo devido das importações, poluição do ar, degradação da qualidade do solo e até mesmo a mudança dos ecossistemas. Ou seja, esse sistema não é sustentável e poderá entrar em colapso futuramente. Ao considerar que a produção e o uso de fertilizantes minerais estão normalmente associados a impactos ambientais negativos frente aos benefícios agrícolas, levanta-se a necessidade de encontrar métodos adequados para minimizar esses impactos (CHEN *et al.*, 2018).

Atualmente, os países em desenvolvimento representam quase 70% do consumo mundial de fertilizantes e essa parcela pode aumentar para mais de três quartos do consumo mundial em 2050, mesmo esse consumo crescendo de forma mais desacelerada (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012), conforme figura 26, onde a linha azul escura representa o consumo de nutrientes (N, P e K) e a linha azul clara o consumo por *kg/ha*:

Figura 26 – Consumo mundial de fertilizantes: passado e projeções (1960 – 2050).



Fonte – Adaptado de Alexandratos e Bruinsma (2012), p. 129.

Ademais, sabe-se que o setor do agronegócio é de grande importância para a economia brasileira tanto pela geração de empregos, pelos saldos comerciais positivos com o resto do mundo quanto pela contribuição para o crescimento e desenvolvimento econômico do país. O setor do agronegócio é composto por quatro grandes elos: o segmento de insumos, do qual a indústria de fertilizantes faz parte; a produção

agropecuária propriamente dita; a indústria agropecuária, que utiliza a produção como insumo; e o segmento de serviços associados a toda a cadeia (CRUZ *et al.*, 2017).

O Brasil atingiu uma produção considerável de fertilizantes fosfatados em 2017, representando cerca de 33% do consumo, em relação a produção de nitrogenados e potássicos, apenas 7% e 2%, respectivamente (FIESP, 2018). No caso dos NPK, são fertilizantes multinutrientes que contêm determinada porcentagem dos três nutrientes principais: o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), importando 86% em 2017. Porém, projeta-se que em 2027 a dependência de fosfatados, nitrogenados e NPK reduzam para 65%, 87% e 85%, respectivamente. Além disso, também destaca-se a demanda do fertilizante NPK em 2027 nas principais culturas, como a soja que terá um crescimento de 86%, o milho 57% e a cana-de-açúcar 38% (FIESP, 2018). Apesar de haver uma redução significativa nos fertilizantes N e P, as importações de NPK ainda serão altas devido ao aumento da demandas das culturas e a falta de suprimento interno, considerando que em 2027 estima-se um consumo total de 20,9 milhões de toneladas de fertilizantes NPK.

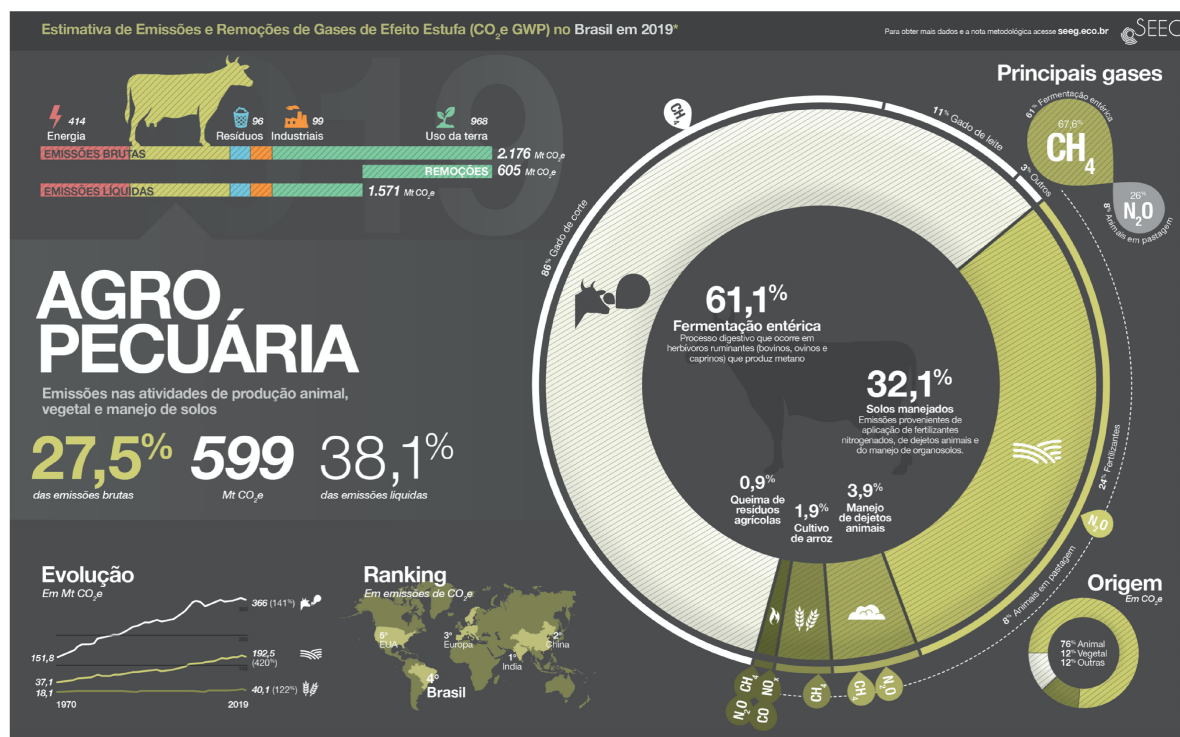
Entretanto, juntamente com esse consumo, há os efeitos prejudiciais dessa demanda crescente. De acordo com gráficos do (SEEG, 2020), em 2019 a agropecuária representou 27,5% das emissões brutas (599 milhões de toneladas de CO_{2eq}), onde dessa porcentagem 32,1% são provenientes de aplicação de fertilizantes nitrogenados, de dejetos de animais e do manejo de organosolos e 3,9% do manejo de dejetos de animais, além disso, o manejo de solos apresentou um crescimento de 420% entre 1970 e 2019, conforme ilustrado na figura 27:

Os setores como o sucroalcooleiro e de pecuária geram grandes quantidades de rejeitos, assim como o de RSU, representando um passivo ambiental para cada segmento. Com isso, uma solução para esses problemas de fertilização e a de gestão residual como ativo, pode vir da agricultura circular, que apresenta uma possibilidade de recuperar os recursos retirados da terra, mas ainda em circulação, nesse caso, os resíduos orgânicos. Esse conceito de economia circular é visto por meio da utilização de nutrientes de biomassa¹ como biofertilizante na agricultura e, então, fechando o ciclo em fósforo (P) e nitrogênio (N), onde os ciclos naturais de ambos (P e N) são identificados na estrutura de limites planetários, no qual esses limites devem ser gerenciados pela sociedade em uma abordagem global sustentável (TAMPIO *et al.*, 2017; HADIN *et al.*, 2017). Além disso, práticas de gerenciamento agrícolas podem auxiliar na redução de GEEs ao controlar as emissões geradas pelos resíduos (VANEECKHAUTE *et al.*, 2018).

Por esses motivos, as plantas de biogás para a geração de biogás e biofertilizante são o centro da futura economia circular. Fluxos de excesso de materiais, anteriormente considerados resíduos, provenientes de processos industriais, agricul-

¹ Toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal.

Figura 27 – Estimativa de emissões do setor agropecuário em 2019.



Fonte – SEEG (2020).

tura e outras atividades humanas podem ser canalizados através de digestores de biogás e convertidos em transportadores de energia úteis, fertilizantes orgânicos ricos em nutrientes e novos materiais (FAGERSTRÖM, 2018).

Em um ciclo biológico, onde está inserida a cadeia produtiva, os materiais são biodegradados para iniciar um novo ciclo, sendo esse processo, a capacidade da matéria de ser degradada pela atividade biológica. A decomposição está diretamente relacionada, onde a matéria orgânica é decomposta biologicamente por microorganismos contidos no material, principalmente bactérias e fungos (BOCKEN *et al.*, 2016). Ou seja, é o processo que acontece na digestão anaeróbica (DA).

Dessa forma, ao fechar os *loops* dos processos anteriormente lineares, a DA pode enfrentar os desafios de desperdício, energia, produção sustentável de alimentos e reciclagem de nutrientes de maneira sustentável e circular. Novas maneiras poderiam fortalecer o processo de digestão como parte do desenvolvimento de uma economia circular (ANTONIOU *et al.*, 2019). Alguns setores que podem servir como matéria-prima orgânica para a produção de biogás são: pecuária, resíduos sólidos urbanos (RSU), agrícola (vinhaça residual da produção de etanol) e saneamento.

O processo de digestão anaeróbica (DA) mostra-se essencial para a circularidade (ANTONIOU *et al.*, 2019). Ao utilizar essa tecnologia para o tratamento de resíduos e conseqüentemente para a geração de biogás e biofertilizante, proporciona-se para a sociedade novas possibilidades na transformação e aproveitamento dos

resíduos, apoiando assim a economia circular, criando então *loops* de materiais. Além disso, o tratamento controlado de materiais orgânicos em biorreatores fechados também pode diminuir os impactos ambientais nocivos, como emissões de CO_2 , NH_4^+ , N_2O , substâncias acidificantes, vazamentos de nutrientes, odores desagradáveis e riscos microbiológicos (LYYTIMÄKI *et al.*, 2018).

Na cadeia do biogás, o gás produzido pode ser transformado em energia elétrica, térmica ou biocombustível, enquanto o resíduo resultante, isto é, o digerido, pode ser devolvido à terra como um valioso fertilizante orgânico, contribuindo para a redução da demanda de fertilizantes minerais. O retorno dos resíduos como biofertilizante cria um conceito de agricultura sustentável, preservando a fertilidade do solo por meio de uma biodiversidade reconstruída e também ajudando a encontrar usos apropriados para resíduos orgânicos (DONIA *et al.*, 2018).

O digestato (biofertilizante) se trata de um produto que contém matéria orgânica com teor reduzido de carbono (por conta de sua perda na forma de CH_4 e CO_2) e alto teor de fósforo e, seu grau avançado de decomposição faz com que o solo absorva com maior facilidade os nutrientes (FERREIRA, 2013). Ou seja, as quantidades de nutrientes que são fornecidas ao digestor por meio da matéria-prima são as mesmas que as do digerido, acontece que durante a DA, ocorrem alterações bioquímicas que alteram os compostos orgânicos nos quais os nutrientes estão presentes e aumentam sua disponibilidade para as culturas (FAGERSTRÖM, 2018), tornando-os mais fácil de absorver. Portanto, o digestato pode reciclar nutrientes essenciais como o N, P e K de volta aos solos agrícolas (TSACHIDOU *et al.*, 2019b), sendo um exemplo da abordagem de economia circular.

Enfatizando, como destacado por Corré e Conijn (2016), o digerido da digestão anaeróbica não é um desperdício, mas um co-produto valioso. Contém a matéria orgânica restante e, em princípio, todos os nutrientes originalmente presentes no substrato.

Desse modo, o biofertilizante pode trazer de volta nutrientes e matéria orgânica para áreas de terras aráveis onde o potencial de esterco é pobre, contribuindo para planos de gestão de fertilização sazonais e territoriais eficazes e mais sustentáveis (GONTARD *et al.*, 2018). De uma perspectiva operacional, a amônia no interior da digestão, diferentemente do nitrogênio no esterco bruto, é imediatamente absorvida pelo solo. Portanto, contribui diretamente para o crescimento das plantas (YAZAN *et al.*, 2018).

No entanto, questões técnicas como as características do digestato podem ser uma barreira para seu uso. Suas propriedades dependem dos substratos de entrada, logo, são altamente não uniformes. O conteúdo de nutrientes de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) varia muito, tornando o valor econômico do digerido como fertilizante substituto altamente variável (DAHLIN *et al.*, 2015). Mas uma das vantagens ao utilizar fertilizantes orgânicos (incluindo o digerido), é que eles contêm não apenas NPK, mas

também outros macro e microelementos necessários à planta (CZEKAŁA *et al.*, 2020).

Além das propriedades do substratos, a qualidade do digestato e o seu potencial para uso agrônômico depende de fatores como: (a) tipo de biodigestor e tecnologia de biodigestão utilizada; (b) segregação e perdas de nutrientes nas estruturas de armazenamento dos substratos e do digestato; (c) eficiência dos sistemas pré-tratamento do substrato (ex.: separação de fases antes do biodigestor) e/ou do tratamento do digestato; e (d) diluição dos substratos e digestato com água (KUNZ *et al.*, 2019).

Sendo assim, o gerenciamento da qualidade do digestivo envolve uma série de permissões e padrões de qualidade para garantir a segurança e o valor do digestivo como fertilizante, condicionador do solo ou meio de cultivo.

No Brasil, as legislações não são muito claras a respeito da forma de obtenção do biofertilizante, sendo ele um produto resultante da fermentação da matéria orgânica na ausência total de oxigênio, ou seja, um processo anaeróbico. De acordo com o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de Dezembro de 1980, o biofertilizante é definido como:

“produto que contém princípio ativo ou agente orgânico, isento de substâncias agrotóxicas, capaz de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade, sem ter em conta o seu valor hormonal ou estimulante;”

Diferentemente do Brasil em que não há uma legislação específica com critérios e regras definidas para o uso de biofertilizantes, na Europa, a Comissão Europeia (2016), publicou um anexo ao Pacote da Economia Circular referente a “Proposta de Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece regras relativas à disponibilização no mercado de produtos fertilizantes com a marcação EC e que altera os Regulamentos (CE) nº 1069/2009 e (CE) nº 1107/2009”, fornecendo regras e diretrizes para o mercado de fertilizantes.

Nesse anexo, um produto fertilizante pode conter digerido obtido através de digestão anaeróbia proveniente de diferentes matérias de base:

- Bio-resíduos, que conforme a Diretiva 2008/98/EC, são os resíduos alimentares e de cozinha das habitações, dos restaurantes, os resíduos similares das unidades de transformação de alimentos;
- Subprodutos animais da categoria 2, em conformidade com o Regulamento (EC) nº 1069/2009; caracterizado pelo chorume, guano não mineralizado e conteúdo do aparelho digestivo;
- Vinhaça, ou seja, um subproduto viscoso do processo de fermentação de melaço em etanol, ácido ascórbico ou outros produtos.

No caso dos bio-resíduos e subprodutos animais da categoria 2, há também considerações a respeito do processo, de modo a assegurar a higienização e homogeneidade do material. São exigidas que esse processo ocorra num tanque de agitação

contínua e em temperaturas adequadas para as bactérias mesófilas e termófilas. Durante o processo de digestão, todas as partes de cada lote devem apresentar uma variação da temperatura em função do tempo que corresponda a uma das seguintes situações:

- a) Digestão anaeróbia termófila a 55 °C durante, pelo menos, 24 horas e tempo de retenção hidráulica de, pelo menos, 20 dias;
- b) Digestão anaeróbia termófila a 55 °C, com um processo de tratamento que inclua uma fase de pasteurização (70 °C – 1h);
- c) Digestão anaeróbia termófila a 55 °C, seguida de compostagem a
 - 65 °C ou mais durante, pelo menos, cinco dias,
 - 60 °C ou mais durante, pelo menos, sete dias ou
 - 55 °C ou mais durante, pelo menos, 14 dias;
- d) Digestão anaeróbia mesófila a 37 – 40 °C, com um processo de tratamento que inclua uma fase de pasteurização (70 °C – 1h) ou
- e) Digestão anaeróbia mesófila a 37 – 40 °C, seguida de compostagem a
 - 65 °C ou mais durante, pelo menos, cinco dias,
 - 60 °C ou mais durante, pelo menos, sete dias ou
 - 55 °C ou mais durante, pelo menos, 14 dias;

O tempo de retenção hidráulica refere-se ao tempo em que o material orgânico permanece no interior do biodigestor. O tempo de retenção está relacionado a fatores como a granulometria (a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos), temperatura, entre outros.

Um ponto importante é a respeito da contaminação química do digerido, a qual geralmente vem de fontes humanas, como esgoto e inclui materiais inorgânicos (por exemplo, metais pesados) e compostos orgânicos persistentes. Os subprodutos agrícolas também podem conter pequenas quantidades de antibióticos, desinfetantes e amônio (AL SEADI, 2001), isso evidencia a necessidade de controle de qualidade dos substratos utilizados.

No caso da contaminação biológica, como os patógenos, é de extrema importância um controle rigoroso dos substratos, principalmente os provenientes de dejetos animais ao considerar sua utilização para biofertilizante e condicionador de solo (FAGERSTRÖM, 2018), sendo uma das opções o tratamento conforme abordado no item (d) referente ao processo da DA do Regulamento Europeu.

Além desses critérios exemplificados do processo da digestão anaeróbia, a proposta aborda outros requisitos mínimos de cada classe de substrato, para que então seja possível a aplicação e uso do digestato como fertilizante. Com base nesse

documento, constata-se que seguindo determinadas regras e legislações, é possível então o uso do digestato para fins de fertilização.

Sendo assim, conforme salientado por Resende *et al.* (2015) e Yan *et al.* (2018), seu uso como fertilizantes deve ser conduzido corretamente, pois caso os critérios técnicos não sejam seguidos, podem haver impactos negativos ao ambiente, à medida em que esses efluentes podem conter metais pesados e micro-organismos potencialmente patogênicos capazes de causar contaminação do solo, das águas e do ar. Neste sentido, para a utilização dos biofertilizantes de biodigestores em sistemas de produção agrícola deverá ser observada a segurança microbiológica para sua aplicação.

Outra questão apontada por Insam *et al.* (2015) e Babson *et al.* (2013), é com relação a distância considerável entre a produção agrícola e os digestores em larga escala, o que pode ser um empecilho de geração e também um problema, pois, com muita frequência, os operadores da fábrica são tentados a evitar longas distâncias de transporte e sobrecarregam os campos próximos com digestos e essa carga pode trazer consequências ambientais negativas para o solo e águas subterrâneas.

Conforme já abordado, é possível considerar a separação sólido-líquido dos efluentes digeridos, fornecendo duas frações de materiais diferentes que podem ser manipuladas de forma independente, conforme Owamah *et al.* (2014) e Hjorth *et al.* (2010), o que solucionaria essa questão. E segundo Magri *et al.* (2017), a fração sólida pode ser transportada por distâncias maiores por causa da redução no teor de água, ou sofrer processamento adicional (por exemplo, compostagem, secagem, pirólise) para produzir produtos de valor agregado, o que resolveria o problema de custos apontados por Insam *et al.* (2015) e Babson *et al.* (2013) em relação ao transporte e uso. Por outro lado, a fração líquida pode ser usada para a fertirrigação de terras agrícolas adjacentes, ou pós-tratada de acordo com sua baixa taxa de C-N típica após estratégias de remoção ou recuperação de nutrientes. Dessa forma, é necessário adequar o projeto de forma que torne o uso da tecnologia viável para os produtores.

Considerando que há benefícios, bem como barreiras para a adoção da tecnologia, na perspectiva da economia circular, a construção de biodigestores para a produção de biogás e biofertilizante é um programa chave para aumentar a oferta de energia limpa, alcançar a redução de emissões e promover o desenvolvimento sustentável (GIACOMO, 2017). Porém, a sustentabilidade para a produção de biofertilizante depende da reciclagem adequada dos resíduos digeridos material, que deve ser tratado, descartado ou reutilizado adequadamente, evitando impactos negativos.

Essa questão evidencia que para alcançar a finalidade de implementação dos conceitos de economia circular sob o ponto de vista prático e real, é necessário que haja um estímulo de discussões e ações entre os diversos componentes da sociedade, como as instituições de ensino e pesquisa, associações, instituições governamentais, empresas dos setores industrial, do agronegócio, comércio e cidadãos. A sustentabili-

dade deve estar incutida nos hábitos dos indivíduos para que se torne representativo de sua coletividade e os ciclos venham a ser fechados, como é o caso da cadeia do biogás para a produção de biofertilizante e seu retorno à agricultura, podendo ser impulsionado por meio da SI.

6.1.2 Biofertilizante e Simbiose Industrial

Uma ideia central do conceito da SI, é que as empresas e outros atores econômicos formam redes de fornecedores e consumidores, que se assemelham a ecossistemas naturais. Então, para sobreviver e manter sua produtividade, esses atores contam com recursos disponíveis no ambiente natural (SOKKA *et al.*, 2011). Dessa forma, os resíduos que estão sendo gerados por um ator, serve como insumo para outro, fechando ciclos dentro desse ambiente produtivo.

Em particular, os resíduos resultantes de um processo de produção genérico podem substituir os insumos primários em outro processo. Por exemplo, criando um sistema simbiótico circular onde biorresíduos são usados para produção de energia e biofertilizantes que podem ser reutilizados para a produção de nova biomassa, dessa forma, a utilização de resíduos como biofertilizante deve satisfazer os requisitos mínimos de segurança e possuir uma concentração insignificante de elementos prejudiciais às plantas (HOLM-NIELSEN *et al.*, 2009). Além disso, o uso de produtos residuais locais também evita processos agrícolas intensivos, bem como o uso de fertilizantes orgânicos evita a produção, importação e aplicação de fertilizantes fósseis.

De encontro a esse conceito, os autores Martin *et al.* (2019), buscam no seu estudo avaliar o desempenho ambiental do emprego de fluxos de materiais residuais para a agricultura hidropônica vertical em ambientes urbanos, a fim de apoiar o abastecimento urbano de alimentos mais circulares, resilientes e sustentáveis. Para tal finalidade, um dos pontos analisados é o uso de biofertilizante obtido por meio de composto e resíduos de grãos de cervejaria. Os resultados indicam que os impactos decorrentes dos fertilizantes podem ser reduzidos com o emprego de biofertilizantes, reduzindo as emissões de GEEs em mais de 66%. De forma geral, os autores demonstram que essa relação de fluxos pode atuar de forma eficaz no que diz respeito sustentabilidade.

Porém, para atingir a circularidade nos fluxos residuais para meios de cultivo, o processo de DA necessitará de adaptação e otimização técnica através da utilização de várias opções de melhoria operando de forma simbiótica. Isso pode dar a oportunidade de obter benefícios coletivos significativamente maiores do que a soma dos benefícios individuais (PIERIE *et al.*, 2017).

Na seção a seguir, são apresentados os resultados simulados no cenário base e posteriormente, são identificadas e analisadas políticas e ações que favorecem a SI, visando a produção de biofertilizante.

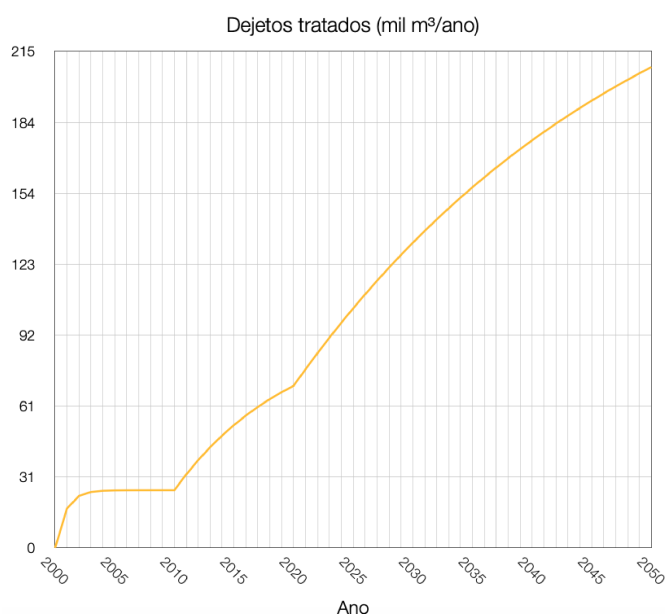
6.2 ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

6.2.1 Cenário BASE - BUSINESS AS USUAL (BAU)

Após a construção do modelo e posteriores validações, tem-se o cenário *Business-as-Usual* (BAU) para estimar o potencial de produção de biofertilizantes proveniente de dejetos de suínos em Santa Catarina. Este cenário tem como objetivo servir de referência para as simulações e projeta tendências com relação aos parâmetros estipulados sem sofrer alterações de outras variáveis inerentes ao sistema.

Por meio das metas de tratamento do Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), definiu-se a porcentagem referente a suinocultura. O Plano ABC tem como alvo o tratamento de 4,4 milhões de m^3 de dejetos de animais entre 2010 a 2020 e, para mensurar a quantidade de dejetos produzidos pela suinocultura, somou-se as cabeças de animais dos três maiores setores (bovinos, galináceas e suínos), conforme dados do IBGE (2019), a fim de identificar a parcela que a suinocultura representa – em torno de 8% – equivalente ao tratamento de aproximadamente 353 mil m^3 de dejetos. Ao estipular esses valores para Santa Catarina, em 2019 o estado representou 27,25% da produção total de suínos, o que corresponde ao tratamento de 96 mil m^3 de dejetos da suinocultura até 2020. Diante disso, é apresentado a simulação do tratamento de dejetos advindo da suinocultura de SC na figura 28.

Figura 28 – Tratamento de dejetos de suínos em Santa Catarina



Fonte – Autoria própria, 2021.

A quantidade de dejetos tratados é proporcional as metas. À proporção que se torna necessário o tratamento de uma quantidade maior de dejetos, também cresce a quantidade de dejetos tratados. Em 2020 a meta é de 96 mil m^3 , são tratados 70 mil

m^3 e, em 2050 que se aproxima de 290 mil m^3 , são tratados 208 mil m^3 de dejetos.

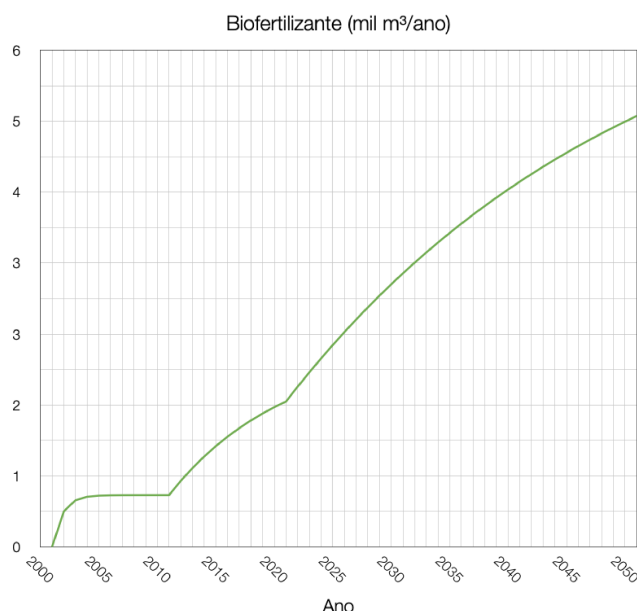
As projeções possuem variações devido ao sistema complexo simulado, o qual apresenta fatores de influência externas como consumo e exportação, bem como fatores intrínsecos ao processo como a gestão dos resíduos.

Com esse potencial de produção, é possível relacionar as simulações nas três dimensões do desenvolvimento sustentável conforme foram descritas por Korhonen *et al.* (2018): ambiental, econômico e social.

Na **dimensão ambiental**, há questões referentes a fechamento de ciclos produtivos e valorização residual, emissões de GEEs, além da escassez de matéria-prima e uso de combustíveis fósseis.

Para atingir o potencial de biofertilizante simulado na figura 29, é necessário realizar o tratamento de 208 mil m^3 de dejetos suínos em SC até 2050, conforme apresentado anteriormente na figura 28. Isso impacta em aspectos relacionados ao manejo adequado e tratamento de dejetos, ao considerar que quando são dispostos inadequadamente, se decompõem e emitem CH_4 para a atmosfera, contaminam os solos e águas pluviais. Além disso, também serve como matéria-prima para a produção de biofertilizante, auxiliando no fechamento de ciclos e agregando valor aos dejetos.

Figura 29 – Potencial de produção de biofertilizante - BAU



Fonte – Autoria própria, 2021.

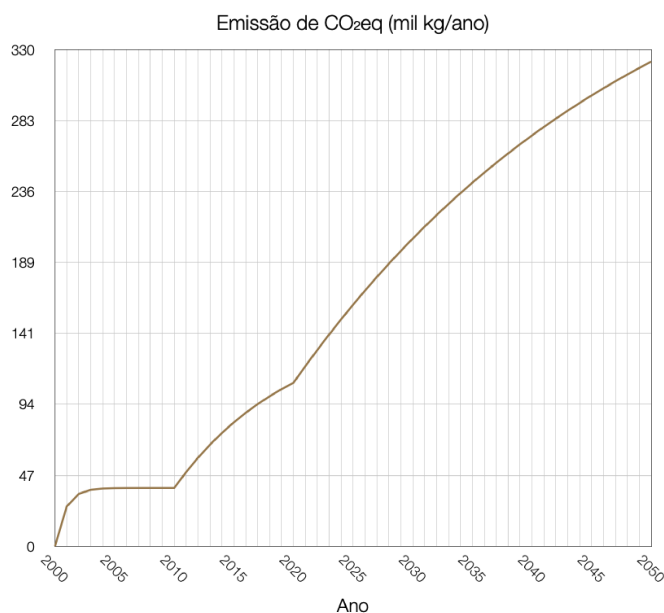
Essa simulação representa o potencial de produção de biofertilizante que é obtido por meio da DA, conforme os parâmetros apresentados na seção ?? e considerando as estimativas das metas de tratamento para o estado. Até 2020 tem-se um crescimento em ritmo lento, chegando a 1,7 mil m^3 , porém, ao triplicar a meta para 2050, esse potencial cresce de forma mais acelerada, atingindo 5,2 mil m^3 , represen-

tando um crescimento de 300% superior a 2020.

Na agricultura, os fertilizantes minerais são utilizados para o aumento da produtividade, porém, ocasionam diversos problemas como a degradação dos solos, emissões de GEEs, alto consumo de energia e uso de materiais fósseis para sua produção. Nessa pesquisa, o fertilizante nitrogenado analisado será a uréia, pois trata-se do fertilizante nitrogenado mais utilizado mundialmente, incluindo o Brasil, por ser um produto com alta concentração de nitrogênio e baixo custo. Para a produção de uréia, primeiramente deve-se sintetizar a amônia a partir de materiais como o gás natural, petróleo, resíduos pesados, contudo, essa síntese de amônia gera problemas em termos ambientais, pois consome de 1–2% do suprimento mundial de energia anual e gera mais de 300 milhões de Tm de CO_2 (VIEIRA, 2017). Por isso, identifica-se a necessidade de impulsionar e estimular o uso de diferentes formas de fertilização, como é o caso do biofertilizante.

Diante disso, inicialmente são estimadas as emissões de óxido nitroso quanto ao potencial produtivo de biofertilizante conforme apresentados na figura 30, para isso, é considerando a utilização de 100% do digestato como substituto e/ou complemento aos fertilizantes minerais, sendo uma alternativa mais sustentável tanto pelo fechamento de ciclos, quanto por redução da dependência de combustíveis fósseis.

Figura 30 – Emissão de óxido nitroso - biofertilizante (CO_2eq)



Fonte – Autoria própria, 2021.

De acordo com o cenário, até o ano de 2024 – que é o tempo que levará para atingir a meta de tratamento estipulada – as emissões serão de 150 mil kg de CO_2eq , porém, ao decorrer da simulação, a disseminação da prática de tratamento por DA se tornará mais abrangente e espera-se que com o aumento do potencial, também

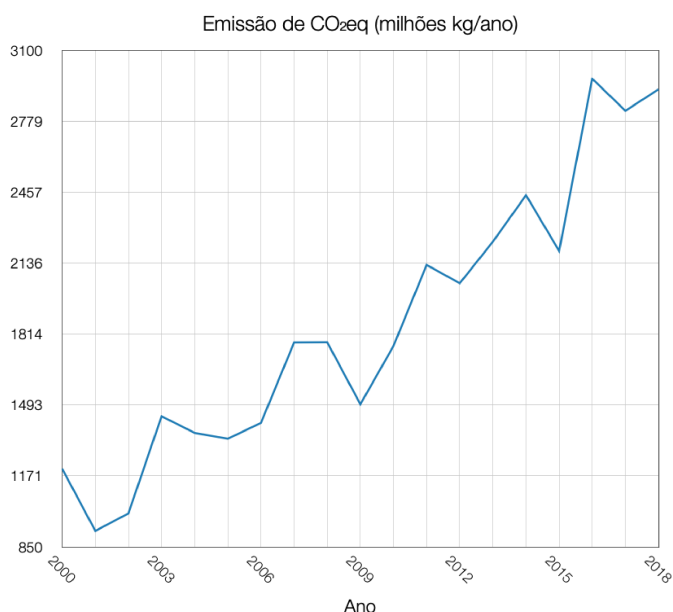
aumento o uso de biofertilizantes e, conseqüentemente, os valores de emissões serão crescentes, atingindo 322 mil kg de CO_2eq .

Porém, os biofertilizantes tem valores de concentração de nitrogênio muito inferiores quando comparados a uréia, sendo entre 1,5 – 2,0% e de 44,0%, respectivamente, por isso, necessita uma quantidade maior de aplicação.

Devido a uréia ser o fertilizante nitrogenado mais consumido no Brasil, também serão analisadas as emissões do seu uso na agricultura frente ao biofertilizante. As emissões decorrentes ao uso de uréia ocorrem devido ao processo de desnitrificação, sendo uma reação de redução microbiológica de nitrato (NO_3^-) para óxido nitroso (N_2O). A aplicação de fertilizantes nitrogenados estimula a desnitrificação por aumentar o conteúdo de NO_3^- no solo.

Na figura 31 são exibidos os valores da emissões de óxido nitroso relativos ao seu uso.

Figura 31 – Emissão de óxido nitroso - uréia (CO_2eq)

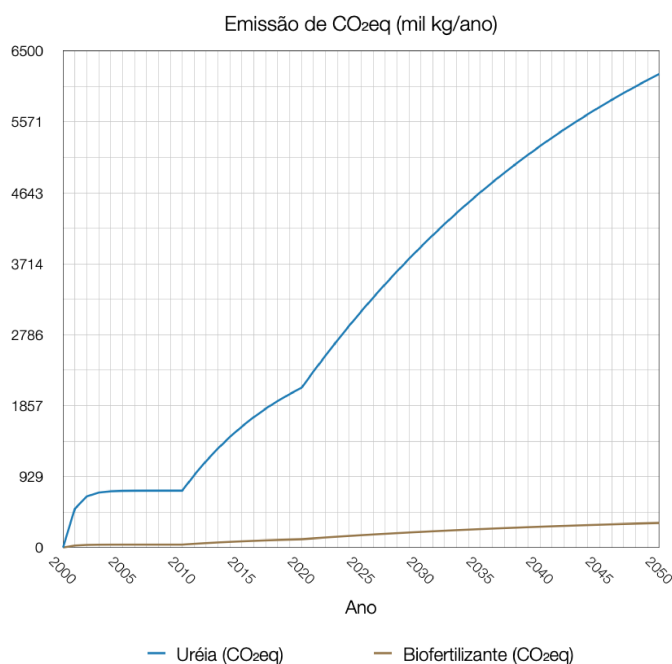


Fonte – Autoria própria, 2021.

As emissões apresentadas relacionadas a uréia são estimadas com base no consumo do Brasil entre os anos de 2000 a 2018, de acordo com dados da *International Fertilizer Association – IFASTAT (2021)*.

Entretanto, ao ponderar as emissões na mesma proporção do potencial de produção de biofertilizante, apresentado na figura 32, as emissões ainda são superiores quando comparado as emissões referentes ao uso de biofertilizante, principalmente devido a alta taxa de nitrogênio contida na uréia.

Em 2050, as emissões do uso de biofertilizante correspondem a pouco mais de 5% das emissões frente ao uso da uréia. Segundo Frattini *et al.* (2016), um total de

Figura 32 – Emissão de óxido nitroso - uréia (CO₂eq)

Fonte – Autoria própria, 2021.

289,8 Mt de CO₂ pode ser estimado como emissão global das fábricas de produção de amônia. Ou seja, a uréia tem impactos ambientais expressivos desde a sua produção até seu uso.

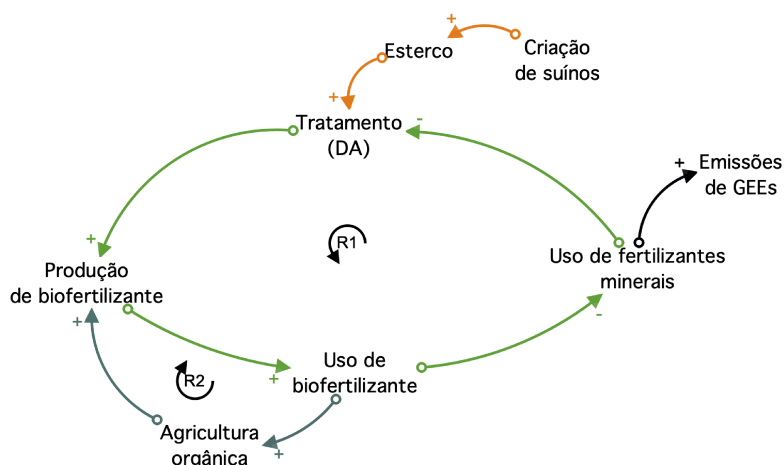
Por isso, apesar da quantidade reduzida de N na composição do biofertilizante, ele dispõe de forma reduzida o NO₃⁻ e também possuem a vantagem de liberação lenta, assim, aumentam os mecanismos de armazenamento físico e biológico de nutrientes do solo, mitigando os riscos do excesso de fertilização, bem como a redução de emissões tanto relacionado ao seu uso na agricultura, quanto ao mitigar gases ao tratar resíduos que possuem alto potencial poluidor.

Tratando-se de questões ambientais, o uso de biofertilizantes é um recurso valioso, seja pela redução de matérias-primas e energia utilizadas na produção de fertilizantes minerais, como na redução de emissões de GEEs e questão de fontes renováveis. Além disso, segundo Lima e Miranda (2014), os produtores afirmam que o poder biofertilizante líquido do biodigestor é melhor que os adubos tradicionais e outros fertilizantes para as pastagens, onde o uso do digestado para tal finalidade garante pastos verdes o ano todo.

Na figura 33, são mostradas as relações causais para a produção de biofertilizante em aspectos ambientais, sendo explanados os benefícios da prática de tratamento por DA para a agropecuária.

Nesse ciclo todos os fatores são diretamente proporcionais. À medida em que há expansão na criação de suínos, aumenta a quantidade de esterco produzido, portanto,

Figura 33 – Variáveis de relação na dimensão ambiental



Fonte – Autoria própria, 2021.

o tratamento por meio da digestão anaeróbica (DA) torna-se mais necessário. Com esse crescimento da DA, a tendência na produção de biofertilizantes cresce, favorecendo também seu uso e, conseqüentemente, tem-se a redução do uso de fertilizantes minerais, impactando diretamente na redução de emissões de GEEs. Além disso, a difusão do uso de biofertilizante na agricultura beneficia a produção orgânica e também faz com que a produção de biofertilizante se torne maior devido a demanda. Ou seja, esses fatores criam um reforço positivo (R1) para a produção e uso de biofertilizante.

Já na **dimensão econômica**, de acordo com Chojnacka *et al.* (2020), as indústrias de fertilizantes não possuem interesse em recursos renováveis, justamente porque não há argumentos econômicos. Porém, essas indústrias apresentam problemas ambientais, criando uma perspectiva de mudanças tecnológicas, como por exemplo a emissão de CO_2 na produção de amônia, considerando que as fábricas de fertilizantes de nitrogênio necessitam pagar taxas pelas licenças de emissão de CO_2 (CHOJNACKA *et al.*, 2020), isso representa um dos benefícios da economia circular na agricultura ao reduzir custos decorrentes de legislação ambiental, especialmente, porque a DA é um processo no qual trata de forma controlada a decomposição dos resíduos e as emissões, que deixam de ser emitidas, podem retornar como benefícios por meio dos créditos de carbono ao reaproveitar todos os produtos do processo.

Com relação aos custos do uso de fertilizantes minerais, em 2020 de acordo com a GlobalFert (2021), os preços variaram entre US\$232 a US\$278 por tonelada de uréia, onde ainda em 2020 a importação de uréia teve um aumento de 28% em relação a 2019. Esse aumento da demanda por fertilizantes e a falta de produção interna, aliado as variações no preço do dólar, pode trazer grandes impactos econômicos aos produtores possuírem essa dependência externa. A complementação com o uso de biofertilizantes para suprir essa demanda, pode incluir em ganhos para os produtores decorrentes tanto do manejo dos dejetos em muitas propriedades, bem como por se

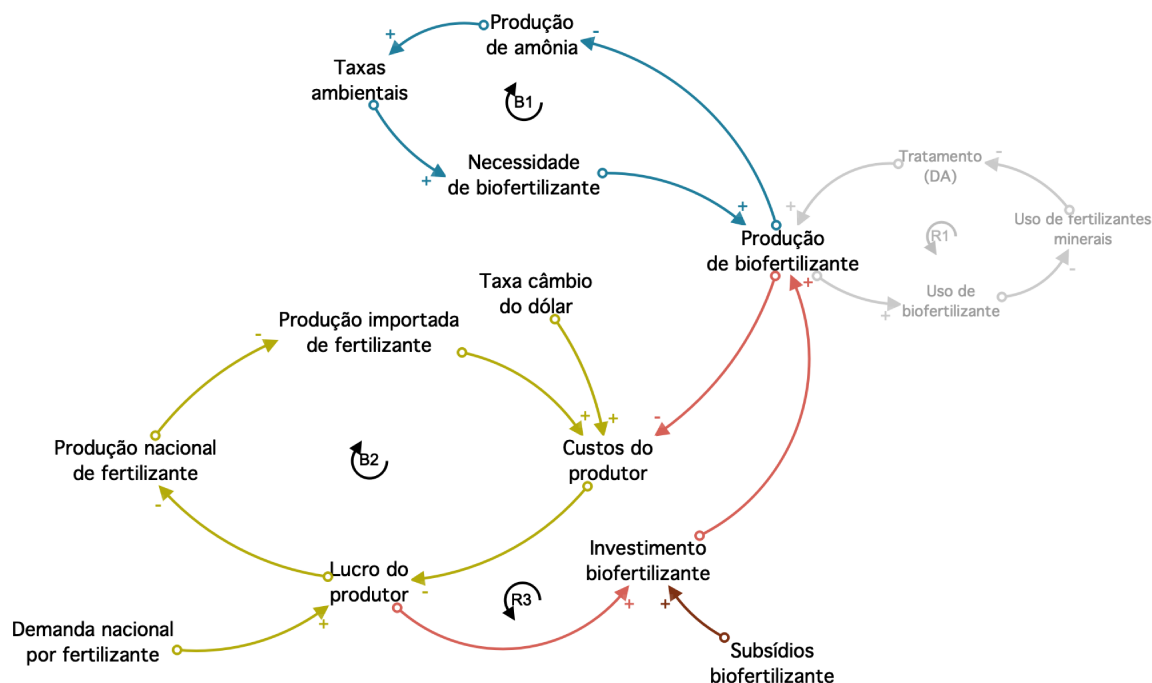
tratar de um produto com valor de produção inferior ao fertilizantes químicos (TURCARDONA *et al.*, 2018; STUCHI, 2015).

Lofhagen *et al.* (2018) apontam em seus estudos, que uma planta de tratamento compartilhada por 33 produtores, produz em torno de 14 mil m^3 de biofertilizante ao ano, em que 32 produtores que utilizam biofertilizante – aproximadamente 438 m^3 /ano para cada – gera uma economia de US\$ 600 ao ano. No caso da simulação, até 2050 há o potencial de produção de biofertilizante de quase 6 mil m^3 apenas na suinocultura do estado de SC, indicando que os produtores podem se favorecer ao empregá-lo na agricultura.

No entanto, apesar de haver pontos econômicos positivos, os autores Takemura *et al.* (2019) e Lofhagen *et al.* (2018) destacam que os maiores problemas com relação ao tratamento e posterior uso de resíduos, é por conta da distância entre as áreas agrícolas e o alto custo de transporte, armazenamento e processamento.

Para que o biofertilizante venha a se tornar uma opção mais viável visando reduzir o uso de fertilizantes minerais, são necessárias políticas que incluam o fornecimento de subsídios para uso de produtos sustentáveis, aumento dos impostos sobre fertilizantes químicos, além de serviços de extensão para estimular o uso de biofertilizantes (WANG, Y. *et al.*, 2018), como mostra a figura 34.

Figura 34 – Variáveis de relação na dimensão econômica



Fonte – Autoria própria, 2021.

Anteriormente no diagrama causal na dimensão ambiental, foi abordado que o aumento no tratamento de esterco suíno, é proporcional a sua produção e uso. Porém, conforme Yan Wang *et al.* (2018), são necessários subsídios para que esses investi-

mentos e uso venham a se tornar viáveis, principalmente porque envolvem mudanças em diferentes níveis, já que além dos custos relacionados a planta de tratamento, há também custos de mão-de-obra, gerenciamento residual, armazenamento, transporte e demais custos implícitos ao processo. Ao dispor desses incentivos financeiros, a propensão ao crescimento da DA, impacta nas demais variáveis, que economicamente falando, reduzirá custos de importações de fertilizantes minerais, os quais apresentam variações de preços devido ao dólar.

No caso da **dimensão social**, um dos pontos fortes é a oportunidade de modelos de negócios sustentáveis. Atualmente, devido as questões relacionadas a sustentabilidade, mudanças climáticas e mudanças no comportamento de consumidores/produtores, indica que há uma lacuna a ser preenchida no que diz respeito a indústria de fertilizantes, as quais atualmente tem seus produtos baseados em matérias-primas derivadas de combustíveis fósseis e materiais não renováveis.

Esses modelos de negócios muitas vezes são fomentados por pesquisas. É importante que esses negócios sustentáveis saibam quais nichos precisam ser explorados, compreender quais recursos devem ser utilizados e qual a necessidade do setor, para que então seu produto venha a ser adotado. Essas atividades envolvem pesquisas tanto na área tecnológica, principalmente por analisar a eficiência do tratamento, bem como aprimorar para que o uso de dejetos suínos seja seguro na agricultura, além de pesquisas comportamentais que compreendam os atores envolvidos.

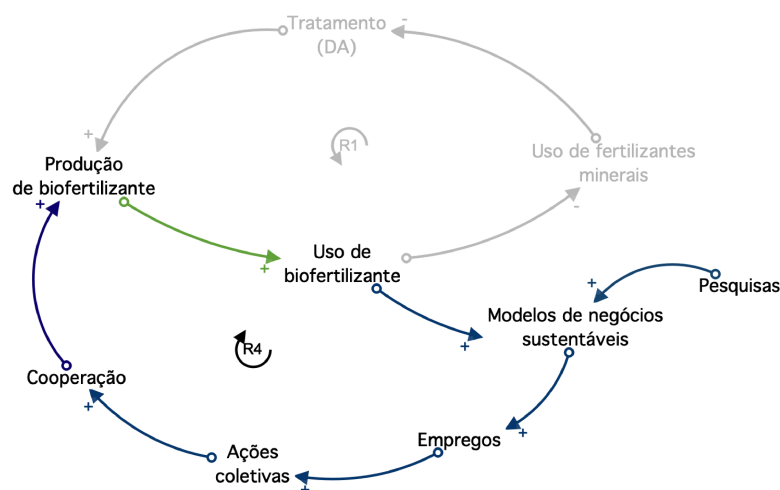
Além disso, esses negócios também agregam positivamente para a geração de emprego, ações coletivas e cooperação, conforme Korhonen *et al.* (2018). E como os empregos estão diretamente relacionados ao capital humano, desenvolver o capital intelectual e o conhecimento são essenciais, já que são os trabalhadores que movem uma empresa. Com isso, de acordo com Porritt (2011), é possível promover o aumento de capital humano por meio de acesso a treinamentos, desenvolvimento e aprendizagem, oferecimento de um salário razoável e justo para funcionários e parceiros de negócios, além da criação de oportunidades de trabalho diversificado. Esses são fatores que inserem os indivíduos na sociedade e também destacam a importância da cooperação entre produtores – indústrias.

No que diz respeito as ações coletivas e cooperação, um exemplo é o Condomínio de Agroenergia para a Agricultura Familiar de Ajuricaba, localizado no Oeste do Paraná, que visa atender de forma adequada os resíduos gerados por 33 pequenas propriedades, transformando-as em ativo econômico para os produtores. As fazendas possuem áreas entre 10 e 20 hectares, que produzem soja, milho, trigo, 1072 cabeças de bovinos e 3082 cabeças de suínos, gerando aproximadamente 821 m^3 de biogás por dia e 16 mil toneladas de resíduos/ano (LOFHAGEN *et al.*, 2018). De acordo com Chertow (2000), os fatores chave como a colaboração e possibilidades de sinergia advindas da proximidade geográfica dos empreendimentos são conceitos básicos da

simbiose industrial.

A relação entre esses fatores na dimensão social também criam um laço de reforço (R4), conforme a figura 35.

Figura 35 – Variáveis de relação na dimensão social



Fonte – Autoria própria, 2021.

Os modelos de negócios sustentáveis, são formentados ao ter um ambiente ideal por meio da difusão e adoção do uso de biofertilizante aliado as pesquisas, tornando esse cenário mais propício a criação de novos negócios. Ao surgirem, eles proporcionam a geração de novos empregos, pois será necessário mais mão-de-obra, conhecimento e capital intelectual. Com isso, tem-se a percepção do coletivo, onde os indivíduos compreendem os benefícios obtidos e gerados, os pensamentos são voltados a comunidade, criando então cooperação para que esses benefícios sejam ampliados. Ao expandir a cooperação, seja entre produtores-produtores ou produtores-indústrias, há uma troca entre as partes interessadas, fechando um ciclo que, apesar de ser social, favorecendo a produção de biofertilizante.

Diante disso, após analisar o potencial de produção de biofertilizante nas três dimensões da EC (ambiental, econômica e social), essas relações são apresentadas na figura 36.

A economia circular para ser bem sucedida, precisa ter um potencial de ganha-ganha em todas as dimensões. Conforme discutido anteriormente, há muitos fatores positivos em todas as dimensões, em especial nos aspectos ambientais, porém, também há fatores que podem ser uma barreira, principalmente quando se refere a dimensão econômica, que é o ponto principal para a difusão e adoção de um novo modelo produtivo, considerando que são necessários investimentos, sendo indispensável haver subsídios para suprir esses custos e tornar o tratamento por digestão anaeróbica (DA) mais viável.

É possível observar que de fato as dimensões se complementam e trazem benefícios para a produção de biofertilizante, já que apresentam laços de reforços e balanceamentos, favorecendo o sistema. Tendo como base o modelo de EC de Korhonen *et al.* (2018), referente aos *inputs*, é notório que a tendência é a redução no uso de materiais virgens, nas taxas ambientais, bem como nas questões relacionadas a energia, pois, ao reduzir a síntese de amônia, matéria-prima para a produção de fertilizantes nitrogenados (por exemplo, uréia), há uma queda no uso de combustíveis fósseis, com isso, buscam-se meios mais sustentáveis para suprir essa lacuna. A valorização residual dos dejetos da suinocultura é uma alternativa direcionada para o tratamento e posterior produção de biofertilizante, visto que a demanda desse produto aumentará à medida em que o uso de fertilizantes minerais for reduzido. Ademais, há também o abatimento de custos de taxas ambientais decorrente de emissões de CO_2 , pois a demanda produtiva de amônia é menor conforme a redução do consumo. Apesar dos benefícios, os custos dessa tecnologia são aplicáveis aos produtores, e que em geral, não possuem condições de arcar com esses investimentos, por isso, como abordado anteriormente, as políticas e fomentos são cruciais para o desenvolvimento de uma agricultura circular, pois são imprescindíveis investimentos para se obter entradas e saídas sustentáveis, além das atender as mudanças nos modos de consumo predominantes.

Com relação aos *outputs*, pode-se dizer que os benefícios observados são consequentes aos *inputs*. Com a redução do uso de combustíveis fósseis e energia, há menos emissões de GEEs tanto da produção de amônia quanto relativo ao uso de fertilizantes minerais, favorecendo custos de controle de emissões, além da redução de resíduos e seus respectivos sistemas de gestão. Ao utilizar os resíduos para a produção de biofertilizante, cria-se uma tendência circular na agropecuária, por isso, essa mudança de modelo linear para circular, também favorece novos modelos de negócios, justamente por abranger novos nichos de mercado, impactando em ganhos sociais ao gerar novas oportunidades de emprego, além de maior senso de comunidade e cooperação, a qual tem se mostrado fundamental para atingir bons resultados, pois visam os objetivos em comum, formando uma simbiose entre diferentes partes interessadas.

Por essa razão, o conceito de simbiose industrial é uma peça-chave e fundamental para obter maior adesão e atingir melhores resultados com relação ao tratamento de dejetos de animais, principalmente por ser uma tecnologia não muito acessível para pequenos agricultores. Na sequência, será analisado como a simbiose industrial pode auxiliar no desenvolvimento da economia circular na agropecuária por meio da cooperação e colaboração para fechamento dos ciclos produtivos através do tratamento de dejetos para a geração de biofertilizante e posterior uso na agricultura.

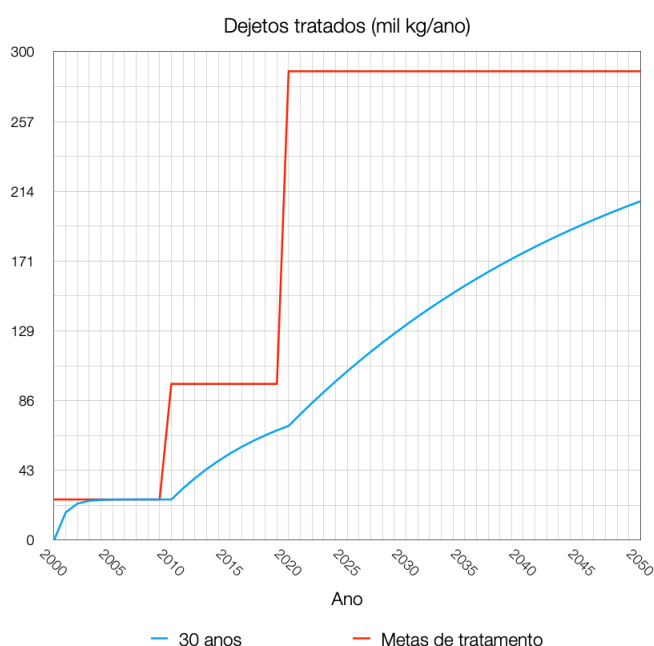
6.3 ANÁLISE DA SIMBIOSE INDUSTRIAL PARA A ECONOMIA CIRCULAR

A SI pode ser descrita como a cooperação de atores interessados em um determinado objetivo em comum, porém, os motivos das diferentes partes interessadas podem variar (GONTARD *et al.*, 2018). No caso dos resíduos orgânicos, a maioria as indústrias de fertilizantes não apresentam interesses por não ser um produto que apresenta muita demanda e poucos benefícios econômicos, visto que os fertilizantes minerais ainda são mais difundidos e vendidos em grande quantidade. Porém, essa visão aos poucos vem tomando um novo rumo, como é o caso de indústrias em SC.

Na região sul há a NIOORG FERTILIZANTES e no oeste a TERRAPLANT FERTILIZANTES, indústrias de fertilizantes e que atualmente possuem na sua linha de produtos fertilizante orgânico derivado de esterco e cama de aves, onde ambas adquirem esses dejetos através da cooperação com os criadores da região. Essas indústrias apesar de possuírem fertilizantes minerais, agora exploram um nicho de consumidores que buscam produzir de forma mais sustentável, além de incentivar a simbiose industrial com os produtores locais.

Na figura abaixo é representado o cenário BAU de 10 anos (2010 a 2020), no qual a meta de tratamento é estipulada de acordo com o Plano ABC, bem como o período estabelecido. Após 2020, são definidos 30 anos para atingir a meta. Nesse cenário, não são consideradas ações ou políticas que busquem favorecer o tratamento, apenas analisar o resultados do plano.

Figura 37 – Dejetos tratados com tempo de ajuste de 30 anos



Fonte – Autoria própria, 2021.

No cenário BAU, a meta estipulada para o período é atingida somente após

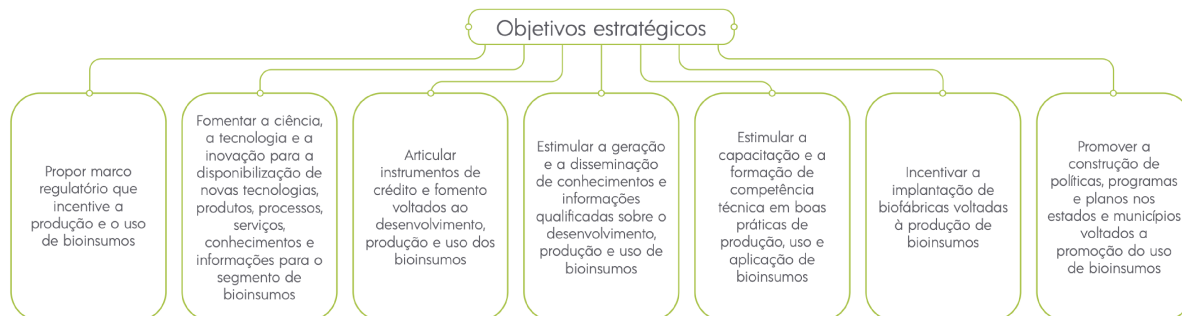
2024, também não alcançando a meta de valores estabelecidos até 2050, atingindo no máximo 208 mil kg de dejetos tratados, um valor muito inferior ao pretendido, considerando que em longo prazo espera-se que o tratamento por DA esteja mais difundido e aplicável.

Porém, esse cenário não é o ideal. As questões de sustentabilidade estão cada vez mais críticas, mostrando que são necessárias mudanças em diferentes dimensões, incluindo a agropecuária que representa uma parcela significativa nos problemas ambientais, não apenas a nível local e envolvendo diversos atores como produtores e indústrias de fertilizante.

Por isso, políticas e incentivos que promovam a simbiose industrial são indispensáveis para que essa cooperação e parceria venham a se concretizar na prática, como é o caso do Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), que engloba diversos atores.

O PNB tem como objetivo ampliar e fortalecer a utilização de bioinsumos para a promoção do desenvolvimento sustentável da agropecuária brasileira (MAPA, 2020). Além disso, possui diferentes objetivos estratégicos, desde marcos regulatórios, fomentos em P&D e financeiros, difusão de conhecimento e incentivos para abertura de indústrias de bioinsumos, conforme a figura 38.

Figura 38 – Objetivos estratégicos do Programa Nacional de Bioinsumos - PNB



Fonte – MAPA (2020), p. 7

Esse programa pode ser uma política essencial para que o tempo de metas seja reduzido, considerando que busca promover ações estratégicas para o desenvolvimento e adoção de práticas para tornar a agropecuária sustentável. Corroborando, Yan Wang *et al.* (2018) traz que, para estender o uso de biofertilizantes, políticas nacionais, incluindo subsídios, são indispensáveis para estabelecer a infraestrutura necessária para coletar, armazenar, tratar e distribuir o produto.

As políticas são importantes e de fato trazem um impacto positivo para o setor, além do mais, um conceito muito abordado na simbiose industrial é a capacidade institucional, podendo também ser relacionado ao que foi abordado anteriormente na dimensão social da EC.

Dentro da capacidade institucional, há a capacitação institucional e que envolve os processos (em redes de atores) que a desenvolvem (LINDFORS *et al.*, 2020),

podendo então ampliar o engajamento na colaboração e cooperação. Esses atores são produtores, consumidores, indústrias, instituições e demais partes interessadas.

Lindfors *et al.* (2020), analisaram uma série de *workshops* e atividades provisórias que foram empregues para fortalecer a capacidade institucional para aumentar a produção e o uso de biogás no município de Norrköping, na Suécia. Os autores concluíram que a série de *workshops* permitiu que diferentes atores se familiarizassem, aprendessem juntos e elaborassem estratégias, sem exigir muito investimento dos participantes ou do organizador. Além disso, essa iniciativa criou um ambiente favorável, onde os atores puderam se encontrar e discutir um tema de interesse comum.

Por esse motivo, as associações também são fundamentais nesse processo de troca de conhecimento, inserção de atores, *networking*, aproximação e alinhamento de objetivos. No setor do biogás, as associações mais importantes e conhecidas para o impulsionamento da tecnologia são a Associação Brasileira de Biogás (ABiogás) e o Centro Internacional de Biogás (CIBiogás), que também promovem eventos e capacitações para o setor.

No caso da ABiogás, uma das ações mais conhecidas é o Fórum do Biogás, sendo o maior evento do setor na América Latina e, que tem como objetivo promover a inserção definitiva do biogás e do biometano na matriz energética brasileira, reunindo representantes de todos os setores da cadeia de produção, aproveitamento e beneficiamento do segmento. E o CIBiogás, em 2018, abriu cursos à distância, como por exemplo Fundamentos do Biogás, Operacionalização de biodigestores e Biogás para geração de energia elétrica. O objetivo é ofertar capacitações adequadas às necessidades brasileiras no segmento de energias renováveis, que está entre as fontes energéticas que mais geram empregos no mundo atualmente (PTI, 2018).

Essas ações como *workshops*, fóruns, eventos, cursos e demais atividades que propiciem um ambiente que gere troca de conhecimento, interações entre atores, ampliação da perspectiva a respeito de trocas, são indispensáveis para que os atores tenham visão estratégica, alinhem seus problemas, busquem criar ações que de fato os solucionem e também tragam benefícios, bem como que ocorra mobilização para determinada finalidade.

Além disso, nessa questão de senso de coletividade e cooperação para atingir um objetivo em comum, a PNB pode representar um avanço, à medida em que serão necessários novos conhecimentos no que diz respeito aos bioinsumos, formas de obtenção, circularidade nos processos e modos mais sustentáveis na agropecuária.

A simbiose industrial deve ser vista como uma oportunidade de negócio, visto que tem impactos na redução de custos ao utilizar subprodutos como matéria-prima no processo ao invés de matéria virgem, quando em cooperação com produtores locais, há uma proximidade geográfica que favorece os custos de logística e transporte, redução de custos de gerenciamento residual e além de tornar a empresa ambientalmente

mais sustentável.

Desse modo, posteriormente, será analisado como as políticas e demais ações podem auxiliar no tempo de ajustes para atingir as metas referentes ao tratamento de dejetos da suinocultura em SC.

6.3.1 Políticas para a redução de tempo de ajuste

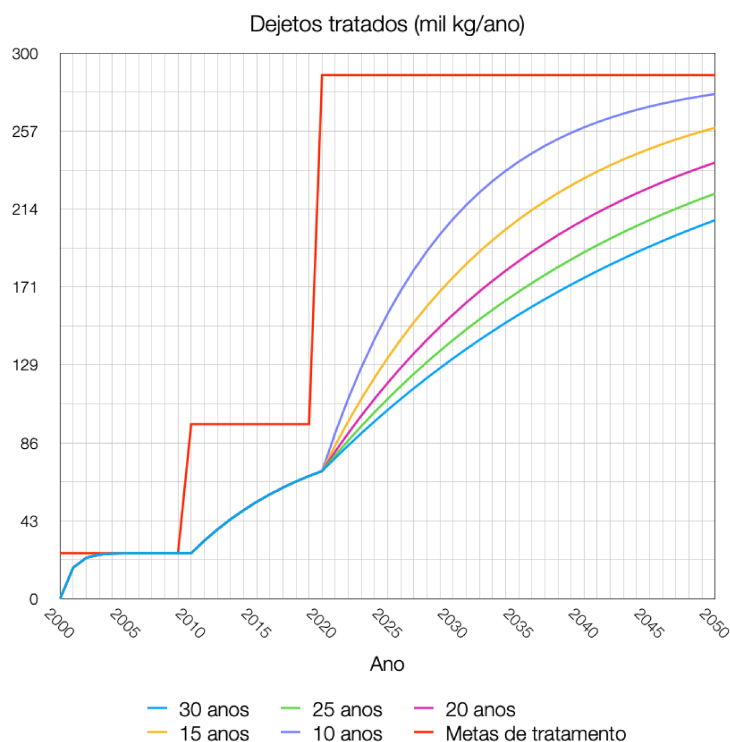
O tempo de ajuste é relativo ao tempo estipulado para atingir a meta determinada. No caso do cenário BAU, foi considerado o tempo de 10 anos para atingir a primeira meta de 96 mil m^3 de dejetos tratados até 2020 e posteriormente, ao triplicar a meta para 288 mil m^3 , triplicando também o tempo de ajuste. Porém, nem sempre as metas são alcançadas nesse período devido as variáveis intrínsecas ao processo.

Ao considerar as análises acima para a economia circular, pode-se ter como exemplo os subsídios como um fator para a redução. Sabe-se que os custos de investimento são uma barreira para a adoção da biodigestores e ao tratamento dos dejetos por meio da DA, comparado apenas ao gerenciamento através da decomposição. Esse é um valor que pode demorar para ter retorno, além do produtor nem sempre dispôr desse montante. Ao oferecer subsídios e fomentar a adoção dessa tecnologia de tratamento por meio de créditos e financiamentos, torna-se mais viável a construção dessas plantas de biodigestores, estimulando para que mais atores adquiram esses equipamentos e, com isso, atenda uma maior parcela de produtores. Ao ampliar a gama de adotantes que dispõem de biodigestores para a DA, tem-se como consequência, o tratamento de maiores quantidades de dejetos, com isso, a tendência é atingir a meta em um tempo menor.

A figura 39 demonstra como a redução do tempo de ajuste nas metas pode impulsionar o potencial produtivo de biofertilizante. Essa redução de tempo e, consequente, aumento do potencial de produção, pode ser obtido por meio das medidas que favoreçam a simbiose industrial, seja por meio de políticas, como por exemplo os subsídios ou pela capacidade institucional que proporcione esses conhecimentos convergentes.

Ao reduzir o tempo de ajuste de 30 anos para 10 anos, o valor de dejetos tratados começa a ficar mais próximo a meta a partir de 2040, sendo que ao considerar o tempo inicial, o tratamento total de aproxima de 208 mil kg/ano , enquanto no menor tempo de ajuste esse valor é maior que 277 mil kg/ano , ficando próximo a meta de tratamento estimada para 2050 de 288 mil kg/ano . Essa mesma tendência é seguida para uma redução menor do tempo, como é o caso de 15 e 20 anos, que representa um aumento de 14% e 7%, respectivamente, demonstrando que mesmo que haja uma redução pequena no tempo de ajuste, há uma contribuição significativa no crescimento da quantidade de dejetos tratados, que tem impactos diretos no potencial produtivo de biofertilizante.

Figura 39 – Dejetos tratados em diferentes tempos de ajustes



Fonte – Autoria própria, 2021.

Porém, ainda que o melhor cenário se apresente no tempo de ajuste de 10 anos, atualmente não se percebe muito a viabilidade desse tempo, justamente porque não há infraestrutura necessária para essas operações e, apesar de estar se tornando uma tecnologia mais difundida, ainda há a falta de políticas, engajamento e ações que tornem essas práticas mais aplicável em grande escala e viabilizem a sinergia entre atores. Além disso, muitos produtores tratam os resíduos por meio da compostagem por ser tratar de uma alternativa mais acessível e barata, não tendo interesse em buscar outros meios. Contudo, em geral, os fatores econômicos que em muitas vezes podem ser um empecilho para que o tratamento seja aplicado, devido aos custos de investimento, podem ser sanados por meio dessa troca com indústrias que geram biofertilizante, trazendo benefícios para toda a cadeia, além de demais benefícios ambientais e sociais.

Dessa forma, conforme observado na figura 39, o não alcance das metas ocorre devido a diversos fatores conforme discutidos, justamente pela falta de condições favoráveis em diferentes aspectos para que a agropecuária venha a desenvolver um ciclo fechado nos seus sistemas produtivos. De acordo com as categorias de barreiras listadas por Golev *et al.* (2014) e com os estudos realizados a respeito da produção de biofertilizante com resíduos provenientes da suinocultura de Santa Catarina, algumas ações que podem ser tomadas com relação a cada uma delas são descritas no quadro 3.

Quadro 3 – Ações para as barreiras para a SI na agropecuária.

Categoria	Descrição
1. Compromisso com o Desenvolvimento Sustentável	As metas e estratégias das empresas devem visar práticas sustentáveis e projetos atuais e futuros que permitam essa sinergia com outros atores.
2. Informação	Criar relatórios que descrevam dados qualitativos e quantitativos detalhados sobre os fluxos de resíduos da suinocultura e as necessidades de outras empresas para analisar se é viável.
3. Cooperação	A cooperação entre as partes interessadas e com objetivos em comum podem beneficiar projetos sustentáveis com a troca de resíduos visando ciclos fechados, sendo esse o conceito-chave da simbiose industrial.
4. Técnico	A troca de experiências, conhecimentos e treinamentos podem favorecer a área técnica do setor e tornar essa adesão mais fácil. Também deve-se investir em pesquisas para a implementação de modelos de negócios sustentáveis.
5. Regulatório	As políticas como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), PNB e Plano ABC podem impulsionar o aproveitamento e valorização residual para tornar um ativo econômico. Porém, são necessárias ações mais concretas para atingir metas. Além disso, políticas que envolvam o aumento de impostos e das taxas ambientais para uso de fertilizantes minerais também podem impactar na adesão a tecnologia.
6. Comunidade	A conscientização da comunidade dos impactos ambientais, econômicos e sociais que os resíduos da suinocultura geram, além de projetos que demonstrem os benefícios da troca e cooperação da comunidade visando o fechamento de ciclos, podem favorecer a EC.
7. Econômico	Juntamente com os aspectos regulatórios, as questões relacionadas aos subsídios financeiros referentes aos investimentos da tecnologia de tratamento e auxílios fiscais, podem também influenciar nessa produção de biofertilizante. Além disso, a simbiose indústria para reaproveitamento residual pode ser uma alternativa.

Fonte – Autoria própria, 2021.

Ainda há muitos desafios a serem superados por haver a necessidade de mudanças em toda a estrutura predominante do modelo linear e também uso de fertilizantes minerais em grande escala devido a sua viabilidade econômica, porém, os esforços devem ser contínuos para que essas práticas ocorram e modelos sustentáveis se tornem predominantes no setor.

Por fim, após apresentar alguns pontos nos quais a simbiose industrial pode beneficiar o direcionamento para a EC, a figura 40 demonstra alguma dessas relações dos fatores na cadeia de produção de biofertilizante por meio das setas roxas.

Ao considerar políticas como o Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), que fomenta o uso de bioinsumos, causa um impacto positivo na produção de biofertilizantes, pois a tendência é o aumento na demanda pelo produto, assim como o fornecimento de créditos para investir nessas plantas de tratamento, pois são medidas que visam incentivar a prática de uma agricultura mais sustentável, causando um ciclo de mudanças nos modos de consumo e destacando a necessidade de infraestrutura adequada para atender a demanda.

Devido a ações e políticas, como a PNB, juntamente com as questões referentes a sustentabilidade, aumenta-se o nicho de consumidores que buscam outras alternativas de consumo, abrindo espaço para que novos modelos de negócios se desenvolvam para suprir essa carência do mercado. Por isso, diferentes tecnologias e produtos que entreguem valor na sua cadeia produtiva, trazendo benefícios ambientais, sociais e econômicos e que objetivem a satisfação desses consumidores, favorecem novas mentalidades e condutas consciente para a sociedade, impulsionando o setor.

Além disso, visando a expansão desses modelos de negócios sustentáveis, as ações que possibilitem um ambiente adequado para *networking* são essenciais para o segmento. As associações como citadas anteriormente, por meio de fóruns, cursos, eventos e demais ações, proporcionam a troca de experiência e conhecimento entre os atores, dando a oportunidade das partes interessadas compreenderem o que o mercado e os consumidores precisam e também como podem atender essa lacuna existente, nesse caso, o desenvolvimento sustentável da agropecuária.

Com esses negócios sustentáveis crescendo, há também o aumento na geração de empregos e a necessidade de pessoas qualificadas, onde os *workshops* podem auxiliar nessas capacitações, criando um campo favorável para esse compartilhamento de ideias e *networking*, além de aprendizado por meio de palestras técnicas e atividades. E assim como as ações das associações, essas experiências fazem com que a comunidade compreenda a importância da cooperação para a sociedade como um todo, não apenas no âmbito social, mas também almejando melhorias e benefícios para toda a cadeia produtiva.

A cooperação referente ao conceito de simbiose industrial é um meio de estimular diferentes atores a darem um rumo da economia linear para a circular, principalmente na agropecuária, ao utilizar esses resíduos da suinocultura para produzir um produto de valor agregado e que pode ser utilizado na agricultura, substituindo um produto advindo de combustíveis fósseis e trazendo muitos benefícios, conforme discutidos anteriormente com base nas três dimensões da economia circular.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo identificar fatores que contribuam para a circularidade na agropecuária por meio da análise do potencial de produção de biofertilizante utilizando dejetos da suinocultura da região de SC. Esse tema se deve a grande problemática global que se tem atualmente: as mudanças climáticas. Essas mudanças são decorrentes de fatores como emissões de GEEs, uso de combustíveis fósseis, esgotamento de recursos finitos e modos de produção linear.

Por conta desses fatores, uma solução é o fechamento de ciclos, denominado EC. Esse modelo produtivo visa maximizar a vida útil dos recursos agregando valor, por isso, empregar na agropecuária é um conceito importante em direção à sustentabilidade. Os resíduos da pecuária quando mal manejados, emitem GEEs – em especial, gás metano (CH_4) – além de outros problemas como a contaminação de solos, águas e até mesmo de saúde decorrentes da proliferação de bactérias. Por isso, o tratamento dos dejetos por meio da digestão anaeróbica (DA) é uma opção para a solução desse problema.

Inicialmente, por meio de uma revisão de literatura, foi definido que o produto de análise do tratamento seria o biofertilizante, um subproduto da DA e que em geral não é tão bem aproveitado quanto o biogás. Por isso, buscou-se compreender as questões referentes a agropecuária e o uso de fertilizantes, constatando que a agricultura atual tem apresentado problemas de degradação de solo, poluição do ar e emissões de GEEs decorrentes de reações biológicas e químicas, devido ao alto consumo de fertilizantes minerais que visa aumentar a produtividade agrícola.

Isso significa que o setor da agropecuária representa uma parcela significativa das emissões, seja pelo manejo de dejetos de animais, quanto pela aplicação de fertilizantes nitrogenados. Com isso, a revisão de literatura permitiu identificar que o biofertilizante pode auxiliar no fechamento do ciclo produtivo biológico, pois ao utilizar os resíduos como matéria-prima para a DA, há a degradação controlada da matéria orgânica, evitando emissões para a atmosfera, gerando o biofertilizante, que é um composto rico em nutrientes orgânicos, principalmente nitrogênio, fósforo e potássio, essenciais para o crescimento das plantas e que pode ser utilizado na agricultura como substituto e/ou complemento aos fertilizantes minerais.

Tendo em vista essa alternativa que se apresenta viável, principalmente quando se trata das questões ambientais, verificou-se a necessidade de mensurar esse potencial de produção para ter uma visão quantitativa dos seus benefícios. Desse modo, o estudo foi delimitado a suinocultura do estado de Santa Catarina (SC), por ser o maior produtor de suínos do país. Para tal finalidade, foi construído um modelo de DS, fazendo uso de parâmetros pertinentes ao setor, além de metas propostas pelo Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC). Essas simulações

buscaram estimar valores relativos ao tratamento de dejetos, potencial produtivo de biofertilizante, emissões de óxido nitroso, além de avaliar as políticas e ações para atingir as metas. Os cenários foram gerados visando identificar fatores de benefícios e barreiras nas três dimensões da economia circular referentes ao potencial de produção de biofertilizante, além de posteriormente também analisar aspectos da simbiose industrial para fomentar a EC na agropecuária.

Do ponto de vista das três dimensões da EC, é possível identificar vantagens e barreiras para que essa tecnologia venha a se desenvolver e então, possamos atingir um alto potencial de produção de biofertilizante.

Na dimensão ambiental, os pontos principais são relativos ao tratamento de dejetos e as emissões de óxido nitroso (N_2O). Por isso, visando o fechamento do ciclo biológico na agropecuária, o tratamento de dejetos suínos tende a crescer conforme as metas estabelecidas no Plano ABC, bem como o potencial produtivo de biofertilizante, atingindo aproximadamente 208 mil m^3 em 2050 no cenário BAU. Isso significa que ao direcionar os dejetos para o produção de biofertilizante e, com a expansão desse potencial, há também a tendência na redução de fertilizantes nitrogenados, como é o caso da uréia, que de acordo com as simulações, apresenta uma quantidade muito superior de emissão de N_2O quando comparado ao biofertilizante. Além disso, também impacta na redução da síntese da amônia, derivada de combustíveis fósseis, bem como no consumo de energia para a sua produção, que apresenta números expressivos. Ou seja, é uma tecnologia que abrange diferentes pontos da cadeia produtiva, ao minimizar o uso de recursos não renováveis para a produção de fertilizantes através do uso de dejetos orgânicos que retornam para a agricultura, fornecendo os nutrientes necessários para a produtividade agrícola. Por isso, essa dimensão tem influencia direta nas dimensões econômica e social.

A dimensão econômica é impactada por se tratar de variáveis envolvendo custos de importação de fertilizantes nitrogenados, taxas ambientais, custos implícitos ao produtor, além de investimentos para a implementação de biodigestores. As vantagens podem ser com relação as taxas ambientais que as indústrias pagam devido as emissões de GEEs, em especial de CO_2 e, que podem ser reduzidas, ao tratar os resíduos e que irão mitigar as emissões da decomposição descontrolada e com isso, obter créditos de carbono, além da redução nos custos na aquisição de fertilizantes minerais, pois mais de 70% do consumo são supridos com importações e essas são dependentes das variações cambiais. Por isso, apesar do biofertilizante se tratar de uma alternativa sustentável que possui efeito não apenas em um ponto da cadeia produtiva, mas sim em mais atores, ainda devem ser levado em conta que há benefícios econômicos, porém, também há fatores que podem inviabilizar a sua aplicabilidade, como é o caso dos investimentos estruturais, custos de logísticas, transporte e armazenamento, principalmente quando as áreas agrícolas ficam longe do processo produtivo,

ficando evidente são necessárias políticas e subsídios que fomentem a adesão a essa tecnologia.

Por outro lado, na dimensão social são encontrados benefícios como a criação de modelos de negócios sustentáveis e, como consequência, a geração de empregos. Esses modelos de negócios são importantes para o setor, visto que por meio deles as pesquisas tornam-se fundamentais para identificar quem são os atores e partes interessadas nessas inovações e consumos sustentáveis, além de buscar quais são as expectativas desse nicho e quais os produtos devem ser direcionados para atender a esses consumidores, trazendo assim, o foco de como a tecnologia de tratamento por DA pode vir de encontro a suprir essa lacuna de soluções mais ambientais.

Sendo assim, ao analisar sob a perspectiva da EC o processo de tratamento de dejetos da suinocultura por meio da DA para a produção de biofertilizante, é possível perceber que é um método de fechamento de ciclos praticável, pois há uma quantidade expressiva de dejetos gerados anualmente, sendo consequência do aumento da população e do crescimento no consumo de produtos alimentares, como é o caso dos suínos. E com essa expansão, há impactos ambientais, econômicos e sociais que podem ser minimizados quando adotado o conceito de economia circular. No entanto, é uma prática que não apresenta um desenvolvimento relevante devido a falta de políticas que disseminem uma cultura de agropecuária mais sustentável, políticas que tornem mais restritivo ou dificulte o consumo de fertilizantes químicos, ações que promovam essa conscientização e identifiquem práticas as quais podem ser adotadas pelas partes interessadas e, principalmente, do ponto de vista econômico, subsídios financeiros para que essas ações venham de fato a se concretizarem e se desenvolverem no setor.

Por isso, para tornar essa produção de biofertilizante mais acessível, a simbiose industrial traz conceitos de cooperação entre partes interessadas que possuem objetivos em comum. Ao criar um ambiente de simbiose, essas partes interessadas gerenciam seus resíduos como fonte de matéria-prima para outro ator, sendo assim, não é necessário possuir um gerenciamento para descarte adequado, mas sim, disponibilizá-lo para que sirva como matéria-prima para outra cadeia produtiva, maximizando o tempo de vida útil e agregando valor.

Na produção de biofertilizante, assim como na EC, as políticas tem contribuições importantes nesse incentivo a cooperação relacionada a simbiose, pois a partir delas, as iniciativas tornam os processos viáveis devido as regulamentações e subsídios que são oferecidos. Ao criar uma política, como o Programa Nacional de Bioinsumos, criam-se cenários de mudanças para as práticas e consumo com foco para a utilização de recursos biológicos na agropecuária, com o objetivo de reduzir a dependência de insumos importados e também aumentar a oferta de matéria-prima para o setor. Além disso, por se tratar de uma política que incentiva mudanças nos modelos produtivos, as

linhas de créditos se tornam disponíveis para a adoção da tecnologia e geração desses bioinsumos, como é o caso do biofertilizante. Porém, para que essa política venha a se tornar efetiva no atual e futuros cenários, as ações precisam ser mais concretas para que de fato obtenham resultados satisfatórios, conforme abordado nos resultados com foco nas ações que podem ser tomadas visando resultados mais satisfatórios, além de estipular um prazo para que ocorra a redução no uso de fertilizantes minerais e a adoção de práticas mais sustentáveis e circulares.

Dessa forma, a contribuição desse estudo se deu ao identificar o estado atual da agropecuária no que diz respeito aos modelos produtivos e gerenciamento de resíduos e, ao quantificar por meio do modelo de simulação como a suinocultura do estado de Santa Catarina pode contribuir no desenvolvimento sustentável do setor por meio da EC. As simulações apresentam dados relativos a produção de biofertilizante, mostrando o potencial que está sendo desperdiçado como fonte de produto orgânico para substituir e/ou complementar o uso dos fertilizantes minerais. Além do mais, pode-se analisar os dados referentes as emissões do uso de biofertilizante frente a uréia, que quando comparado, deixa evidente a necessidade de mudanças na agricultura para mitigar as emissões de N_2O e dar um destino de maior valor agregado para os dejetos.

Também foram construídos os diagramas de relações causais para identificar quais fatores possuem impacto positivos ou negativos dentro do sistema. Esses diagramas permitiram apresentar de maneira mais visual e qualitativa o processo e o que pode favorecer o desenvolvimento de produção de biofertilizante, trazendo a percepção de toda a cadeia envolvida.

O modelo de dinâmica de sistemas pode ser replicado para outros setores (bovinos, aves, etc.), podendo também trazer contribuições mais amplas tanto a nível de setores, como de dimensão ao adequar os dados para uma abrangência maior, como para o Brasil. Os cenários e diagramas causais também podem identificar lacunas e auxiliar na criação de políticas, regulamentos, subsídios e demais ações nas quais podem favorecer essa tecnologia de DA e uso de biofertilizante, além de incentivar a circularidade.

Por fim, ao analisar essas projeções relacionando ao conceito da EC e simbiose industrial, possibilitou ter uma perspectiva dos benefícios nas dimensões da sustentabilidade, não apenas na dimensão ambiental, bem como algumas barreiras, principalmente econômicas, para essa produção. Também proporcionou uma visão mais ampla a respeito da cadeia de atores envolvidos, além de como a cooperação para um propósito pode atingir melhores resultados e de fato trazer vantagens para todos os envolvidos e a sociedade.

7.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Essa pesquisa foi delimitada apenas aos dados essenciais para a construção do modelo, porém, pode-se criar um modelo que também identifique a viabilidade das plantas de tratamento por DA com inserção de variáveis econômicas relacionadas aos custos de investimentos, custos de logística, preço do tratamento de dejetos, custos de fertilizantes minerais, além de dados técnicos de proporcionalidade de nutrientes para a substituição dos fertilizantes minerais, para poder analisar de forma mais ampla a viabilidade e benefícios desse fechamento de ciclo.

Outro ponto é referente aos dados considerados para estimar o potencial de produção de biofertilizante. A conversão de 5% foi considerado para o biofertilizante com relação a matéria seca, ou seja, após processos que retiram toda a água do digestato. Esse valor foi atribuído devido a falta de informações que considerem a produção de digestato líquido no processo de digestão anaeróbica, o que possivelmente apresentaria um potencial maior, reforçando os benefícios.

No que se refere às sugestões para pesquisas futuras, além da inserção de mais variáveis para tornar o setor de estudo mais profundo, também sugere-se adentrar em aspectos técnicos referentes aos nutrientes contidos no biofertilizante como nitrogênio, fósforo e potássio, frente aos valores contidos em demais fertilizantes nitrogenados, para que seja identificado quanto de biofertilizante deve ser utilizado de forma proporcional para suprir a mesma quantidade de nutrientes dos fertilizantes minerais, obtendo valores mais reais da capacidade de atender a demanda.

REFERÊNCIAS

- ACHINAS, Spyridon; ACHINAS, Vasileios; EUVERINK, Gerrit Jan Willem. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**, Elsevier BV, v. 3, n. 3, p. 299–307, jun. 2017. DOI: 10.1016/j.eng.2017.03.002.
- AL SEADI, T. **Good Practice in Quality Management of AD residues from biogas production: Task 24 og AEA Technology Environment**. [S.l.]: IEA Bioenergy, 2001.
- ALBURQUERQUE, José Antonio; FUENTE, Carlos de la; FERRER-COSTA, Alicia; CARRASCO, Lucia; CEGARRA, Juan; ABAD, Manuel; BERNAL, María Pilar. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier BV, v. 40, p. 181–189, mai. 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.02.018.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. [S.l.: s.n.], 2012. ESA Working paper No. 12-03.
- ANTONIOU, N.; MONLAU, F.; SAMBUSITI, C.; FIGARA, E.; BARAKAT, A.; ZABANIOTOU, A. 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**, Elsevier BV, v. 209, p. 505–514, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.055.
- AQUALIMPIA ENGINEERING E.K. **SLAUGHTERHOUSE WASTE - BIOGAS - DIGESTER**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.en-aqualimpia.com/biogasplant/slaughterhouse/>.
- ARRUDA, Mariliz H; AMARAL, Lucio de P; PIRES, Odair PJ; BARUFI, Charles RV. Dimensionamento de biodigestor para geração de energia alternativa. **Revista científica eletrônica de agronomia**, v. 1, n. 2, p. 1–8, 2002.
- BABSON, David M.; BELLMAN, Karen; PRAKASH, Shaurya; FENNELL, Donna E. Anaerobic digestion for methane generation and ammonia reforming for hydrogen production: A thermodynamic energy balance of a model system to demonstrate net energy feasibility. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier BV, v. 56, p. 493–505, set. 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.05.024.

- BACIOCCHI, Renato; CARNEVALE, Ennio; CORTI, Andrea; COSTA, Giulia; LOMBARDI, Lidia; OLIVIERI, Tommaso; ZANCHI, Laura; ZINGARETTI, Daniela. Innovative process for biogas upgrading with CO₂ storage: Results from pilot plant operation. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier BV, v. 53, p. 128–137, jun. 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.11.016.
- BALANAY, Raquel; HALOG, Anthony. Tools for circular economy. *In*: CIRCULAR Economy in Textiles and Apparel. [S.l.]: Elsevier, 2019. P. 49–75. DOI: 10.1016/b978-0-08-102630-4.00003-0.
- BARTELMUS, Peter. Dematerialization and capital maintenance: two sides of the sustainability coin. **Ecological Economics**, Elsevier BV, v. 46, n. 1, p. 61–81, ago. 2003. DOI: 10.1016/s0921-8009(03)00078-8.
- BLEY JUNIOR, Cícero. **Biogás: A energia invisível**. 2. ed. rev. ampl. [S.l.]: Foz do Iguaçu: Itaipu, 2015.
- BOCKEN, Nancy M. P.; PAUW, Ingrid de; BAKKER, Conny; GRINTEN, Bram van der. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, Informa UK Limited, v. 33, n. 5, p. 308–320, abr. 2016. DOI: 10.1080/21681015.2016.1172124.
- BOONS, Frank; SPEKKINK, Wouter; MOUZAKITIS, Yannis. The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 19, n. 9-10, p. 905–911, jun. 2011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.01.003.
- BÖRJESSON, Pål; BERGLUND, Maria. Environmental systems analysis of biogas systems—Part I: Fuel-cycle emissions. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier BV, v. 30, n. 5, p. 469–485, mai. 2006. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.11.014.
- BURTON, Colin H; TURNER, Claire. **Manure management: Treatment strategies for sustainable agriculture**. [S.l.]: Editions Quae, 2003.
- CARDOSO, B. F.; OYAMADA, G. C.; SILVA, C. M. da. Produção, Tratamento e Usodos Dejetos Suínos no Brasil. **DESENVOLVIMENTO EM QUESTÃO**, v. 13, n. 32, p. 1, 2015.

CAUCHICK MIGUEL, P. A. *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. [S.l.]: Elsevier: ABEPRO, 2012.

CHEN, Jiao; LÜ, Shaoyu; ZHANG, Zhe; ZHAO, Xuxia; LI, Xinming; NING, Piao; LIU, Mingzhu. Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. **Science of The Total Environment**, Elsevier BV, v. 613-614, p. 829–839, fev. 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.186.

CHERNICHARO, A. C. L.; VAN HAANDEL, A.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - 2001. *In*: edição: PROSAB. [S.l.]: PROSAB/FINEP, 2001. cap. 1, p. 12.

CHERTOW, M. R. "Uncovering"Industrial Symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley, v. 0, n. 0, p. 070301071346001, mar. 2007. DOI: 10.1162/jieec.0.1110.

CHERTOW, M. R. INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy. **Annual Review of Energy and the Environment**, Annual Reviews, v. 25, n. 1, p. 313–337, nov. 2000. DOI: 10.1146/annurev.energy.25.1.313.

CHOJNACKA, Katarzyna; MOUSTAKAS, Konstantinos; WITEK-KROWIAK, Anna. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. **Bioresource Technology**, Elsevier BV, v. 295, p. 122223, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122223.

CIRAIG. **CIRCULAR ECONOMY: A CRITICAL LITERATURE REVIEW OF CONCEPTS**. [S.l.], 2015.

COMISSÃO EUROPÉIA. **Pacote da Economia Circular. ANEXOS da Proposta de Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece regras relativas à disponibilização no mercado de produtos fertilizantes com a marcação CE e que altera os Regulamentos (CE) n. 1069/2009 e (CE) n. 1107/2009**. [S.l.: s.n.], mar. 2016. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d117e80d-ec28-11e5-8a81-01aa75ed71a1.0005.02/DOC_2&format=PDF.

COMPANHIA INTEGRATIVA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SANTA CATARINA - CIDASC. **Santa Catarina amplia em 35% as exportações de carne suína em 2020**. [S.l.: s.n.], jan. 2021. Disponível em:

<http://www.cidasc.sc.gov.br/blog/2021/01/12/santa-catarina-amplia-em-35-as-exportacoes-de-carne-suina-em-2020/>.

CORNEJO, C.; WILKIE, A. C. Greenhouse gas emissions and biogas potential from livestock in Ecuador. **Energy for Sustainable Development**, Elsevier BV, v. 14, n. 4, p. 256–266, dez. 2010. DOI: 10.1016/j.esd.2010.09.008.

CORRÉ, W. J.; CONIJN, J. G. **Biogas production and digestate utilisation from agricultural residues: deliverable nº: 6.2.1.** [S.l.]: HYSOL project, 2016.

CRUZ, A. C.; PEREIRA, F. S.; FIGUEIREDO, V. S. FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS DE RESÍDUOS DO AGRONEGÓCIO: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ECONÔMICO BRASILEIRO. **BNDES Setorial**, 2017.

CUCCHIELLA, Federica; D'ADAMO, Idiano. Technical and economic analysis of biomethane: A focus on the role of subsidies. **Energy Conversion and Management**, Elsevier BV, v. 119, p. 338–351, jul. 2016. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.04.058.

CZEKAŁA, Wojciech; LEWICKI, Andrzej; POCHWATKA, Patrycja; CZEKAŁA, Agnieszka; WOJCIESZAK, Dawid; JÓŹWIAKOWSKI, Krzysztof; WALISZEWSKA, Hanna. Digestate management in polish farms as an element of the nutrient cycle. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 242, p. 118454, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118454.

DAHLIN, Johannes; HERBES, Carsten; NELLES, Michael. Biogas digestate marketing: Qualitative insights into the supply side. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 104, p. 152–161, nov. 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.08.013.

DIANATI, K. *et al.* A system dynamics-based scenario analysis of residential solid waste management in Kisumu, Kenya. **Science of The Total Environment**, Elsevier BV, v. 777, p. 146200, jul. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146200.

DOMENECH, Teresa; BLEISCHWITZ, Raimund; DORANOVA, Asel; PANAYOTOPOULOS, Dimitris; ROMAN, Laura. Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 141, p. 76–98, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.016.

DONIA, Enrica; MINEO, Angelo Marcello; SGROI, Filippo. A methodological approach for assessing business investments in renewable resources from a circular economy perspective. **Land Use Policy**, Elsevier BV, v. 76, p. 823–827, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.03.017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo a economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-%C3%A0-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf.

FAGERSTRÖM, Teodorita Al Seadi; Saija Rasi; Tormod Briseid; Anton. **THE ROLE OF ANAEROBIC DIGESTION AND BIOGAS IN THE CIRCULAR ECONOMY**. Edição: IEA Bioenergy Task 37. [S.l.]: IEA Bioenergy Task 37, 2018. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/08/anaerobic-digestion_web_END.pdf.

FERREIRA, L. M. S. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros com e sem separação da fração sólida**. 2013. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista.

FIESP. **Outlook Fiesp 2028: projeções para o agronegócio brasileiro**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <http://hotsite.fiesp.com.br/outlookbrasil/2028/files/assets/common/downloads/publication.pdf>.

FOGLER, H. Scott. **Cálculo de Reatores: o essencial da engenharia das reações químicas**. 1. ed. [S.l.]: LCT, 2014.

FORD, A. **Modeling the Environment, Second Edition**. [S.l.]: Island Press, 31 dez. 2009. Chapter 13. ISBN 1597264733. Disponível em: https://www.ebook.de/de/product/8760227/andrew_ford_modeling_the_environment_second_edition.html.

FRATTINI, D.; CINTI, G.; BIDINI, G.; DESIDERI, U.; CIOFFI, R.; JANNELLI, E. A system approach in energy evaluation of different renewable energies sources integration in ammonia production plants. **Renewable Energy**, Elsevier BV, v. 99, p. 472–482, dez. 2016. DOI: 10.1016/j.renene.2016.07.040.

GEELS, F. W. Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective. **Research Policy**, Elsevier BV, v. 39, n. 4, p. 495–510, mai. 2010. DOI: 10.1016/j.respol.2010.01.022.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. [S.l.]: Editora da UFRGS, 2009.

GIACOMO, Mauceri Francesco; Gentile Clelia; Zagarella Martina; Cipolla Gaetano; Di Francisa. BIOGAS PRODUCTION BY MEANS OF LIVESTOCK COMPOST. *In*: PROCEDIA Environmental Science, Engineering and Management. [S.l.: s.n.], 2017. v. 4, p. 127–133. Disponível em:

http://www.procedia-esem.eu/pdf/issues/2017/no2/18_Mauceri_17.pdf.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Edição: Atlas. [S.l.]: Atlas, 2007, 2007. v. 201.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. Edição: 1999 Atlas. [S.l.]: Atlas, 1999, 1999. v. 4.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. [S.l.]: 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GLOBALFERT. **Preço Matéria-Prima**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em:

<https://www.globalfert.com.br/preco-mp/>.

GOLEV, Artem; CORDER, Glen D.; GIURCO, Damien P. Barriers to Industrial Symbiosis: Insights from the Use of a Maturity Grid. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley, v. 19, n. 1, p. 141–153, jul. 2014. DOI: 10.1111/jiec.12159.

GOMEZ, Claudius Da Costa. Biogas as an energy option: an overview. *In*: THE Biogas Handbook. [S.l.]: Elsevier, 2013. P. 1–16. DOI: 10.1533/9780857097415.1.

GONTARD, Nathalie *et al.* A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Informa UK Limited, v. 48, n. 6, p. 614–654, mar. 2018. DOI: 10.1080/10643389.2018.1471957.

HADIN, Åsa; HILLMAN, Karl; ERIKSSON, Ola. Prospects for Increased Energy Recovery from Horse Manure—A Case Study of Management Practices, Environmental Impact and Costs. **Energies**, MDPI AG, v. 10, n. 12, p. 1935, nov. 2017. DOI: 10.3390/en10121935.

HAMILTON, Douglas W. Anaerobic digestion of animal manures: Types of digesters. <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsw eb/Get/Document-7056/BAE-1750web2014.pdf>. Accessed September, v. 29, p. 2015, 2014.

HANIF, Asma. **Evaluation of a trickle flow leach bed reactor for anaerobic digestion of high solids cattle manure**. Mai. 2013. Tese (Doutorado).

HEALEY, Patsy; MAGALHAES, Claudio de; MADANIPOUR, Ali; PENDLEBURY, John. Place, identity and local politics: analysing initiatives in deliberative governance. *In: DELIBERATIVE Policy Analysis*. [S.l.]: Cambridge University Press, mai. 2003. P. 60–87. DOI: 10.1017/cbo9780511490934.004.

HJORTH, M.; CHRISTENSEN, K. V.; CHRISTENSEN, M. L.; SOMMER, S. G. Solid—liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Springer Science e Business Media LLC, v. 30, n. 1, p. 153–180, mar. 2010. DOI: 10.1051/agro/2009010.

HOLM-NIELSEN, J.B.; SEADI, T. Al; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, Elsevier BV, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, nov. 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.12.046.

HOMRICH, Aline Sacchi; GALVÃO, Graziela; ABADIA, Lorena Gamboa; CARVALHO, Marly M. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 175, p. 525–543, fev. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.064.

HUTNAN, M; MRAFKOVA, L; DRTIL, M; DERCO, J. Methanogenic and nonmethanogenic activity of granulated sludge in anaerobic baffled reactor. **CHEMICAL PAPERS-SLOVAK ACADEMY OF SCIENCES**, SLOVAK ACADEMIC PRESS LTD, v. 53, n. 6, p. 374–378, 2000.

IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=destaques>.

IBGE. **Pesquisa de Pecuária Municipal - PMM**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura->

epecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?edicao=25474&t=destaques.

INGRAO, Carlo; FACCILONGO, Nicola; GIOIA, Leonardo Di; MESSINEO, Antonio. Food waste recovery into energy in a circular economy perspective: A comprehensive review of aspects related to plant operation and environmental assessment. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 184, p. 869–892, mai. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.267.

INSAM, Heribert; GÓMEZ-BRANDÓN, María; ASCHER, Judith. Manure-based biogas fermentation residues – Friend or foe of soil fertility? **Soil Biology and Biochemistry**, Elsevier BV, v. 84, p. 1–14, mai. 2015. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.02.006.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION – IFASTAT. **Consumption**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [S.l.], 2006. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_0_Cover.pdf.

IPCC. **Annex I: Glossary**. [S.l.: s.n.], 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

ISIE. **Report of 12th ISRS in Lausanne, 2015**. [S.l.: s.n.], jul. 2015. Disponível em: <https://is4ie.org/resources/documents/15>.

JENSEN, Paul D.; BASSON, Lauren; HELLAWELL, Emma E.; BAILEY, Malcolm R.; LEACH, Matthew. Quantifying ‘geographic proximity’: Experiences from the United Kingdom’s National Industrial Symbiosis Programme. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 55, n. 7, p. 703–712, mai. 2011. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.02.003.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ESTERCO BOVINO: UM ESTUDO DE CASO NA FAZENDA ATERRADO**. 2014. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

KARELLAS, Sotirios; BOUKIS, Ioannis; KONTOPOULOS, Georgios. Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 14, n. 4, p. 1273–1282, mai. 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.12.002.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPÄLÄ, Jyri. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, Elsevier BV, v. 143, p. 37–46, jan. 2018. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.

KOUGIAS, Panagiotis G.; ANGELIDAKI, Irini. Biogas and its opportunities—A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, Springer Science e Business Media LLC, v. 12, n. 3, abr. 2018. DOI: 10.1007/s11783-018-1037-8.

KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil. **Caderno de Ciência e Tecnologia**, v. 22, n. 3, p. 652–665, 2005.

KUNZ, A.; MIELE, M.; STEINMETZ, R.L.R. Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil. **Bioresource Technology**, Elsevier BV, v. 100, n. 22, p. 5485–5489, nov. 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.10.039.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. de. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, 2006.

KUNZ, A.; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. **Embrapa Suínos e Aves-Livro científico (ALICE)**, Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019., 2019.

KWASNICKI, Witold. Logistic growth of the global economy and competitiveness of nations. **Technological Forecasting and Social Change**, Elsevier BV, v. 80, n. 1, p. 50–76, jan. 2013. DOI: 10.1016/j.techfore.2012.07.007.

LASTELLA, G.; TESTA, C.; CORNACCHIA, G.; NOTORNICOLA, M.; VOLTASIO, F.; SHARMA, Vinod Kumar. Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification. **Energy Conversion and Management**, Elsevier BV, v. 43, n. 1, p. 63–75, jan. 2002. DOI: 10.1016/s0196-8904(01)00011-5.

LIMA, Heleno; MARTINS, Gilberto. Anaerobic digestion (AD) of municipal solid waste in Santo André - SP: Review. *In*:

LIMA; MIRANDA. Análise da viabilidade econômico financeira do aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica. **Custos e Agronegócio**, v. 10, p. 83–99, dez. 2014.

LINDFORS, Axel; GUSTAFSSON, Marcus; ANDERBERG, Stefan; EKLUND, Mats; MIRATA, Murat. Developing biogas systems in Norrköping, Sweden: An industrial symbiosis intervention. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 277, p. 122822, dez. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122822.

LINQUIST, B. A.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C. M.; KESSEL, C. Van; GROENIGEN, K. J. Van. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. **Field Crops Research**, Elsevier BV, v. 135, p. 10–21, ago. 2012. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.06.007.

LOFHAGEN, J. C. P.; BOOLLMANN, H. A.; SCOTT, C. Collective agroenergy generation in family agriculture: the Ajuricaba Condominium case study in Brazil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 14, n. 34, p. 35–61, 2018. ISSN 1984-3526.

LOMBARDI, D. Rachel; LAYBOURN, Peter. Redefining Industrial Symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley, v. 16, n. 1, p. 28–37, fev. 2012. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00444.x.

LYBÆK, R.; KJÆR, T. Enhancing identified Circular Economic benefits related to the deployment of the Solrød biogas plant. English. **Engineering and Applied Science Research (EASR)**, v. 2, n. 44, p. 97–105, abr. 2017. ISSN 2539-6161. DOI: 10.14456/easr.2017.14.

LYYTIMÄKI, Jari; NYGRÉN, Nina A.; PULKKA, Anna; RANTALA, Salla. Energy transition looming behind the headlines? Newspaper coverage of biogas production in Finland. **Energy, Sustainability and Society**, Springer Science e Business Media LLC, v. 8, n. 1, jun. 2018. DOI: 10.1186/s13705-018-0158-z.

MAGRI, A.; GIOVANNINI, F.; CONNAN, R.; BRIDOUX, G.; BÉLINE, F. Nutrient management from biogas digester effluents: a bibliometric-based analysis of publications and patents. **International Journal of Environmental Science and**

Technology, Springer Science e Business Media LLC, v. 14, n. 8, p. 1739–1756, mar. 2017. DOI: 10.1007/s13762-017-1293-3.

MAPA. **Bioinsumos**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/material-para-imprensa/pt/release-04-programanacionalbioinsumos_divulgacao.

MARTIN, Michael; EKLUND, Mats. Improving the environmental performance of biofuels with industrial symbiosis. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier BV, v. 35, n. 5, p. 1747–1755, mai. 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.016.

MARTIN, Michael; POULIKIDOU, Sofia; MOLIN, Elvira. Exploring the Environmental Performance of Urban Symbiosis for Vertical Hydroponic Farming. **Sustainability**, MDPI AG, v. 11, n. 23, p. 6724, nov. 2019. DOI: 10.3390/su11236724.

MATA-ALVAREZ, J. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. **Water Intelligence Online**, IWA Publishing, v. 4, n. 0, p. 9781780402994–9781780402994, dez. 2015. DOI: 10.2166/9781780402994.

MATHIAS, J. Manure as a Resource: Livestock Waste Management from Anaerobic Digestion, Opportunities and Challenges for Brazil. **International Food and Agribusiness Management Association**, v. 17, p. 87–109, jan. 2014.

MILANEZ, Artur Yabe; GUIMARÃES, Diego Duque;
SILVA MAIA, Guilherme Batista da; SOUZA, Jose Antonio Pereira de;
LEMO, Mario Luiz Freitas. BIOGÁS DE RESÍDUOSAGROINDUSTRIAIS:
PANORAMA E PERSPECTIVAS. **BNDES Setorial**, v. 47, p. 221–276, 2018.

MORECROFT, J. D.W. (Ed.). **Strategic Modelling and Business Dynamics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., jun. 2015. DOI: 10.1002/9781119176831.

NEVZOROVA, T.; KUTCHEROV, V. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. **Energy Strategy Reviews**, Elsevier BV, v. 26, p. 100414, nov. 2019. DOI: 10.1016/j.esr.2019.100414.

NIZAMI, A.S. *et al.* Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. **Bioresource Technology**, Elsevier BV, v. 241, p. 1101–1117, out. 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.097.

NKOA, Roger. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Springer Science e Business Media LLC, v. 34, n. 2, p. 473–492, dez. 2013. DOI: 10.1007/s13593-013-0196-z.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Biodigestão : a alternativa energética**. [S.l.]: Nobel, 1986.

OLIVEIRA, L. G. S. De; NEGRO, S. O. Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 107, p. 462–481, jun. 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.02.030.

OLIVER, A. P. M.; SOUZA NETO, A. A.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. **Manual de treinamento em biodigestão**. [S.l.]: Instituto Winrock – Brasil, 2008.

OWAMAH, H.I.; DAHUNSI, S.O.; ORANUSI, U.S.; ALFA, M.I. Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. **Waste Management**, Elsevier BV, v. 34, n. 4, p. 747–752, abr. 2014. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.01.017.

OWS. **DRANCO-FARM**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: https://www.ows.be/organic_feedstock/dranco-farm/.

PIERIE, Frank; DSOUZA, Austin; SOMEREN, Christian van; BENDERS, René; GEMERT, Wim van; MOLL, Henri. Improving the Sustainability of Farming Practices through the Use of a Symbiotic Approach for Anaerobic Digestion and Digestate Processing. **Resources**, MDPI AG, v. 6, n. 4, p. 50, set. 2017. DOI: 10.3390/resources6040050.

POESCHL, Martina; WARD, Shane; OWENDE, Philip. Environmental impacts of biogas deployment – Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 24, p. 184–201, mar. 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.10.030.

PORRITT, J. **The Five Capitals Model – a framework for sustainability**. [S.l.: s.n.], 2011. Forum for the future. Disponível em: <https://www.forumforthefuture.org/the-five-capitals>.

PORTAL DO BIOGÁS. **Princípio de funcionamento de um biodigestor anaeróbio.** [S.l.: s.n.], dez. 2017. Disponível em: <https://www.portaldobiogas.com/principio-de-funcionamento-de-um-biodigestor-anaerobio/>.

POSCH, A. Industrial Recycling Networks as Starting Points for Broader Sustainability-Oriented Cooperation? **Journal of Industrial Ecology**, Wiley, v. 14, n. 2, p. 242–257, mar. 2010. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2010.00231.x.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil. Substratos, digestores e uso do biogás.** [S.l.: s.n.], 2015. Ministério das Cidades.

PTI. **CIBiogás lança novos cursos sobre energias renováveis.** 2018. Disponível em: <https://www.pti.org.br/pt-br/content/cibiog%C3%A1s-lan%C3%A7a-novos-cursos-sobre-energiasrenov%C3%A1veis>.

RAVEN, Rob P. J.M.; JOLIVET, Eric; MOURIK, Ruth M.; FEENSTRA, Ynke C.F.J. ESTEEM: Managing societal acceptance in new energy projects. **Technological Forecasting and Social Change**, Elsevier BV, v. 76, n. 7, p. 963–977, set. 2009. DOI: 10.1016/j.techfore.2009.02.005.

RESENDE, J. A. de; DINIZ, C. G.; SILVA, V. L. da; CARNEIRO, J. C.; RIBEIRO, M. T.; LIMA, J. C. F.; OTENIO, M. H. Dejetos bovinos para produção de biogás e biofertilizante por digestão anaeróbica, 2015.

RISBERG, Kajsa; CEDERLUND, Harald; PELL, Mikael; ARTHURSON, Veronica; SCHNÜRER, Anna. Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure – Chemical composition and effects on soil microbial activity. **Waste Management**, Elsevier BV, v. 61, p. 529–538, mar. 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.12.016.

ROUBIK, Hynek; MAZANCOVÁ, Jana; RYDVAL, Jan; KVASNIČKA, Roman. Uncovering the dynamic complexity of the development of small-scale biogas technology through causal loops. **Renewable Energy**, Elsevier BV, v. 149, p. 235–243, abr. 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.019.

SAAVEDRA, Yovana M.B.; IRITANI, Diego R.; PAVAN, Ana L.R.; OMETTO, Aldo R. Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 170, p. 1514–1522, jan. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.260.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; VIEIRA, Nathalia Duarte Braz; NÓBREGA, Luis Guilherme Bruni de; BARROS, Regina Mambeli; FILHO, Geraldo Lúcio Tiago. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 131, p. 54–63, abr. 2018. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.012.

SAUVÉ, Sébastien; BERNARD, Sophie; SLOAN, Pamela. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. **Environmental Development**, Elsevier BV, v. 17, p. 48–56, jan. 2016. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.09.002.

SCHERER, E. E. Nutrientes no esterco de suínos: diagnose e uso na adubação. **Agropecuária Catarinense**, v. 10, p. 48–50, 1997.

SEEG. **Estimativa de Emissões e Remoção de Gases de Efeito Estufa no Brasil em 2019**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em:

<https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Infograficos/PORT/SEEG-infografico-agropecuaria-BR-2019-aprovado.jpg>.

SILVA, J. R. da; JUNIOR, O.H. Ando; SPACEK, A.D.; MOTA, J.M.; Malfatti, C.F.; FURTADO, A. C. Scaling a Biodigester Ascendant Flow for Biogas Production via Sewer and Solid Waste. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, AEDERMACP (European Association for the Development of Renewable Energies e Power Quality), p. 517–520, mai. 2016. DOI: 10.24084/repqj14.378.

SILVEIRA, N. V. B.; PIATTO, M.; COSTA, C.; DE MEDEIROS, M.; PINTO, L. F. G. **SEEG - Relatório Analítico Agropecuária - 2018**. [S.l.], 2018.

SOKKA, Laura; PAKARINEN, Suvi; MELANEN, Matti. Industrial symbiosis contributing to more sustainable energy use – an example from the forest industry in Kymenlaakso, Finland. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 19, n. 4, p. 285–293, mar. 2011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.08.014.

STERMAN, John. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. [S.l.]: MCGRAW HILL BOOK CO, 1 jan. 2000. ISBN 0072311355. Disponível em: https://www.ebook.de/de/product/36670534/john_sterman_business_dynamics_systems_thinking_and_modeling_for_a_complex_world.html.

STUCHI, J. F. **Biofertilizante: um adubo líquido de qualidade que você pode fazer**. [S.l.: s.n.], 2015. Editora Técnica.

TAKEMURA, Kenji; ENDO, Ryosuke; SHIBUYA, Toshio; KITAYA, Yoshiaki. Application of Biogas Digestate as a Nutrient Solution for the Hydroponic Culture of *Chrysanthemum morifolium* Ramat with Rockwool Substrate. **Waste and Biomass Valorization**, Springer Science e Business Media LLC, v. 11, n. 6, p. 2645–2650, jan. 2019. DOI: 10.1007/s12649-018-00576-8.

TAMPIO, Elina; LEHTONEN, Eeva; KINNUNEN, Viljami; MÖNKÄRE, Tiina; ERVASTI, Satu; KETTUNEN, Riitta; RASI, Saija; RINTALA, Jukka. A demand-based nutrient utilization approach to urban biogas plant investment based on regional crop fertilization. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 164, p. 19–29, out. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.172.

TIMM, P. J.; GOMES, J. C. C.; MORSELLI, T. B. Insumos para agroecologia: Pesquisa emvermicompostagem e produção de biofertilizantes líquidos. **Revista Ciência & Ambiente**, 2004.

TSACHIDOU, B.; DAIGNEUX, B.; HISSLER, C.; GEORGE, I.; DELFOSSE, P. BIOGAS RESIDUES IN SUBSTITUTION FOR CHEMICAL FERTILIZERS: CONVERTING ORGANIC WASTE INTO RESOURCE. 27th European Biomass Conference and Exhibition. [S.l.], 2019a.

TSACHIDOU, B.; SCHEUREN, M.; GENNEN, J.; DEBBAUT, V.; TOUSSAINT, B.; HISSLER, C.; GEORGE, I.; DELFOSSE, P. Biogas residues in substitution for chemical fertilizers: A comparative study on a grassland in the Walloon Region. **Science of The Total Environment**, Elsevier BV, v. 666, p. 212–225, mai. 2019b. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.238.

TUR-CARDONA, Juan; BONNICHSEN, Ole; SPEELMAN, Stijn; VERSPECHT, Ann; CARPENTIER, Louise; DEBRUYNE, Lies; MARCHAND, Fleur; JACOBSEN, Brian H.; BUYSSE, Jeroen. Farmers' reasons to accept bio-based fertilizers: A choice experiment in seven different European countries. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 197, p. 406–416, out. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.172.

TURNER; MENENDEZ, H.; GATES, R.; TEDESCHI, L.; ATZORI, A. System Dynamics Modeling for Agricultural and Natural Resource Management Issues: Review of Some

Past Cases and Forecasting Future Roles. **Resources**, v. 5, n. 4, p. 40, 2016. DOI: 10.3390/resources5040040.

UNEP. **Emissions Gap Report 2019**. United Nations Environment Programme. 2019.

VANEECKHAUTE, Céline; STYLES, David; PRADE, Thomas; ADAMS, Paul; THELIN, Gunnar; RODHE, Lena; GUNNARSSON, Inga; D'HERTEFELDT, Tina. Closing nutrient loops through decentralized anaerobic digestion of organic residues in agricultural regions: A multi-dimensional sustainability assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 136, p. 110–117, set. 2018. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.03.027.

VAZ, C. R.; MALDONADO, M. Uriona. Revisão de literatura estruturada: proposta do modelo SYSMAP (Scientometric and sYStematic yielding MApping Process). *In*: edição: C. R. Vaz; M. Uriona Maldonado. [S.l.]: Aplicações de Bibliometria e Análise de Conteúdo em casos da Engenharia de Produção, 2017. cap. 2, p. 21–42.

VENTURINI, Lauren Dal Bem. O modelo triple Bottom Line e a sustentabilidade na Administração Pública: pequenas práticas que fazem a diferença. Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

VERSIANI, Betina Maciel. **DESEMPENHO DE UM REATOR UASB SUBMETIDO A DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS DO CAMPUS DA UFRJ**. 2005. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

VIEIRA, Rosana Faria. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. [S.l.: s.n.], 2017. Embrapa.

WANG, Qiaozhi; DEUTZ, Pauline; CHEN, Yong. Building institutional capacity for industrial symbiosis development: A case study of an industrial symbiosis coordination network in China. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 142, p. 1571–1582, jan. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.146.

WANG, Yan; ZHU, Yuchun; ZHANG, Shuoxin; WANG, Yongqiang. What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers? **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 199, p. 882–890, out. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.222.

- WARD, Alastair J.; HOBBS, Phil J.; HOLLIMAN, Peter J.; JONES, David L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, Elsevier BV, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, nov. 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.02.044.
- WRI BRASIL. **Metodologia do GHG Protocol da agricultura**. [S.l.: s.n.], 2015.
- YAN, Yilong; ZHANG, Liqui; FENG, Li; SUN, Dezhi; DANG, Yan. Comparison of varying operating parameters on heavy metals ecological risk during anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover. **Bioresource Technology**, Elsevier BV, v. 247, p. 660–668, jan. 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.146.
- YAZAN, Devrim Murat; CAFAGNA, Davide; FRACCASCIA, Luca; MES, Martijn; PONTRANDOLFO, Pierpaolo; ZIJM, Henk. Economic sustainability of biogas production from animal manure: a regional circular economy model. **Management Research Review**, Emerald, v. 41, n. 5, p. 605–624, mai. 2018. DOI: 10.1108/mrr-02-2018-0053.

APÊNDICE A – EQUAÇÕES RETIRADAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO CONSTRUÍDO NO SOFTWARE STELLA

Pig Sector - SC

Adjustment gap = [(Goal value for treated waste) - (Treated waste)] / Adjustment time
UNITS: m^3/Years

Adjustment time = 1 + STEP(9;2010) + STEP(0;2020)

UNITS: Years

Amplitude = Initial amplitude + RAMP(Slope; 2001) - RAMP(Slope * 2; 2010)

UNITS: Dimensionless

Biofertilizer potential pig = (Treated waste * Conversion rate) * 0,5

UNITS: m^3/Years

Conversion rate = 0,05

UNITS: Dimensionless

Density pig waste = 1032,15

UNITS: Kilograms/ m^3

Goal value for treated waste = 25000 + STEP(71000; 2010) + STEP(192000;2020)

UNITS: m^3

Initial amplitude = -,125

UNITS: Dimensionless

Max pig head = $7,9e^{+06}$

UNITS: Head

Methane per m^3 pig = Density pig waste * Units methane pig

UNITS: ($m^3 CH_4$)/(m^3 Kilograms waste)

Methane potential pig per year = (0,85 * Pig biodigester volume * Methane per m^3 pig) * 0,5

UNITS: ($m^3 CH_4$)/Year

Phase = 11,7 UNITS: Dimensionless

Pig biodigester volume = Pig heads * (Pig waste per m^3/year + Pig process water)

UNITS: m^3/Years

Pig death rate = 0,01

UNITS: 1/Year

Pig growth rate = 0,045

UNITS: 1/Year

Pig head market sat = GRAPH(Pig head trend / Max pig head) (0,5000, 1,735), (0,5500, 1,678), (0,6000, 1,574), (0,6500, 1,475), (0,7000, 1,351), (0,7500, 1,153), (0,8000, 0,894), (0,8500, 0,623), (0,9000, 0,370), (0,9500, 0,190), (1,0000, 0,000)

UNITS: Dimensionless

Pig head seasonality = SINWAVE(Amplitude;Phase)

UNITS: Dimensionless

Pig head trend(t) = Pig head trend (t - dt) + (Pig flow - Pig death) * dt NON-NEGATIVE

INIT Pig head trend = $5,4e^{+06}$

UNITS: Head

INFLOWS:

Pig flow = Pig growth rate * Pig head trend * Pig head market sat UNIFLOW

UNITS: Head/Years

OUTFLOWS:

Pig death = Pig head trend * Pig death rate UNIFLOW

UNITS: Head/Years

Pig heads = Pig head trend * (1 + Pig head seasonality) * Input

UNITS: Head

Pig process water = Pig waste per m^3 /year

UNITS: m^3 /(Head*Years)

Pig waste per kg/year = $2,25 * 365$

UNITS: Kilograms/Year/Head

Pig waste per m^3 /year = (Pig waste per kg/year) / Density pig waste

UNITS: m^3 /(Head*Years)

Slope = $-,004$

UNITS: Dimensionless

Treated waste(t) = Treated waste(t - dt) + (Treated waste flow) * dt NON-NEGATIVE

INIT Treated waste = 0

UNITS: m^3

INFLOWS:

Treated waste flow = Adjustment gap UNIFLOW

UNITS: m^3 /Years

Units methane pig = $24/1000$

UNITS: ($m^3 CH_4$)/Kilograms

Waste generated(t) = Waste generated (t - dt) + (Waste flow - Treated waste flow) * dt
NON-NEGATIVE

INIT Waste generated = 0

UNITS: m^3

INFLOWS:

Waste flow = Pig heads * [(Pig waste per m^3 /year) + Pig process water] UNIFLOW

UNITS: m^3 /Years

OUTFLOWS:

Treated waste flow = Adjustment gap UNIFLOW

UNITS: m^3 /Years

Historical pig = GRAPH(TIME) (2000,00, 5093888), (2001,00, 5516818), (2002,00,

5354113), (2003,00, 5432143), (2004,00, 5775890), (2005,00, 6309041), (2006,00, 7158596), (2007,00, 7156013), (2008,00, 7846398), (2009,00, 7988663), (2010,00, 7817536), (2011,00, 7968116), (2012,00, 7480183), (2013,00, 6270797), (2014,00, 6178702), (2015,00, 6533948), (2016,00, 7099184), (2017,00, 8098231), (2018,00, 7968232)

UNITS: Head

Nitrous Oxide Emissions - Biofertilizer

Conversion factor = 44/28

UNITS: Dimensionless

Emission factor (E_f) = 0,01

UNITS: Dimensionless

Fraction nitrogen (FRAC) = 0,2

UNITS: Dimensionless

GWP = 298

UNITS: Dimensionless

Nitrous oxide emission (CO_{2eq}) = [(Biofertilizer potential pig) * (Density pig waste) * (Rate application)] * Percentual nitrogen * [1 - (Fraction nitrogen (FRAC))] * Emission factor (E_f) * Conversion factor * GWP

UNITS: Kilograms/Years

Percentual nitrogen = 0,016

UNITS: Dimensionless

Rate application = 1

UNITS: Dimensionless

Nitrous Oxide Emissions - Urea fertilizer

Conversion factor (U) = 44/28

UNITS: Dimensionless

Emission factor(E_f) - U = 0,008

UNITS: Dimensionless

Fraction nitrogen (FRAC) - U = 0,3

UNITS: Dimensionless

Nitrous oxide emission - UF (CO_{2eq}) = [(Biofertilizer potential pig * Density pig waste)] * Percentual nitrogen urea * [1 - (Fraction nitrogen (FRAC) - U)] * Emission factor (E_f)- U * Conversion factor - U * GWP

UNITS: Kilograms/Years

Percentual nitrogen urea = 0,44

UNITS: Dimensionless

Noise

High value = 1,13

Input = STEP(1;Noise Start Time) * Pink Noise

DOCUMENT: Input is a dimensionless variable which provides a variety of test input patterns, including a step, pulse, sine wave, and random noise.

UNITS = Dimensionless

Low value = 0,9

Noise Correlation Time = 2

DOCUMENT: The correlation time constant for Pink Noise.

UNITS = Week

Noise Standard Deviation = 0,15

DOCUMENT: The standard deviation of the pink noise process.

UNITS = Dimensionless

Noise Start Time = 2000

DOCUMENT: Start time for the random input.

UNITS = week

Pink Noise (t) = Pink Noise (t - dt) + (Change in Pink Noise) * dt

INIT Pink Noise = 1

DOCUMENT: Pink Noise is first-order autocorrelated noise. Pink noise provides a realistic noise input to models in which the next random shock depends in part on the previous shocks. The user can specify the correlation time. The mean is 0 and the standard deviation is specified by the user.

UNITS = Dimensionless

INFLOWS:

Change in Pink Noise = (White Noise - Pink Noise) / Noise Correlation Time

DOCUMENT: Change in the pink noise value; Pink noise is a first order exponential smoothing delay of the white noise input.

UNITS = 1/Year

Seed = 990

Time step = 0,25

White Noise = Noise Standard Deviation * [(24 * Noise Correlation Time / time step)^{0,65} * (RANDOM(low value;high value) - 0,5)]

DOCUMENT: White noise input to the pink noise process.

UNITS = Dimensionless

The model has 54 (54) variables (array expansion in parens). In root model and 0 additional modules with 4 sectors. Stocks: 4 (4); Flows: 5 (5); Converters: 45 (45); Constants: 27 (27); Equations: 23 (23); Graphicals: 2 (2).