

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KAREN GODOI VAN MIERLO

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DE INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS
ECONÔMICAS NA CADEIA PRODUTIVA DE PROTEÍNA SUÍNA COM
A INCLUSÃO DE BIODIGESTORES**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2022

KAREN GODOI VAN MIERLO

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DE INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS
ECONÔMICAS NA CADEIA PRODUTIVA DE PROTEÍNA SUÍNA COM
A INCLUSÃO DE BIODIGESTORES**

**ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC VARIABLES INFLUENCE
ASSESSMENT IN THE SWINE PROTEIN PRODUCTION CHAIN WITH
THE INCLUSION OF BIODIGESTERS.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski

PONTA GROSSA

2022



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa



KAREN GODOI VAN MIERLO

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DE INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS ECONÔMICAS NA CADEIA
PRODUTIVA DE PROTEÍNA SUÍNA COM A INCLUSÃO DE BIODIGESTORES**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 31 de Maio de 2022

Dr. Cassiano Moro Piekarski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)

Dr. Antonio Carlos De Francisco, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fabio Neves Puglieri, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jose Augusto De Oliveira, Doutorado - Universidade Estadual Paulista - Unesp

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 31/05/2022.

AGRADECIMENTOS

São tantos agradecimentos, que acredito que palavras não são suficientes. Primeiro, é claro, a Deus, que sempre me deu suporte e me guiou para que eu conseguisse chegar aonde cheguei.

Também quero agradecer a minha família, que sempre me deu apoio e fez tudo que podia para me ajudar no que eu precisasse; em especial aos meus pais, Roni e Rita, que me deram toda a base para que eu conseguisse atingir esse momento, sem esquecer das minhas irmãs, Milena e Nicolay, que sempre me ajudaram, seja nos estudos ou como pessoa.

Também quero fazer um agradecimento a todos os colegas do grupo de pesquisa, em especial a Mariane Bigarelli, Rodrigo Salvador e Isabella Zerbetto que em meio a esse tempo de pandemia sempre me ouviram através das videochamadas, mas principalmente me ajudaram a estruturar esse trabalho.

Deste grupo de pesquisa fantástico, LESP - Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis, tenho que agradecer a todos os professores que dedicam sua vida a fazer com que esse grupo seja cada dia melhor; que sempre me ajudaram e estavam prontos para tirar minhas dúvidas, mas em especial ao meu orientador, professor Dr. Cassiano Moro Piekarski, pessoa que eu admiro muito, e foi essencial em tudo que eu fiz.

Por fim, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Cada vez mais o meio ambiente vem sendo impactado pelo ser humano devido ao aumento populacional e seu consumismo. Uma opção tecnológica para a minimização dos potenciais impactos ambientais e otimização dos indicadores econômicos é a implantação e uso de biodigestores na cadeia produtiva de proteína suína, um setor onde também houve crescimento ao longo dos últimos anos. O processo de biodigestão gera biogás - que pode ser utilizado para produção de energia, CO₂ e biofertilizante - a partir de resíduos orgânicos, ou seja, é uma forma de tratamento de resíduos. Então, o objetivo desta pesquisa foi identificar os potenciais impactos ambientais e a influência de variáveis econômicas associadas a implantação e uso do biodigestor na produção industrial de proteína suína. Para isso, foi realizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da cadeia de produção da carne suína *gate-to-cradle*, ou seja, desde a fabricação de ração até a saída da proteína suína do frigorífico, pronta para ser embalada ou industrializada. Foram comparados os resultados da ACV do cenário compostagem, que era o tratamento de resíduos utilizado, com o cenário da digestão anaeróbia, o novo tratamento de resíduos. Para identificar a influência das variáveis econômicas foi feita uma análise de sensibilidade a partir do Valor Presente Líquido (VPL), um indicador financeiro que traz os valores investidos à data atual. O estudo mostrou que o custo de manutenção e operação anual do biodigestor foi a variável que mais influenciou no VPL, juntamente com o custo evitado de energia elétrica na fábrica que processa a carne suína, já que foi deixado de utilizar uma parte da energia elétrica que provinha da rede, ao utilizar a energia gerada pelo biodigestor. Relacionado a avaliação ambiental no ciclo de vida de proteína suína estudado, houve uma diminuição dos potenciais impactos ambientais gerados com a implantação do tratamento de resíduos biodigestor nas categorias de potencial de aquecimento global (GWP – *global warming potencial*) em -1,19% (para o GWP biogênico houve uma diminuição de -1,45%, GWP fóssil uma diminuição de -1,21% e para GWP uso da terra e transformação do solo a diminuição foi de -0,65%). Nas categorias de depleção de recursos também houve diminuição nos potenciais impactos (elementos foi -0,10%, combustíveis fósseis -1,21% e escassez da água -3,53%); já nas categorias de impacto potencial de eutrofização e acidificação, o tratamento de resíduos com a compostagem demonstrou singelo menor potencial para impactos ambientais. Desta forma, este estudo evidenciou os pontos chaves, benefícios e limitações desta tecnologia em novos projetos no setor.

Palavras-chave: proteína animal; suíno; biogás; avaliação do ciclo de vida; avaliação econômica.

ABSTRACT

Human beings have increasingly impacted the environment due to population growth and consumerism. A technological option for minimizing potential environmental impacts and optimizing economic indicators is implementing and using biodigesters in the pork protein production chain: a sector that has also grown in recent years. The biodigestion process generates biogas - which can be used to produce energy, CO₂, and biofertilizer - from organic waste as a form of waste treatment. So, the objective of this research was to identify the potential environmental impacts and the influence of economic variables associated with the implantation and use of biodigester in the industrial production of pork protein. For this, a Life Cycle Assessment (LCA) cradle-to-gate of the pork production chain was carried out from the production of feed to the exit of the pork protein from the slaughterhouse, ready to be packaged. The LCA results of the composting scenario, which was the waste treatment used, were compared with the new waste treatment's anaerobic digestion scenario. A sensitivity analysis was performed to identify the influence of economic variables based on the Net Present Value (NPV), this financial indicator that brings the amounts invested to the current date. The study showed that the biodigester cost of maintenance and annual operation was the variable that most influenced the NPV, as well as the electricity avoided cost in the slaughterhouse - since the electricity from biodigester was being used, not only the electricity from the grid. Related to the environmental assessment of the pork protein life cycle studied, there was a decrease in the potential environmental impacts generated with the implementation of biodigester waste treatment in the categories of GWP - Global Warming Potential by -1.19% (for biogenic GWP, there was a decrease of -1.45%, fossil GWP a reduction of -1.21% and for GWP land use and soil transformation the decline was -0.65%). In the resource depletion categories, there was also a decrease in potential impacts (elements was -0.10%, fossil fuels -1.21%, and water scarcity -3.53%). In the potential impact of eutrophication and acidification the composting waste treatment showed less potential for environmental impacts. Thus, this study highlighted the key points, benefits, and limitations of this technology in new projects in the sector. In this way, this study was fundamental to list the key points, benefits, and limitations of this technology in new projects in the sector.

Keywords: swine; biogas; life cycle assessment; economic aspects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do Trabalho.....	21
Figura 2 - Procedimentos Metodológicos	22
Figura 3 - Palavras-chave utilizadas nesta pesquisa	24
Figura 4 - Quantidade de estudos encontrados e filtragem	24
Figura 5 - Produção mundial de carne suína em mil toneladas	41
Figura 6 - Esquema do Funcionamento da Digestão Anaeróbia.....	42
Figura 7 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida	47
Figura 8 - Fluxograma do Ciclo de Vida do Suíno	71
Figura 9 - Mudanças no sistema devido ao tipo de tratamento de resíduos	73
Figura 10 - Fluxo de Caixa do investimento de implantação de um biodigestor	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Representatividade das notas na Matriz Pedigree no Estudo	36
Gráfico 2 - Contribuições das fases do ciclo de vida para cada potencial impacto ambiental - Compostagem.....	75
Gráfico 3 - Contribuições das fases do ciclo de vida para cada potencial impacto ambiental - Biodigestor.....	76
Gráfico 4 - Variação dos Potenciais Impactos Ambientais com a Implantação do Biodigestor para o Sistema Todo	76
Gráfico 5 - Análise de Sensibilidade Econômica para Implantação e Operação do Biodigestor perante variação para VPL.....	85
Gráfico 6 - Análise de Sensibilidade Numérica da Implantação e Operação do Biodigestor	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quais ODS este trabalho está alinhado e como	19
Quadro 2 - Estudos selecionados da pesquisa (i).....	27
Quadro 3 - Estudos selecionados da pesquisa (ii).....	27
Quadro 4 - Relação das categorias de impacto e métodos utilizados.....	32
Quadro 5 - Categorias de Impacto: definição, indicadores e danos causados .	33
Quadro 6 - Notas da Matriz Pedigree.....	35
Quadro 7 - Fonte dos Dados	37
Quadro 8 - Quantidade de Esterco e Biogás gerados na Suinocultura.....	56
Quadro 9 - Conteúdo dos artigos da pesquisa (i)	58
Quadro 10 - Unidades funcionais dos estudos da pesquisa (i)	59
Quadro 11 - Países onde foram realizadas as ACVs da pesquisa (i).....	60
Quadro 12 - Conteúdo dos artigos da pesquisa (ii)	64
Quadro 13 - Dados sobre os estudos da pesquisa (ii) - local, viabilidade, taxas e tempos	64
Quadro 14 - Dados sobre os estudos da pesquisa (ii) - avaliação econômica ..	65
Quadro 15 - Dados sobre os estudos da pesquisa (ii) - propriedade e biodigestor	66
Quadro 16 - Mudanças de Dados entre os cenários Compostagem x Biodigestor	74
Quadro 17 - Filtros Aplicados para Selecionar os Dados.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias dos estudos selecionados da pesquisa (i).....	25
Tabela 2 - Categorias dos estudos selecionados da pesquisa (ii).....	26
Tabela 3 - Composição nutricional dos principais cortes suínos.....	31
Tabela 4 - Estimativa de biogás gerado a partir de diferentes origens de substrato.....	56
Tabela 5 – Categorias de Impactos Avaliadas nas Pesquisas	59
Tabela 6 - Potenciais Impactos Ambientais em relação a Unidade Declarada de 1kg.....	75
Tabela 7 - Emissões do Fluxo de Compostagem e Biodigestão da Ecoinvent v.3.7.1	78
Tabela 8 - Previsão do IPCA.....	81
Tabela 9 - Variações da Tarifa Energética entre os anos de 2003 a 2021.....	82
Tabela 10 - Possíveis Cenários e Impactos no VPL	87

LISTA DE ABREVIATURAS

CH ₄	gás metano
CO ₂ eq.	dióxido de carbono equivalente
ha	Hectare, unidade de área
kcal	quilocaloria, unidade de energia
kg	quilograma, unidade de massa
kWh	quilowatt-hora, unidade de energia
N ₂ O	óxido nitroso
NH ₃	Amônia
m ³	metro cúbico, unidade de volume
MJ	mega joule, unidade de energia
Sb eq.	antimônio equivalente
SO ₂ eq.	dióxido de enxofre equivalente
ton	tonelada, unidade de massa

LISTA DE SIGLAS

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AIC	<i>Akaike Information Comparison</i> : comparação de informação de Akaike
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
BMMR	<i>Brownian Motion with Mean Reversion</i> : movimento browniano com reversão à media
CHP	<i>Combined heat and power</i> : unidade de calor e energia ou cogeração
CSTR	<i>Continued Stirred Tank Reactor</i> : reator de tanque agitado continuado
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i> : declaração ambiental de produto
FCR	<i>Feed conversion ratio</i> : taxa de conversão alimentar
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i> : potencial de aquecimento global
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
NA	Não se aplica
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PPGEP	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i> : reator de manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente
UF	Unidade Funcional
UPL	Unidade produtora de leitões
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VPL	Valor presente líquido

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DAP	Declaração Ambiental de Produto
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
LEF	<i>Low Emission Farming</i> : agricultura de baixa emissão
LESP	Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis
ONU	Organização das Nações Unidas
TACO	Tabela Brasileira de Composição de Alimentos
TIR	Taxa Interna de Retorno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Objetivos	16
1.1.1.	Objetivo Geral.....	16
1.1.2.	Objetivos Específicos	16
1.2.	Justificativa.....	17
1.3.	Aderência ao Programa, Área de Concentração, Linha e Projeto de Pesquisa.....	19
1.4.	Estrutura do Trabalho	20
2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
2.1.	Levantamento Bibliográfico	23
2.2.	Caracterização da Cadeia Produtiva de Proteína Suína	28
2.3.	Avaliação Ambiental	29
2.3.1.	Objetivo	29
2.3.2.	Escopo	30
2.4.	Avaliação Econômica.....	37
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	40
3.1.	Cadeia Produtiva de Proteína Suína	40
3.2.	Biogás	42
3.3.	Avaliação do Ciclo de Vida.....	45
3.4.	Potenciais Impactos Ambientais na Suinocultura.....	49
3.4.1.	Potenciais Impactos Ambientais da Alimentação dos Suínos	51
3.4.2.	Potenciais Impactos Ambientais dos Resíduos dos Suínos	53
3.4.3.	Outros Potenciais Impactos Ambientais da Produção de Suínos.....	57
3.4.4.	Resultados da Pesquisa (i).....	58
3.5.	Avaliação Econômica.....	61
3.6.	Avaliação Econômica de Biodigestores na Suinocultura.....	61
3.6.1.	Resultados da Pesquisa (ii).....	63
3.7.	Melhorias Propostas por outros Autores	66
4	RESULTADOS.....	70
4.1.	Caracterização da Cadeia Suína	70
4.2.	Avaliação do Ciclo de Vida.....	72
4.3.	Avaliação de Influência Econômica.....	80

4.3.1.	Custos Evitados: Forma de Cálculo	83
4.3.2.	Valor Presente Líquido	85
5	CONCLUSÕES	89
5.1.	Atingimento dos Objetivos Propostos	89
5.2.	Limitações do Estudo	90
5.3.	Sugestões para Estudos Futuros	91
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

O consumo de proteína animal aumentou significativamente nos últimos anos, onde prevê-se que em 2050 a produção de carne suína seja de 465 milhões de toneladas, o dobro da produção do ano de 2000; isto porque, além do crescente aumento populacional, os hábitos de consumo da população também se transformaram, consumindo carne cada vez mais (REYES *et al.*, 2019).

Dos principais tipos de proteína animal, no Brasil os líderes de consumo são as aves, seguidos dos bovinos e suínos; fato que difere do cenário mundial, onde a carne suína é a proteína animal mais consumida (AMORIM, 2021).

Segundo os dados do relatório anual de 2020 da Associação Brasileira de Proteína Animal – com dados correspondentes ao ano de 2019 – o Brasil é o quarto maior produtor de carne suína no mundo, com 3,983 milhões de toneladas de carne suína produzidas, representando 3,9% da produção mundial (ABPA, 2020).

Devido aos expressivos números e ao aumento do consumo da carne suína, um desafio vem sendo estabelecido: as demandas devem ser atendidas, porém, os recursos naturais não podem ser esgotados (KAUFMANN, 2015). Entretanto, durante a produção de suínos muitos impactos ambientais são gerados, devido principalmente a geração de dejetos e a cadeia produtiva da ração (CHERUBINI *et al.*, 2015).

Das emissões totais de CO₂ eq., 14,5% são provenientes da produção animal, sendo destas, 9,4% da produção de carne suína (KAUFMANN, 2015); 70% das terras agrícolas são utilizadas direta e indiretamente para o setor pecuário (WANG *et al.*, 2016).

Ou seja, há necessidade de sistemas produtivos mais sustentáveis, por isso, é essencial o levantamento de dados acerca dos impactos ambientais gerados na atividade (CHERUBINI *et al.*, 2015). Para isto, há a Avaliação do Ciclo de Vida, ou ACV, uma técnica que avalia o desempenho ambiental de um produto ou serviço, identificando os pontos críticos de todo o ciclo de vida onde o item analisado está inserido (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016) e fornecendo subsídios para tomada de decisão em prol da redução dos impactos ambientais. Além disso, a ACV é uma forma de estratégia de *marketing* e gerenciamento da cadeia de suprimentos (BACENETTI *et al.*, 2016). A ACV tem sido muito utilizada em vários setores, com uma forte tendência no setor de suínos, já que é um setor de alta representatividade

no consumo mundial e que apresenta algumas ineficiências de recursos naturais (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016).

Estudos como em (CHERUBINI *et al.*, 2015; KAUFMANN, 2015; GUTIÉRREZ *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016; WIEDEMANN; MCGAHAN; MURPHY, 2016; ZHOU *et al.*, 2018; REYES *et al.*, 2019) vem mostrando por meio das ACV's que uma das alternativas com melhor custo-benefício para mitigar os impactos que a produção de carne suína causa no meio ambiente é através da produção de biogás, uma energia considerada limpa e renovável (VRIES *et al.*, 2012; SOUSA *et al.*, 2020), que além de gerar a bioenergia, também pode gerenciar os dejetos gerados na atividade, evitando que sejam despejados na natureza sem tratamento adequado (HAMELIN *et al.*, 2011).

A bioenergia proveniente da biodigestão é produzida a partir de microrganismos que metabolizam resíduos orgânicos através da digestão anaeróbia (CIRINO *et al.*, 2017) utilizando como matéria-prima culturas energéticas, resíduos de atividades domésticas, agrícolas, pecuárias, florestais e industriais (LIJÓ *et al.*, 2014) e tendo como resultado o biogás e biofertilizante (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010).

Com o aumento da demanda energética e nas variações dos preços de energia (MARTINS; OLIVEIRA, 2011), o uso de energias renováveis se tornou primordial, isto porque, em meio a tantas mudanças climáticas, as energias renováveis se apresentam como uma boa opção para utilizar menos combustíveis fósseis (VRIES *et al.*, 2012), que emitem em grande quantidade os gases de efeito estufa, uma das causas do aquecimento global (LIJÓ *et al.*, 2014). Cada vez mais tem sido dado subsídios para produção de energia renovável como o biogás, isto porque, gera uma economia ambiental: colabora com regulamentações cada vez mais rígidas, e ainda ajuda no crescimento econômico das fazendas (KAUFMANN, 2015).

Com o biogás o interesse ambiental fica alinhado com o econômico: os impactos gerados pelos resíduos utilizados como matéria-prima são amenizados e simultaneamente há geração de renda para a propriedade (SOUSA *et al.*, 2020). Desta forma, a parte ambiental pode até mesmo deixar de ser vista como um gasto, e passar a ser vista como um investimento; além disso, investimentos voltados para essa área evitam pagamento de multas por problemas ambientais, melhoram a qualidade de vida e aumentam a produtividade do sistema (SANTOS LIMA; MIRANDA, 2014).

A percepção de que o biogás é um investimento já foi comprovada em estudos (MARTINS; OLIVEIRA, 2011; EDWIGES *et al.*, 2012; SANTOS LIMA; MIRANDA, 2014; CERVI *et al.*, 2017; CIRINO *et al.*, 2017; ANTÔNIO; OLIVEIRA FILHO; SILVA, 2018; DIEL *et al.*, 2020) que calcularam a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir de dejetos suínos.

Geralmente o foco dos estudos sobre biodigestor, seja avaliação ambiental ou econômica, se dá nos processos de digestão anaeróbia que usam a matéria-prima proveniente do campo, como dejetos suínos ou culturas energéticas. Poucos os estudos que relatam a implementação do biodigestor com resíduos da área industrial. Além disso, cada estudo conta com variáveis e objetivos únicos, que dizem respeito à uma localidade, que podem não representar outras regiões.

Diante destes fatos, notou-se a importância de evidenciar os potenciais impactos ambientais e econômicos que ocorrem em um sistema de produção de carne suína que utilize biodigestor para produção de biogás, a partir de resíduos provenientes da agricultura ou indústria, utilizando dados de produção locais.

Desta forma, definiu-se como problema deste trabalho: “Quais são os potenciais impactos ambientais e a influência de variáveis econômicas associadas ao uso do biodigestor na produção industrial de proteína suína?”.

1.1. Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão estruturados em geral e específico, sendo o objetivo geral composto pelos objetivos específicos.

1.1.1. Objetivo Geral

Identificar os potenciais impactos ambientais e a influência de variáveis econômicas associadas ao uso do biodigestor na produção industrial de proteína suína.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a cadeia de produção de proteína suína na região do estudo.
- Avaliar os potenciais impactos ambientais da produção de proteína suína com e sem biodigestor na fase industrial.
- Estruturar o modelo econômico para estudo de engenharia econômica da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína.
- Avaliar a sensibilidade/influência de variáveis econômicas e possíveis cenários da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína.

1.2. Justificativa

Este trabalho utilizou dados provenientes de uma indústria que abate e processa carne de origem suína no Paraná, Brasil, em uma cadeia produtiva que envolve mais de 5 mil famílias na região. O estado do Paraná tem alta representatividade na produção de carne suína no Brasil: é o segundo maior estado produtor, com 841 mil toneladas em 2019, 20,41% da produção nacional, atrás apenas de Santa Catarina com 1.119 mil toneladas (EMBRAPA, 2020). A suinocultura, tema central deste estudo, possui papel importante na economia brasileira, gerando empregos desde o campo, até comércio, serviços, indústria (SANTOS LIMA; MIRANDA, 2014; CERVI *et al.*, 2017).

Este número significativo de produção de carne suína vem impactando cada vez mais o meio ambiente, já que a produção de carne gera resíduos, além de emissões de gases de efeito estufa (WANG *et al.*, 2016). Porém, os recursos do planeta são finitos, e a preservação e proteção desses recursos dependem das ações que o ser humano toma (DIEL *et al.*, 2020). Para quantificar esses potenciais impactos ambientais, este trabalho utilizou a ACV, que ajuda a identificar oportunidades de melhorias, além de permitir comparações entre sistemas desde o berço até o túmulo (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016). Em busca de estudar ações que tem como objetivo a sustentabilidade, desde os insumos até a destinação final, este trabalho encontra uma de suas justificativas. Além disso, melhorias ambientais também possuem vantagem competitiva para quem a implanta.

Uma forma de minimizar os impactos gerados com as atividades suinícolas é através da produção de biogás. A produção de biogás é um valioso recurso para a gestão dos dejetos (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016), ao dar um melhor destino para os resíduos - que são em grande volume -, evitando maiores danos ambientais e sanitários - já que há organismos patogênicos nesses resíduos -, além de gerar energia na área rural (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010). Para colaborar ainda mais com os estudos e a dispersão desta tecnologia que traz tantos benefícios, este trabalho encontra mais uma justificativa.

Em termos econômicos, a inclusão de biodigestores na cadeia produtiva de suínos pode caracterizar oportunidades de ampliação de retornos financeiros no sistema de produção, ao permitir a comercialização da energia gerada através do biogás, além da geração do biofertilizante (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010), reduzir custos operacionais, e proporcionar segurança energética no sistema, ao ajudar a diversificar a matriz, assegurando mais fontes energéticas (LIJÓ *et al.*, 2014).

Embora a matriz energética brasileira seja mais limpa que a mundial, ao ter 46,15% em 2019 da matriz com fontes renováveis, contra 14,5% da matriz mundial (IEA, 2022), ao compararmos dados da matriz energética brasileira ao longo dos anos é perceptível que não houve melhoras, já que em 1990 47,6% da matriz do país era renovável (SANTOS; SÁ RODRIGUES; CARNIELLO, 2021), reiterando ainda mais a necessidade de formas que mudem esse cenário, como o biogás.

Quando são buscadas formas de se alcançar a sustentabilidade, essas ações ficam alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, ou ODS (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016), definidos pela ONU – Organização das Nações Unidas, que devem ser alcançados até 2030. Os ODS que este trabalho está alinhado são abordadas no Quadro 1 (PACTO GLOBAL, 2021).

Segundo o Pacto Global (2021), se forem mantidas as perspectivas atuais, o Brasil só vai alcançar o ODS (7) - relacionado a energia acessível e limpa -, reiterando a importância de estudos que abordem outros ODS.

Além das ODS, ações que buscam reduzir a emissão dos gases de efeito estufa (GEE) estão alinhadas com o Protocolo de Kyoto, que através da ferramenta MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, possibilita certificar projetos que buscam redução dos GEE e gerar os créditos de carbono, que podem ser comercializados com organizações que têm interesse em adquirir os créditos para atingir as metas definidas (CIRINO *et al.*, 2017). O mercado brasileiro de carbono

ainda não se encontra regulado e podem existir oportunidades futuras quanto aos créditos de carbono relacionados às plantas de biogás. Devido a essa comercialização dos créditos de carbono, sistemas que usam a digestão anaeróbia se tornam mais interessantes economicamente (MARTINS; OLIVEIRA, 2011), propondo uma forma eficiente de recuperação do meio ambiente e busca pelo desenvolvimento sustentável (SOUSA *et al.*, 2020). Assim, estudos como este, mostram que há vários benefícios econômicos com a implantação de biodigestores.

Quadro 1 - Quais ODS este trabalho está alinhado e como

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável		Como esse estudo está alinhado
2	Fome zero e agricultura sustentável	Ao estudar o biodigestor, um sistema que gera renda e trabalho, além de dar um destino ambientalmente melhor aos resíduos
11	Cidades e Comunidades Sustentáveis	
7	Energia Acessível e Limpa	Ao trabalhar com energia limpa fornecida pelo biogás
8	Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Ao mostrar que há benefícios econômicos com a geração de biogás para a cadeia de valor
12	Consumo e Produção Responsáveis	Ao incentivar o uso coerente dos recursos para não esgotar os recursos naturais disponíveis
13	Ação Contra a Mudança Global do Clima	Ao estudar ações que minimizem os impactos advindos da suinocultura
14	Vida na Água	
15	Vida Terrestre	
17	Parcerias e Meios de Implementação	Ao promover parcerias com o setor privado para estudo de formas de mitigação dos impactos ambientais advindos da suinocultura

Fonte: Adaptado de Pacto Global (2021)

Embora os estudos encontrados descritos na seção 2.3 trabalhem com biodigestão, nenhum dos estudos apresentados estuda a implantação de um biodigestor para a parte industrial da produção de carne suína, e nem avaliam os potenciais impactos, sejam eles econômicos ou ambientais, mostrando a originalidade do trabalho.

1.3. Aderência ao Programa, Área de Concentração, Linha e Projeto de Pesquisa

A temática deste trabalho faz parte da área de estudo da Engenharia da Sustentabilidade e da Engenharia Econômica, as quais estão inseridas na Engenharia de Produção segundo a ABEPRO (2021), ao estudar formas de buscar melhorias para se obter a sustentabilidade com ênfase nos aspectos ambientais e econômicos.

Este trabalho faz parte da linha de pesquisa de “Gestão do Conhecimento e Inovação”, vinculado ao projeto de pesquisa “Sistemas Produtivos Sustentáveis”, desenvolvido no LESP - Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis do PPGEPP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Ponta Grossa.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos: o primeiro contém a Introdução, que aborda os principais temas constituintes deste trabalho além de elementos como problemática, objetivos, justificativa.

Já no segundo capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos, com as características da pesquisa e como ela acontecerá, além da explicação do contexto em que ela está inserida e definições das técnicas que ela utiliza.

Enquanto no terceiro capítulo, no referencial teórico é feita uma abordagem com os principais temas constituintes dessa dissertação, além da apresentação das informações referentes aos estudos encontrados na pesquisa.

No quarto capítulo são apresentados os resultados desta pesquisa, tanto da parte ambiental, como da parte econômica. Por fim, o último capítulo traz as considerações finais do trabalho, com o atingimento dos objetivos, limitações do estudo e sugestão de estudos futuros. A Figura 1 apresenta a composição da estrutura deste trabalho para um melhor entendimento.

Figura 1 - Estrutura do Trabalho

Capítulo 1	Contextualização do Tema da Pesquisa	Suínos		
		Biogás		
		Avaliação do Ciclo de Vida		
		Avaliação Econômica		
Capítulo 1	Problemática	Quais são os potenciais impactos ambientais e a influência de variáveis econômicas associadas ao uso do biodigestor na produção industrial de proteína suína?		
		Objetivo Geral	Identificar os potenciais impactos ambientais e a influência de variáveis econômicas associadas ao uso do biodigestor na produção industrial de proteína suína	
			Objetivo Específico	Caracterizar a cadeia de produção de proteína suína na região do estudo
				Avaliar os potenciais impactos ambientais da produção de proteína suína com e sem biodigestor na fase industrial
Estruturar o modelo econômico para estudo de engenharia econômica da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína				
Avaliar a sensibilidade/influência de variáveis econômicas e possíveis cenários da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína				
Capítulo 2	Metodologia	Levantamento Bibliográfico		
		Caracterização da Cadeia Produtiva de Proteína Suína		
		Avaliação Ambiental		
		Avaliação Econômica		
Capítulo 3	Referencial Teórico	Cadeia Produtiva de Proteína Suína		
		Biogás		
		Avaliação do Ciclo de Vida		
		Potenciais Impactos Ambientais na Suinocultura		
		Avaliação Econômica		
		Avaliação Econômica de Biodigestores na Suinocultura		
		Melhorias propostas por outros autores		
Capítulo 4	Resultados	Avaliação do Ciclo de Vida		
		Avaliação Econômica		
Capítulo 5	Considerações Finais	Atingimento dos Objetivos Propostos		
		Limitações do Estudo		
		Sugestões para Estudos Futuros		

Fonte: Autoria própria (2022)

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo aborda os procedimentos metodológicos propostos para atingimento dos objetivos desta pesquisa. As seções que compõem esse capítulo contêm: (1) como ocorreu o levantamento bibliográfico, (2) como funciona a cadeia de suínas analisada neste estudo, (3) as definições necessárias para realização avaliação ambiental, conforme as ISOs NBR 14040 e 14044 de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e por fim, (4) as definições necessárias para a avaliação econômica.

A primeira etapa descrita no processamento metodológico é o levantamento bibliográfico, enquanto as demais etapas estão relacionadas aos objetivos específicos como apresenta a Figura 2, onde também há a relação de qual seção apresenta os resultados daquele determinado objetivo específico.

Figura 2 - Procedimentos Metodológicos

Etapa	Objetivos Específicos	Metodologia	Método	Resultado
1		Levantamento Bibliográfico	Pesquisa Bibliográfica	Seção 3
2	Caracterizar a cadeia de produção de proteína suína na região do estudo	Caracterização da cadeia Produtiva de Proteína Suína	Entrevistas, questionários e pesquisas	Seção 4.1
3	Avaliar os potenciais impactos ambientais da produção de proteína suína com e sem biodigestor na fase industrial	Avaliação Ambiental	Avaliação do Ciclo de Vida	Seção 4.2
4	Estruturar o modelo econômico para estudo de engenharia econômica da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína	Avaliação Econômica	Valor Presente Líquido	Seção 4.3.1
5	Avaliar a sensibilidade/influência de variáveis econômicas e possíveis cenários da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína	Avaliação Econômica	Análise de Sensibilidade	Seção 4.3.2

Fonte: Autoria própria (2022)

Em termos de classificação metodológica do trabalho, essa pesquisa pode ser classificada em relação: aos objetivos, aos procedimentos técnicos, à natureza e quanto à forma de abordagem.

Quanto aos objetivos, essa pesquisa se caracteriza como exploratória, ao deixar mais clara uma situação, e envolver etapas como levantamento da bibliografia, entrevistas com pessoas familiarizadas com a situação e exemplificação através de estudo de caso para melhor compreensão (GIL, 2002).

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, se encaixa como um estudo de caso, ao estudar um assunto em específico dentro do seu contexto real para compreender melhor a situação (GIL, 2002; SANTOS LIMA; MIRANDA, 2014).

Quanto à natureza, é uma pesquisa aplicada, ao gerar conhecimentos práticos para problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2001).

Quanto a forma de abordagem é uma pesquisa quantitativa, ao utilizar de recursos numéricos para quantificação dos itens analisados e para transformação desses valores em informações para análise (SILVA; MENEZES, 2001).

2.1. Levantamento Bibliográfico

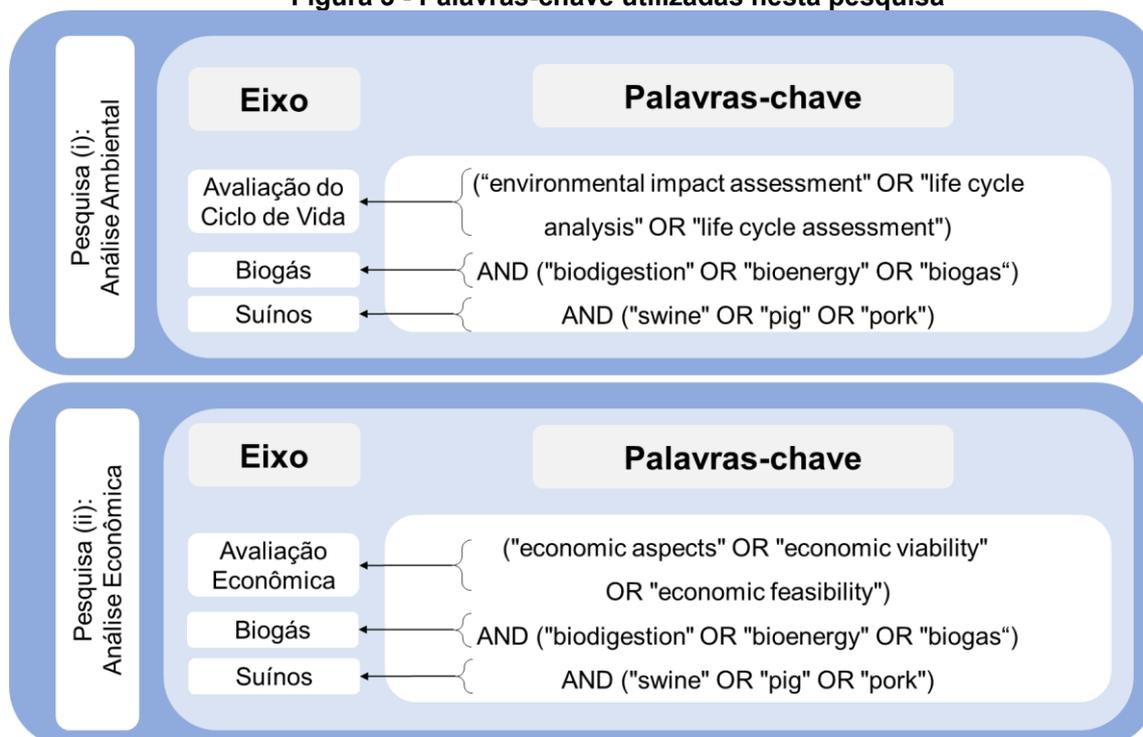
Para aprofundamento do tema estudado foi pesquisado inicialmente teses e dissertações com assuntos semelhantes, onde foi visto nestes materiais os tópicos mais relevantes e as palavras-chaves utilizadas. Desta forma, e pesquisando nas bases de dados com cada palavra-chave - buscando a melhor abrangência e ao mesmo tempo não deixando palavras que não tragam resultados -, foi possível definir o melhor conjunto de palavras-chaves.

Como essa pesquisa irá tratar de dois temas, a pesquisa foi dividida em (i) pesquisa relacionada a análise ambiental e (ii) pesquisa relacionada a análise econômica.

Na pesquisa (i) foram abordados três eixos de pesquisa: (a) avaliação do ciclo de vida, (b) biogás e (c) suínos, isto porque, buscou-se analisar como os estudos vem fazendo uma análise ambiental através da Avaliação do Ciclo de Vida da suinocultura que utiliza biodigestores para tratamento dos resíduos. Na pesquisa (ii) os eixos de pesquisa foram: (a) avaliação econômica, (b) biogás e (c) suínos, para de forma paralela, buscar os estudos que fizeram uma avaliação econômica da utilização de biodigestores na suinocultura. A relação das palavras-chaves utilizadas e dos eixos das duas pesquisas estão relacionados na Figura 3.

Com as palavras-chave da Figura 3 foi realizada uma pesquisa no dia 20 de outubro de 2020 em 3 bases de dados: *Web of Science*, *Scopus*, *Pro Quest*. Na *Web of Science* foi pesquisado por “tópicos”; na *Scopus* “título/resumo/palavra-chave”; e na *ProQuest* “Qualquer lugar, exceto texto completo”. A Figura 4 traz a relação da quantidade de estudos encontrada em cada base de dados para as duas pesquisas.

Figura 3 - Palavras-chave utilizadas nesta pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 4 - Quantidade de estudos encontrados e filtragem

	Base de dados	Busca Inicial	Total	Remoção duplicatas	Remoção Books/ InProceedings	Alinhados ao tema
Pesquisa (i): Análise Ambiental	Scopus	49				
	Web of Science	82	155	107	97	9
	ProQuest	24				
Pesquisa (ii): Análise Econômica	Scopus	54				
	Web of Science	43	114	65	61	9
	ProQuest	17				

Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 4 também é apresentada a quantidade de estudos depois de cada filtragem. Na primeira pesquisa foram obtidos 155 estudos, já na segunda foram 114. O primeiro filtro aplicado foi a remoção de duplicatas, tanto no *software Mendeley*, como no *JabRef*, obtendo 107 estudos para a pesquisa (i) e 65 para a pesquisa (ii). O segundo procedimento de filtragem foi a remoção de livros e *InProceedings*,

totalizando 97 estudos para a primeira pesquisa, e 61 para a segunda. Para verificar quais os estudos eram alinhados ao tema, foram lidos todos os resumos e títulos dos estudos selecionados, relacionando cada estudo a uma categoria geral, como pode ser visto na Tabela 1 para a pesquisa (i) e na Tabela 2 para pesquisa (ii).

Tabela 1 - Categorias dos estudos selecionados da pesquisa (i)

Tema do Estudo	Quantidade de Estudos em cada categoria	Porcentagem da categoria em relação ao total de estudos selecionados
Biogás a partir de culturas energéticas e dejetos	29	29,9%
Tratamento de dejetos suínos	12	12,4%
Suíno	8	8,2%
ACV de culturas energéticas e/ou dejetos	8	8,2%
Digestão anaeróbia	6	6,2%
ACV de Suíno sem análise da biodigestão	2	2,1%
Avaliação da viabilidade da implantação de biodigestor	2	2,1%
Digestato	2	2,1%
Economia Circular do Suíno	2	2,1%
Fertilizantes	2	2,1%
Tratamento de dejetos bovinos	2	2,1%
Biogás a partir de dejetos	2	2,1%
ACV de modelo de biodigestor	2	2,1%
Revisão de ACV de suínos	1	1,0%
ACV consequencial na dieta de animais	1	1,0%
ACV de modelo de biodigestor	1	1,0%
ACV do uso de antimicrobiano na suinocultura	1	1,0%
Análise da reciclagem de resíduos orgânicos	1	1,0%
Análise de como mitigar os impactos do consumo de carne	1	1,0%
Análise do esterco na água	1	1,0%
Análise dos benefícios do biogás a partir de dejetos bovinos	1	1,0%
Biogás a partir de culturas energéticas	1	1,0%
Biogás a partir de resíduos urbanos	1	1,0%
Impacto do odor da produção de biogás	1	1,0%
Modelo matemático para selecionar tratamento de resíduos	1	1,0%
Modelo para cálculo dos impactos ambientais do biogás	1	1,0%
Pegada de carbono de ração	1	1,0%
Presença de hormônios	1	1,0%
Produção de biometano	1	1,0%
Revisão do tratamento de dejetos de suínos	1	1,0%
Sustentabilidade no parque industrial	1	1,0%
Tratamento de dejetos suínos - não usa biodigestor	1	1,0%
Total	97	100,0%

Fonte: Autoria própria (2022)

Com as Tabela 1 e Tabela 2 é possível perceber que os estudos abordam os mais variados temas, porém, para esta pesquisa foram selecionados aqueles que estão destacados em cinza. Da pesquisa (i) foram selecionados os estudos relacionados à "Suíno" – 8 estudos, que são as pesquisas que fazem a avaliação do ciclo de vida de toda a vida do suíno, não contemplando apenas a fase de produção de dejetos da fase agrícola – maioria dos estudos. Somente 1 estudo fez uma revisão das ACV de suínos.

Os estudos com temas relacionados a digestão anaeróbia/biogás e seus variados substratos, como culturas energéticas, resíduos urbanos, dejetos, não satisfazem os objetivos desta pesquisa, pois acabam focando no biodigestor e no potencial do substrato em produzir biogás ou impactar no meio ambiente, e não na produção de suínos.

Já na pesquisa (ii) foram selecionados 9 estudos relacionados a análise da viabilidade econômica da implementação de biodigestor que use como substrato resíduos oriundos exclusivamente da suinocultura - só foram encontrados estudos com resíduos oriundos da parte agrícola, não contemplando a parte industrial. As outras análises descritas na Tabela 2 são variadas, desde análises dos patógenos presentes nos biodigestores, até análises ambientais da produção do biogás.

Tabela 2 - Categorias dos estudos selecionados da pesquisa (ii)

Tema do Estudo	Quantidade de Estudos em cada categoria	Porcentagem da categoria em relação ao total de estudos selecionados
Outras análises de viabilidade do biogás	25	41,0%
Outros substratos	10	16,4%
Viabilidade econômica do biogás	9	14,8%
Viabilidade econômica do biogás - variados substratos	4	6,6%
Análise de substratos	4	6,6%
Biocombustível	2	3,3%
Comparação de diferentes substratos	1	1,6%
Desenvolvimento de um modelo de avaliação econômica	1	1,6%
Estudo da evaporação da água dos dejetos	1	1,6%
Estudo do biodigestor doméstico	1	1,6%
Gaseificação da biodigestão	1	1,6%
Nível de produção e incentivos do biogás	1	1,6%
Panorama do biogás	1	1,6%
Total	61	100,0%

Fonte: Autoria própria (2022)

No Quadro 2 são apresentados os estudos selecionados para pesquisa (i) e no Quadro 3 para a pesquisa (ii), constando seus autores, título do estudo e ano de publicação.

Quadro 2 - Estudos selecionados da pesquisa (i)

Autores	Título	Ano
Reyes, Y., Barrera, E.L., Sarduy Valle, A., Perez Gil, M., Hermida Garcia, O. and Dewulf, J.	Life Cycle Assessment for the Cuban pig production: Case study in Sancti Spiritus	2019
Zhou, Y.Q., Dong, H.M., Xin, H.W., Zhu, Z.Z., Huang, W.Q. and Wang, Y.	Carbon footprint assessment of a large-scale pig production system in northern China: a case study	2018
Cong, R.-G. and Termansen, M.	A bio-economic analysis of a sustainable agricultural transition using green biorefinery	2016
Gutiérrez, A., Cabello Eras, J.J., Billen, P. and Vandecasteele, C.	Environmental assessment of pig production in Cienfuegos, Cuba: alternatives for manure management	2016
McAuliffe, G., Chapman, D. and Sage, C.	A thematic review of life cycle assessment (LCA) applied to pig production	2016
Wang, X., Wu, X., Yan, P., Gao, W., Chen, Y. and Sui, P.	Integrated analysis on economic and environmental consequences of livestock husbandry on different scale in China	2016
Wiedemann, S., McGahan, E. and Murphy, C.	Environmental impacts and resource use from Australian pork production assessed using life-cycle assessment. 1. Greenhouse gas emissions	2016
Cherubini, E., Zanghelini, G., Alvarenga, R., Franco, D. and Soares, S.	Life cycle assessment of swine production in Brazil: A comparison of four manure management systems	2015
Kaufmann, T.	Sustainable livestock production: Low emission farm - The innovative combination of nutrient, emission and waste management with special emphasis on Chinese pig production	2015

Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 3 - Estudos selecionados da pesquisa (ii)

Autores	Título	Ano
Diel, P., Casarin, V., Stracke, M., da Silva, D., Santos, A. and Przychynski, R.	Economic management model of electricity generated from biomass in a pig farm	2020
Sousa, A., de Carvalho, B., Junior, W. and Soto, F.	Return on investment of wastewater treatment systems in swine farms	2020
Antonio, A.d.S., Oliveira Filho, D., da Silva, S.C.S., Antônio, A., Filho, D. and da Silva, S.C.S.	Electricity Generation From Biogas On Swine Farm Considering The Regulation Of Distributed Energy Generation In Brazil: A Case Study For Minas Gerais	2018
Cirino, J., Ferreira, M. and de Faria, L.	Financial and economic analysis under risk conditions for investment projects on biodigester for generation of electric energy from pig farming: A case study for a farm in Minas Gerais	2017

Santos Lima, D.F. and Miranda, G.J.	Economic and financial viability analysis of the use of biogas to produce electricity	2014
Meinen, R.J., Kephart, K.B. and Graves, R.E.	Economic feasibility and evaluation of a novel manure collection and anaerobic digestion system at a commercial swine finisher enterprise	2014
Edwiges, T., Feiden, A., Carneiro, C., Nogueira, C. and Fernandes, D.	Economic evaluation of the use of biogas in Entre Rios Do Oeste, Brazil	2012
Martins, F. and Oliveira, P.	Economic analysis of the generation of electric energy from biogas in pig production	2011
Cervi, R., Esperancini, M. and Bueno, O.	Economic viability for electrical power generation using biogas produced in swine grange	2010

Fonte: Autoria própria (2022)

Os trabalhos selecionados foram lidos na íntegra e seu conteúdo está analisado na seção 3, sobre o referencial teórico.

2.2. Caracterização da Cadeia Produtiva de Proteína Suína

Para que esse estudo pudesse ocorrer foi realizado o entendimento de como opera a Cadeia Produtiva de Proteína Suína, pois, a partir dessa caracterização definiu-se quais seriam os dados necessários para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida.

Essa pesquisa pode ser dividida em três partes para coleta de dados: (i) fábrica de ração, (ii), campo e (iii) frigorífico. A partir de conhecimentos prévios por parte dos pesquisadores que realizaram o estudo, que já haviam trabalhado com o assunto, foram elaborados questionários para levantamento dos dados acerca de cada uma das partes envolvidas.

Mais de 90% da produção do frigorífico que abate a proteína suína vem de três Cooperativas, que compreendem a parte (i) e (ii). Inicialmente foi realizado o levantamento de uma Cooperativa.

Para a parte (i), da fábrica de ração, foram requisitados os dados, e estes respondidos por meio de e-mails com os responsáveis. Nesses questionários havia informações de quais tipos de grãos foram utilizados para produção da ração do suíno, em qual quantidade, materiais de limpeza, qual a origem e modelo de veículo utilizado para transporte.

Para a parte (ii) os questionários foram preenchidos pessoalmente pelos pesquisadores através de visitas técnicas, onde os produtores rurais e os técnicos responsáveis por essas propriedades responderam os questionários através de entrevistas. Foram selecionadas propriedades que representavam cada um dos dois principais sistemas de criação dos animais; como as propriedades pertencem a mesma Cooperativa, o modo como operam é semelhante.

Os dados de campo foram compilados, e dúvidas que surgiram foram sanadas por meio de e-mails com os técnicos posteriormente. Foram requisitadas informações de quantidade de animais, alimentação, ingestão de água, eletricidade, remédios, vacinas, geração de dejetos, destinação desses dejetos, materiais para limpeza, modelo e capacidade de veículo utilizado para transporte.

Para levantamento dos dados da segunda Cooperativa foi utilizada a confirmação dos dados compilados da primeira Cooperativa; esses dados foram enviados por e-mail com o uso de planilhas. Já para a terceira Cooperativa foi feita uma reunião *on-line* onde foram confirmados os dados já pré-estruturados a partir do que havia sido confirmado da primeira e segunda Cooperativa.

Os dados do frigorífico, que correspondem a parte (iii), também foram respondidos por meio de questionários previamente elaborados pelos pesquisadores via *on-line*, e sanadas dúvidas posteriormente via e-mail. Os dados requisitados envolviam quantidade de eletricidade utilizada, água, produtos de limpeza, destinação de resíduos e quantidade, como e onde os produtos são utilizados.

A partir da confirmação de como o sistema opera, simultaneamente já foram estruturados os dados utilizados na Avaliação Ambiental.

2.3. Avaliação Ambiental

Para avaliação ambiental essa pesquisa utilizou a Avaliação do Ciclo de Vida, ou ACV, com as definições descritas através da fase 1 da ACV, de definição de escopo e objetivo.

2.3.1. Objetivo

O objetivo da ACV foi obter o potencial impacto gerado para produção de carne suína produzida numa indústria no Paraná, Brasil, a fim de compreender a geração dos potenciais impactos ambientais entre o tratamento de resíduos com o biodigestor e o realizado sem o biodigestor, neste caso, por meio da compostagem, simulando os dois cenários com base em dados do ano de 2020.

Os resíduos utilizados nos dois cenários – compostagem e biodigestão - são provenientes da organização onde a empresa está inserida, e os produtos do tratamento de resíduos são utilizados como insumo na fase de frigorífico da produção de carne suína. Desta forma, buscou-se o entendimento das mudanças que ocorrem de um tratamento de resíduos para o outro.

Esta ACV foi feita em relação a carne suína *in natura* que sai do processo produtivo. O público-alvo desta ACV é a comunidade científica, em específico aos que estudam sobre biodigestor, além da sociedade no geral, como consumidores, e a organização que participou da pesquisa.

2.3.2. Escopo

Segundo a norma ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ISO 14044 (ABNT, 2009b) faz parte do escopo: sistema do produto, funções do sistema, unidade funcional, fronteira do sistema, procedimentos de alocação, tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto, requisitos dos dados, suposições e limitações.

2.3.2.1. Sistema do Produto

O sistema do produto estudado está apresentado no tópico 4.1.

2.3.2.2. Funções do Sistema

A carne suína tem a função de nutrir enquanto alimento. Para especificar melhor essa função, na Tabela 3 é apresentada a composição dos principais cortes suínos para uma porção de 100g da parte comestível, a partir de informações da tabela TACO (NEPA, 2011), onde NA significa “não se aplica”.

Tabela 3 - Composição nutricional dos principais cortes suínos

	Bisteca	Costela	Lombo	Pernil
Umidade (%)	67,7	61,2	67,7	67,1
Energia (kcal)	164	256	176	186
Proteína (g)	21,5	18	22,6	20,1
Lipídeos (g)	8	19,8	8,8	11,1
Colesterol (mg)	56	69	55	59
Carboidrato (g)	0	0	0	0
Fibra Alimentar (g)	NA	NA	NA	NA
Cinzas (g)	1	0,9	1	1
Cálcio (mg)	6	15	4	13
Magnésio (mg)	24	18	24	23

Fonte: NEPA (2011)

2.3.2.3. Unidade Funcional

A unidade funcional é relacionada com a função do produto, como uma forma de referenciar as entradas e saídas do processo e assim possibilitar os cálculos da ACV, assim como as suas comparações (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

Porém, como será visto no tópico 3.5.4 no Quadro 10, quando se trata da suinocultura e de seus produtos, os pesquisadores optam por utilizar a unidade declarada, caso desta pesquisa. No programa de certificação ambiental DAP - Declarações Ambientais de Produto, também é utilizada a unidade declarada de 1 kg de produto segundo as orientações da PCR – *Product Category Rules* -, um guia de como deve ser realizada a ACV para ganhar a certificação (PCR 2012-11). Assim, a unidade declarada deste estudo é de 1kg de carne suína in natura, pronta para ser embalada.

2.3.2.4. Fronteira do Sistema

A avaliação realizada foi do tipo “*cradle-to-gate*”, ou seja, desde o berço até o portão da fábrica, contemplando desde o cultivo das culturas que compõem a ração, com todos os insumos necessários, seu transporte, produção da ração, transporte, manejo dos animais desde as matrizes, nascimento e terminação dos leitões, transporte, abate e processamento da carne.

Não está incluso neste estudo o processo de embalagem, seja primária ou secundária e processos posteriores, como o consumo da proteína animal, sua

destinação e disposição final. Não está incluso nesta avaliação também a destinação do digestato ou resíduo proveniente do processo da compostagem.

2.3.2.5. Alocação

Este trabalho não utilizou alocação, conforme procedimentos previstos e aplicados neste trabalho baseado na norma ISO 14040 (ABNT, 2009a; ABNT 2009b).

2.3.2.6. Tipos de Impacto e Metodologia de Avaliação de Impacto

O *software* utilizado para cálculo da ACV é o openLCA versão 1.10.3, um programa de código aberto da GreenDelta®, empresa alemã (OPENLCA, 2022). Neste *software*, foram utilizadas as bases de dados Ecoinvent v.3.7.1 e Agribalyse 3.0.1.

As categorias de impacto definidas para serem utilizadas neste trabalho são as mesmas que o EPD® System utiliza para certificar os produtos de carnes suínas através das DAP (do inglês EPD – *environmental product declaration*), declarações onde fabricantes mostram o desempenho ambiental de seus produtos ou serviços (ENVIRONDEC, 2021). No Quadro 4 estão relacionadas as categorias de impacto usadas, assim como os métodos utilizados para gerá-las.

Quadro 4 - Relação das categorias de impacto e métodos utilizados

Nome		Método	Nome no OpenLCA	Unidade
Potencial de Acidificação		CML non-baseline	Acidification (fate not incl.)	(kg SO ₂ eq.)
Potencial de Eutrofização		CML baseline	Eutrophication	(kg PO ₄ ³⁻ eq.)
Potencial de depleção dos recursos naturais	Elementos Combustíveis fósseis		Abiotic depletion	(kg Sb eq.)
	Escassez da água		Abiotic depletion (fossil fuels)	(MJ, valor calorífico líquido)
		AWARE	Water use	(m ³)
Potencial de mudanças climáticas (GWP)	Fóssil	IPPC 2013 GWP 100a (incl. CO ₂ uptake)	Climate change - fossil	(kg CO ₂ eq.)
	Biogênico		Climate change - biogenic	(kg CO ₂ eq.)
	Uso de terra e transformação do solo		Climate change – land use and land transformation	(kg CO ₂ eq.)

Fonte: baseado em Environdec (2022) e Acero, Rodrigues e Citroth (2016)

A metodologia de Avaliação das categorias de impacto, ou seja, o que é a categoria, através de qual indicador é medido e os danos que a categoria contempla, está apresentada no Quadro 5, baseado em um documento publicado pelo GreenDelta® (ACERO; RODRÍGUES; CIROTH, 2016).

Quadro 5 - Categorias de Impacto: definição, indicadores e danos causados

Categoria de Impacto	Definição	Indicador	Danos
Potencial de Acidificação	Redução do pH devido aos efeitos acidificantes das emissões	Crescimento da acidez na água e solo	Comprometimento da qualidade dos ecossistemas e diminuição da biodiversidade
Potencial de Eutrofização	Acumulação de nutrientes no ambiente aquático	Aumento das concentrações de nitrogênio e fosforo - Formação de biomassa como alga	Perda da qualidade do ecossistema
Potencial de depleção dos recursos naturais	Redução da disponibilidade dos recursos devido ao uso	Diminuição da disponibilidade de recursos	Possível colapso do ecossistema
Potencial de mudanças climáticas (GWP)	Mudança na temperatura global devido aos gases de efeito estufa	Alterações na temperatura global e fenômenos climáticos	Diminuição na biodiversidade, mudanças de temperatura e aumento de fenômenos climáticos impactantes como ciclones e tempestades

Fonte: baseado em Acero, Rodrigues e Cirotth (2016)

2.3.2.7. Requisitos dos Dados

Nesta pesquisa os dados foram coletados por meio de entrevistas e questionários com funcionários de cada uma das partes envolvidas – fábrica de ração, campo e indústria. As entrevistas foram realizadas pessoalmente, *in loco* e em abordagens online. Todos os dados, após tratamento foram validados com responsáveis e/ou pesquisadores especialistas.

2.3.2.8. Suposições

Após a coleta dos dados e sua validação, eles foram inseridos no OpenLCA. Foram utilizados os fluxos disponíveis nas bases de dados da Ecoinvent v.3.7.1 – grande parte - e Agribalyse 3.0.1. para ingredientes da ração, produtos de limpeza, água, eletricidade, entre outros. Em ambos os casos, após a seleção do fluxo, foi

colocada a quantidade utilizada e então selecionado o provedor mais próximo da realidade.

Relacionado a fase de campo, foram alcançados dados que correspondem a mais de 90% dos produtores que trabalham com a criação de suínos e fornecem à indústria estudada.

2.3.2.9. Limitações

O estudo não realizou procedimentos de testes de alocações com base em massa comparada com abordagem econômica, devido impossibilidade de acesso à dados econômicos de todo o sistema de produção.

Não foi considerada a diferença de distância entre o local onde é feita a compostagem e o local onde é feita a biodigestão para transporte dos resíduos, visto que, como são locais que recebem resíduos de vários lugares, considerou-se essa distância insignificante.

O estudo não contemplou cenários de comercialização de créditos de carbono gerado no sistema de biodigestão.

2.3.2.10. Requisitos da qualidade dos dados iniciais

2.3.2.10.1. *Período coberto*

Os dados utilizados são do ano de 2020.

2.3.2.10.2. *Área geográfica coberta*

Os dados primários representam uma região do estado do Paraná, Brasil e englobam desde a fase da fabricação da ração, criação dos animais até a fase de industrialização – matadouro. A plantação dos grãos utilizados na fabricação da ração também vem do estado do Paraná e representa mais de 95% do volume utilizado.

2.3.2.10.3. *Precisão, completeza e representatividade dos dados*

A fim de verificar a precisão, completeza e representatividade dos dados foi utilizada a Matriz Pedigree, presente no próprio *software* OpenLCA, que avalia a qualidade dos dados. Nesta matriz são preenchidos 5 requisitos através de notas de 1 a 5, onde quanto menor a nota no requisito, melhor. Os requisitos são relacionados a fonte: confiabilidade, completeza, correlação temporal, geográfica e tecnológica. A matriz é apresentada no Quadro 6.

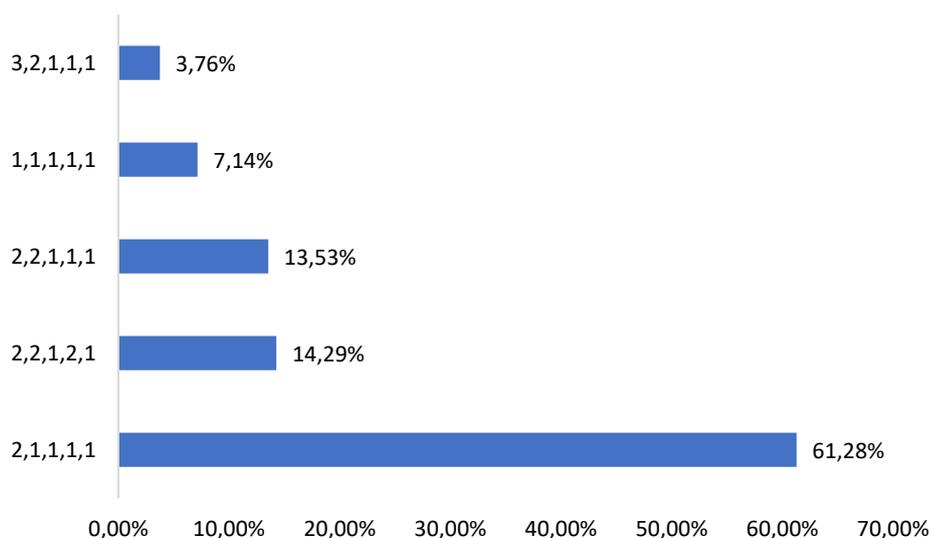
Quadro 6 - Notas da Matriz Pedigree

		1	2	3	4	5
Confiança		Dados verificados baseados em medidas	Dados parcialmente verificados baseados em estimativas ou Dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativa qualificada	Estimativa não qualificada
Completeza		Dados representativos de todos os locais relevantes para o mercado considerado e com período adequado para compensar flutuações	Dados representativos de >50% dos locais relevantes para o mercado considerado, com períodos adequados para compensar flutuações normais	Dados representativos de somente alguns locais (<<50%) relevantes para o mercado considerado ou >50% dos locais, mas com períodos curtos	Dados representativos de apenas um local representativo para o mercado considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e períodos curtos
Correlação	Temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano de estudo	Menos de 6 anos de diferença para o ano de estudo	Menos de 10 anos de diferença para o ano de estudo	Menos de 15 anos de diferença para o ano de estudo	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença para o ano de estudo
	Geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída	Dados de uma área com condições similares de produção	Dados de uma área com condições ligeiramente similares de produção	Dados de área desconhecida ou muito diferente
	Tecnológica	Dados do empreendimento, processos e materiais em estudo	Dados dos processos e materiais em estudo (exemplo: tecnologia idêntica) mas, de diferentes empreendimentos	Dados de processos ou materiais relacionados com o estudo, mas com diferentes tecnologias	Dados de processos ou materiais relacionados	Dados de processos ou materiais relacionados, mas em escala laboratorial ou de diferente tecnologia

Fonte: *software* openLCA

A nota na matriz Pedigree segue o valor dado em cada um dos requisitos. Então uma nota de 2,1,1,1,1 mostra que o requisito confiabilidade foi avaliado em 2, enquanto os outros requisitos receberam nota 1. Para o sistema estudado, a porcentagem de dados que obtiveram cada uma das notas na Matriz Pedigree é apresentada no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Representatividade das notas na Matriz Pedigree no Estudo



Fonte: Autoria própria (2022)

A maior parte – 61,28% dos fluxos – recebeu a classificação 2,1,1,1,1, isto porque, como relatado nas Suposições, como não foram coletados dados do sistema de maneira integral (100%), fez-se uma média para contemplar os dados faltantes (menos de 10% e que não se mostraram significativos em termos de influência dos dados finais).

2.3.2.10.4. Consistência e reprodutibilidade dos métodos usados ao longo da ACV

Foi utilizado o mesmo padrão para tratar todos os dados, garantindo que caso seja necessário, seja possível refazer todos os cálculos, já previamente indicados como foram realizados.

2.3.2.10.5. Fontes dos dados e sua representatividade

A relação de quais são os dados primários – coletados pelos pesquisadores, secundários – provenientes de bases de dados - e *proxy* – calculados a partir de diretrizes ou normas - utilizados nesta pesquisa estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Fonte dos Dados

Tipos de Dados	Usos desse estudo
Primários (específicos)	Todos os dados obtidos através dos questionários e entrevistas que dizem respeito ao processo realizado na empresa estudada
Secundários (genéricos)	Fluxos utilizados no <i>software</i> openLCA para compor os processos, obtidos através das bases de dados - Ecoinvent v.3.7.1 e Agribalyse 3.0.1
Proxy (aproximados)	Cálculos das emissões do manejo de dejetos, obtidos através do IPCC

Fonte: Autoria própria (2022)

Como a maioria dos dados é obtido diretamente da empresa, eles são caracterizados como dados primários, fato esse, já evidenciado pelos resultados na Matriz Pedigree, no Gráfico 1.

2.3.2.10.6. Incerteza da informação

Todos os dados, após coleta, foram estruturados e então confirmados pelos responsáveis, garantindo que as informações apresentadas refletem a realidade.

Após as definições do objetivo e escopo, fase 1 da ACV, os dados foram inventariados, fase 2 da ACV, e então dispostos no *software* para obtenção dos potenciais impactos ambientais, fase 3 da ACV, para então ser realizada a última fase – 4, que corresponde a interpretação dos dados.

2.4. Avaliação Econômica

Para avaliação de influência econômica da implantação de um biodigestor que utiliza resíduos provenientes da indústria que processa a proteína suína foi utilizado o VPL – Valor Presente Líquido, presente na equação da seção 3.5.

Para cálculo do VPL foram utilizadas quatro variáveis: (i) custo inicial, (ii) custo de manutenção e operação anual, (iii) custo evitado de energia elétrica calculado pela previsão de série temporal e (iv) custo evitado de destinação de resíduos. Além disso

também foi utilizado o IPCA, Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo para projetar a inflação dos anos seguintes.

Os dados da parte econômica - investimento inicial, custos e receitas anuais (nesse projeto as receitas são os gastos evitados) - foram obtidos diretamente da organização analisada através de questionários preenchidos e confirmados por colaboradores - assim como da parte ambiental. Entretanto, devido a sigilo empresarial os dados financeiros-econômicos não foram divulgados diretamente neste trabalho. Portanto, os resultados foram apresentados em termos percentuais e comparativos sem valores absolutos. Já os dados do IPCA foram obtidos do Relatório Focus dia 14 de janeiro de 2022.

Alguns dados relacionados com o biodigestor, como volume de substrato e de produção de energia elétrica e CO₂, foram obtidos com apoio do BiogásInvest, uma ferramenta gratuita que permite análises da viabilidade da implantação de biodigestores (GEF BIOGÁS BRASIL, 2021) – dados estes também confirmados pelos funcionários.

Uma das entradas do fluxo de caixa utiliza a previsão de série temporal baseada em dados históricos – previsão da tarifa energética. A previsão foi feita pelo programa @risk da Palisade® (com a licença de *software* do pacote *DecisionTools* da UTFPR), onde o próprio *software* encontra o melhor modelo que se adapta aos dados, baseado no valor do AIC – *Akaike Information Comparison*; esta é a técnica mais usada em estatística, e consiste em calcular o valor da informação do modelo a partir da máxima verossimilhança e número de parâmetros do modelo, onde o menor valor entre os diferentes modelos é selecionado (SHAFIQ *et al.*, 2021). O modelo selecionado para fazer a análise da dependência entre os dados, foi o BMMRJD, um modelo que combina BMMR com Difusão de Salto. O modelo BMMR (*Brownian Motion with Mean Reversion*) é baseado no fato de que algumas variáveis econômicas não aumentam indefinidamente – devido a economia -, encontrando um valor médio à longo prazo (NWAFOR; OYEDELE, 2022). Enquanto a Difusão de Salto é um processo utilizado para modelar preços (KOU; WANG, 2003). Assim, a partir destas definições, o *software* @risk permite a previsão dos valores para a tarifa energética.

Após o cálculo do VPL foi feita uma Análise de Sensibilidade buscando entender quais são as variáveis mais sensíveis as alterações dos seus valores. A

análise de sensibilidade busca identificar a influência de cada variável no comportamento do projeto ao alternar cada uma dessas variáveis de forma isolada, observando o resultado do indicador (LIMA *et al.*, 2021). Assim, é possível identificar as variáveis críticas do processo – àquelas que mais causam mudanças no resultado – fornecendo mais condições para tomada de decisão ao saber quais os limites da variação para o resultado permanecer dentro dos objetivos (RICHETTI; MELO, 2012). A partir da Análise de Sensibilidade foram estruturados possíveis cenários. Esses possíveis cenários foram montados ao oscilar mais de uma variável do projeto, oscilando duas variáveis, três variáveis e as quatro variáveis em conjunto. As variações foram de 5% e 10% para um cenário otimista.

Desta forma, após coleta e estruturação de todos os dados e cálculos feitos usando os *softwares* apresentados, os resultados obtidos e analisados são apresentados na seção 4.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Para entendimento do assunto tratado foi feita uma revisão bibliográfica sobre os principais temas deste trabalho: suinocultura, biogás, avaliação do ciclo de vida e avaliação econômica. Neste capítulo também são feitas relações entre estes temas, como os impactos ambientais na suinocultura, avaliações econômicas da implementação de biodigestores na suinocultura, assim como os resultados do levantamento bibliográfico explicado na seção 2.1. Com base nos conhecimentos oferecidos pelos estudos, foi elaborada uma seção com as principais descobertas feitas pelos autores.

3.1. Cadeia Produtiva de Proteína Suína

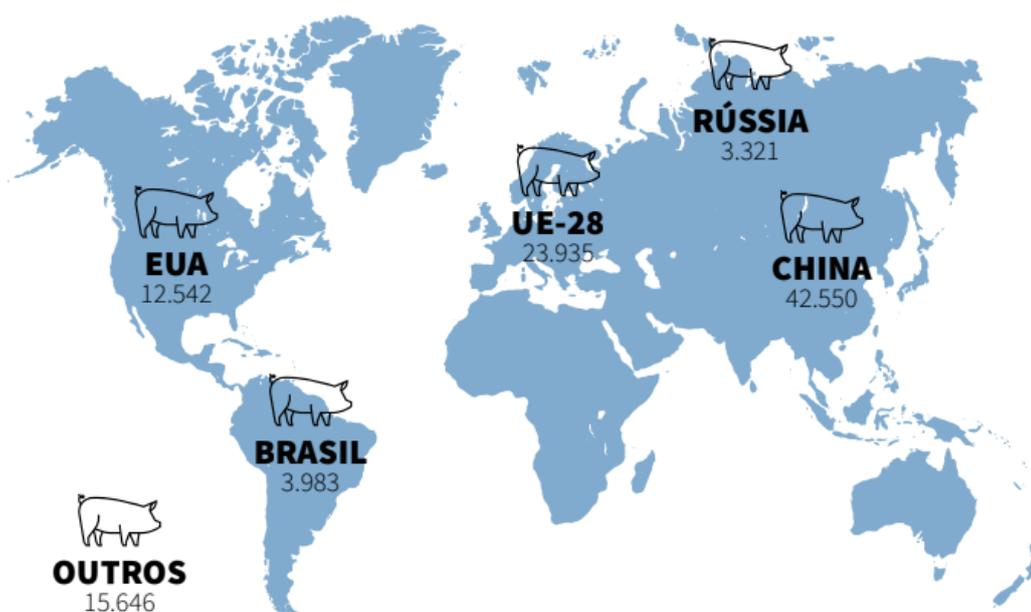
O Brasil é o quarto maior produtor mundial de carne suína; o país produziu 3,983 milhões de toneladas de carne suína em 2019, equivalentes a 3,91% da produção mundial (ABPA, 2020). A líder produtora de suínos é a China, com 42,550 milhões de toneladas, respondendo por 41,7% da produção mundial, seguida pela União Europeia com 23,5% e Estados Unidos com 12,3%, como indica a Figura 5 (ABPA, 2020). No Brasil, as maiores produções de suínos são na região sul (DIEL *et al.*, 2020), que responde por 68,7% da produção nacional (ABPA, 2020). No consumo da população brasileira, o consumo *per capita* anual de carne suína é de 15,3kg (ABPA, 2020).

A carne suína advém da suinocultura, que tem como objetivo produzir suínos vivos (REYES *et al.*, 2019); estes animais são então abatidos nos frigoríficos, processados e comercializados. A suinocultura é uma prática muito popular no Brasil, que vem se consolidando principalmente devido aos incentivos das cooperativas e ao fato de que permite produzir uma quantidade elevada de animais em pequenas áreas, possibilitando a realização de outras atividades dentro da mesma propriedade (EDWIGES *et al.*, 2012).

A suinocultura envolve a fabricação da ração, transporte, criação dos animais e manejo dos dejetos (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016). Após a gestação das porcas e o parto dos leitões, os animais são desmamados e seguem para as creches

até atingimento de um determinado peso, para então seguirem para a fase final de criação, as terminações (WANG *et al.*, 2016).

Figura 5 - Produção mundial de carne suína em mil toneladas
Produção 2019 **Total 101.977**



Fonte: ABPA, 2020

Para cada fase de vida do suíno há uma mistura de ingredientes mais apropriada para a ração (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016), sendo essa composição de suma importância para garantir um peso adequado para o animal com o menor tempo possível (REYES *et al.*, 2019). Assim, haverá um determinado tipo de ração para as porcas - matrizes, outra para os leitões e outra para as terminações (CHERUBINI *et al.*, 2015).

Na constituição da ração há algumas culturas tradicionalmente usadas: milho e trigo como fonte de energia e soja como fonte de proteína (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016); sendo que o milho e a soja respondem geralmente por mais de 80% da composição da ração (REYES *et al.*, 2019). Há também as rações comerciais, compostas por rações concentradas e pré-mistura vitamínica (WANG *et al.*, 2016).

Um importante índice usado na suinocultura é a taxa de conversão alimentar (FCR - *feed conversion ratio*), que aumenta com o decorrer da idade do animal (CONG; TERMANSEN, 2016).

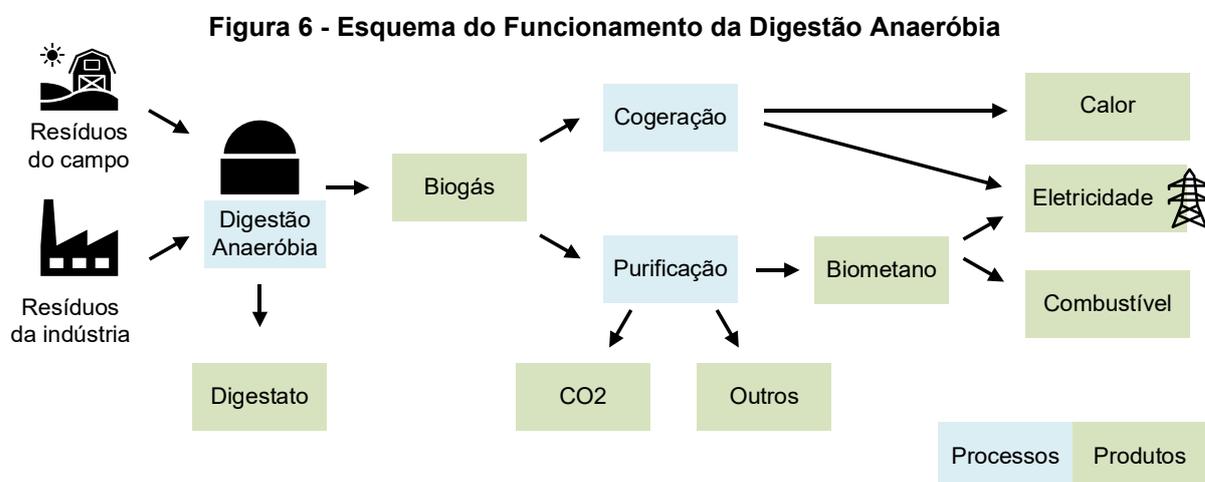
Entretanto, a produção de carne suína é um setor que vem sendo alvo de preocupações, já que envolve vários aspectos como elementos sociais, segurança alimentar, bem-estar animal, saúde, segurança dos trabalhadores, além, é claro, da parte ambiental (KAUFMANN, 2015).

3.2. Biogás

O biogás é um biocombustível inflamável e com alto conteúdo energético (ANTÔNIO; OLIVEIRA FILHO; SILVA, 2018) que resulta do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica, onde microrganismos metabolizam o substrato - resíduos orgânicos (LIJÓ *et al.*, 2014; CIRINO *et al.*, 2017) como esterco animal, culturas energéticas, resíduos florestais e industriais (VRIES *et al.*, 2012).

O biogás é composto por metano - aproximadamente 60% do biogás bruto -, dióxido de carbono e gases residuais (VRIES *et al.*, 2012; KAUFMANN, 2015); sua composição também irá variar de acordo com o tipo de substrato empregado, fatores climáticos e dimensões, impactando na produção, que além de depender da composição do biogás, também depende de condições de manutenção e operação (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010).

O processo de produção do biogás se inicia com a entrada do substrato no biodigestor, uma câmara fechada hermeticamente, onde ocorre a biodigestão, um processo de fermentação anaeróbia que tem como resultado o digestato e o biogás (CIRINO *et al.*, 2017) como pode ser visto na Figura 6.



Fonte: Adaptado de Bacenetti *et al.* (2016)

Para gerar energia é utilizado o metano do biogás como combustível no motor gerador – no lugar de por exemplo, gasolina (MARTINS; OLIVEIRA, 2011), gerando diferentes formas de energia, como eletricidade e calor, num processo conhecido como cogeração, que ocorre na unidade de calor e energia ou CHP (*combined heat and power*) (KAUFMANN, 2015). O poder calorífico do biogás varia entre 5.000 a 7.000 kcal/m³ devido a presença de metano, e pode chegar a 12.000 kcal/m³ ao eliminar o gás carbônico (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010).

Além da bioenergia poder ser transformada em calor e eletricidade (VRIES *et al.*, 2012) - 1 m³ de biogás equivale em média a 1,428 kWh (CIRINO *et al.*, 2017), ela ainda pode ser transformada em combustível através da purificação e compressão do biogás, que gera o biometano (KAUFMANN, 2015), uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, principalmente para os transportes (BACENETTI *et al.*, 2016). Nesse processo de purificação do biogás, além do biometano gerado, são liberados gases, como o dióxido de carbono (CO₂) (CI-BIOGÁS, 2015).

O restante da fermentação do digestor anaeróbio é conhecido como digestato, semelhante ao estrume não tratado; ele possui altas taxas de nitrogênio e fósforo, ou seja, (KAUFMANN, 2015), é rico em nutrientes (LIJÓ *et al.*, 2014), e pode ser utilizado como fertilizante orgânico na agricultura (VRIES *et al.*, 2012), substituindo a utilização de fertilizantes minerais (HAMELIN *et al.*, 2011). No estudo de Santos Lima e Miranda (2014) um produtor relatou que o digestato é melhor que os adubos tradicionais para pastagem.

O biogás apresenta alguns benefícios como a localidade – diminui a necessidade de importação de combustíveis fósseis -, aumento da segurança no abastecimento energético e gestão de resíduos sólidos (LIJÓ *et al.*, 2014). Um de seus principais benefícios é a redução das emissões de gases de efeito estufa, que ocorre devido a conversão da emissão de metano em dióxido de carbono nos processos de queima para geração de energia elétrica e calor (CHERUBINI *et al.*, 2015). Mesmo que ao queimar o metano para produção do biogás seja gerado o dióxido de carbono, no final, os benefícios ambientais ainda são maiores, pois os impactos do metano no efeito estufa são aproximadamente 21 vezes maiores do que os impactos do dióxido de carbono (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010). Outras vantagens da utilização do biogás são (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010; CIRINO *et al.*, 2017; SANTOS LIMA; MIRANDA, 2014):

- grande potencial de geração de energia

- aumento da gamificação da matriz energética
- geração de energia renovável
- comercialização de créditos de carbono
- matéria-prima de baixo custo - quando utilizado resíduos
- diminuição dos impactos ambientais - quando utilizado resíduos
- evita contaminação, doenças e pestes pelo descarte inadequado de resíduos
- controla a poluição das águas
- controla odores
- geração de digestato, fertilizante natural
- *marketing* positivo
- economia da malha energética - não precisa gastar milhões com passagem de postes, fios e manutenções.

Diante de tantos benefícios, cada vez mais órgãos públicos, bancos e investidores deveriam incentivar essa tecnologia, sendo este um obstáculo em muitos lugares: a falta de incentivos adequados (KAUFMANN, 2015; CIRINO *et al.*, 2017). Porém, há alguns pontos de atenção que devem ser melhor estruturados ainda, como por exemplo o desenvolvimento de uma assistência técnica mais capacitada para instalação e manutenção de biodigestores, garantindo ainda mais a viabilidade econômica de projetos com biodigestores (CIRINO *et al.*, 2017).

Na Europa há forte incentivo ao uso de biodigestores, havendo subsídios para sua implantação em países como Itália e Reino Unido, que chegaram a produzir em 2014 14,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo no continente. O principal país produtor de biogás é a Alemanha, com 8.726 usinas em 2014; na Itália havia 1.700 e na Áustria cerca de 400 usinas (BACENETTI *et al.*, 2016).

O biodigestor é visto como uma forma de geração de energia na Europa, tanto que há plantação de culturas para serem usadas no biodigestor - uma das principais culturas utilizadas é o milho, que apresenta um alto rendimento de matéria seca por hectare, e tem uma alta produção de metano (VRIES *et al.*, 2012). Porém, o uso de culturas energéticas como substrato pode levar a uma competição de terras entre a alimentação e produção de biogás (HAMELIN *et al.*, 2011).

Referente aos modelos de biodigestores existentes, os mais conhecidos são o Indiano, Chinês, Canadense (Lagoa Coberta), UASB (*Upflow Anaerobic Sludge*

Blanket Reactor) e CSTR (*Continued Stirred Tank Reactor*) (FREITAS et al.2019; NERES, RAMOS, MOURA, 2021;).

- Modelo Indiano: modelo de construção mais fácil em relação ao modelo chinês, com boa adaptação à variação climática; tem boa estabilidade da pressão de exaustão do biogás, porém possui um custo elevado.
- Modelo Chinês: é mais simples que o indiano, também mais barato, no entanto sua construção depende de técnica aprimorada e há dificuldade de adaptação em solos pedregosos ou encharcados para evitar rachaduras ou infiltrações.
- Modelo Lagoa Coberta: modelo com baixo custo na instalação e manutenção, interessante em para projetos agroindustriais e industriais, destacando-se entre os mais utilizados no Brasil.
- Modelo UASB: é o modelo mais utilizado no Brasil, com boa adaptação para a recepção de esgoto e efluentes industriais, é interessante pois pode receber resíduos urbanos e rurais.
- Modelo CSTR: predominante na Europa, possui um sistema que produz substrato concentrado em partículas menores, ou seja, é um biodigestor onde podem ser utilizados substratos com maior teor de sólidos, visto que tem um sistema próprio de agitação, o que acelera o processo de preparação e, por trabalhar de maneira contínua, há maior produção de biogás. Devido ao aprimoramento do mecanismo utilizado acaba sendo mais caro a instalação e manutenção.

Segundo dados da CI-Biogás (2020), no Brasil em 2019 havia 521 plantas de biogás em operação, onde 416 delas usavam como substrato materiais oriundos da Agropecuária, e 84% da aplicação da energia gerada no biogás era a eletricidade.

3.3. Avaliação do Ciclo de Vida

A sustentabilidade é um tema com grande tendência, que vem gerando inovações e novos negócios, isto porque, diante de tantos impactos que o ser humano causou no meio ambiente no decorrer dos anos devido a industrialização, crescimento populacional, consumo de recursos, geração de resíduos (CIRINO *et al.*, 2017), cada

vez mais ações precisam ser tomadas em prol do meio ambiente para redução dos problemas já existentes e prevenção do aparecimento de novos.

Segundo a Comissão Brundtland das Nações Unidas, que ocorreu em 1989, desenvolvimento sustentável é “atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” e aborda três aspectos: social, econômico e ambiental (KAUFMANN, 2015).

Ao analisar sistemas, geralmente dá-se prioridade a viabilidade econômica ou aceitação social, sendo, muitas vezes, o impacto ambiental deixado de lado; para isto, uma forma de se levar em consideração este pilar da sustentabilidade é através da Avaliação do Ciclo de Vida (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012).

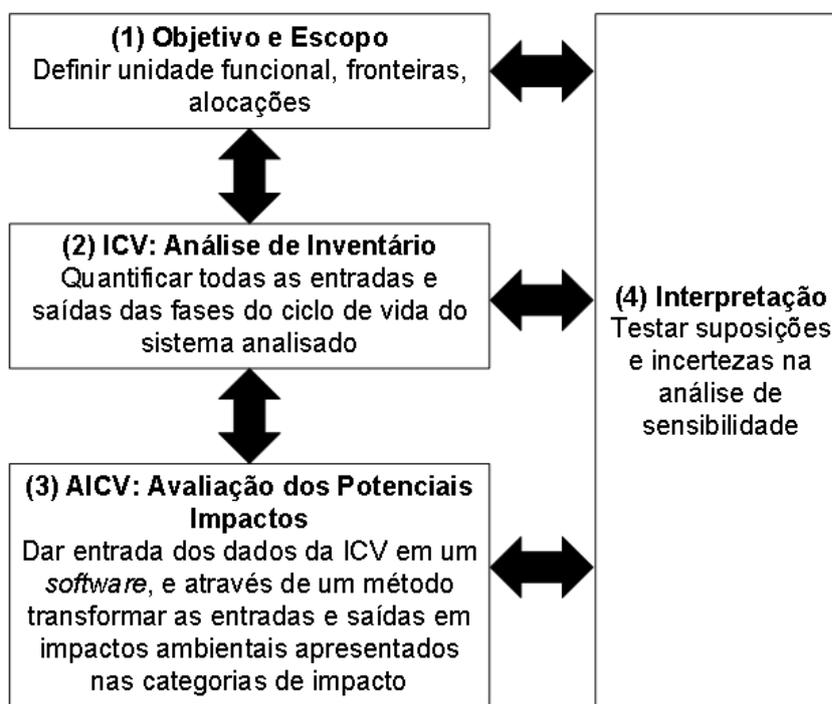
Os impactos ambientais são um dos fatores críticos para o desenvolvimento sustentável, sendo a pecuária uma das principais contribuintes para a geração de impactos ambientais ao redesenhar paisagens, reduzir ambientes naturais dos animais, degradar áreas e causar poluição (KAUFMANN, 2015).

A Avaliação do Ciclo de Vida, ou ACV, é uma técnica internacional e padronizada (VRIES *et al.*, 2012), que através da norma ISO 14040 avalia aspectos ambientais, assim como os potenciais impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida de um produto – do berço ao túmulo, ou seja, desde a produção de matéria-prima, até a disposição, levando em consideração também a produção e uso do produto (ABNT, 2009a).

Através da técnica é possível identificar quais são os poluentes e recursos consumidos em um processo ou produto (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012). A partir destas quantificações é possível identificar oportunidades para obtenção de ganhos ambientais e simular cenários, permitindo comparações entre eles (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012; LIJÓ *et al.*, 2014).

Há quatro etapas para a construção de uma ACV: (1) objetivo e escopo, onde são definidas todas as características do estudo, área de abrangência, período, o que e como é a avaliação; (2) ICV: inventário do ciclo de vida, onde é construído um inventário de todas as entradas e saídas relevantes do sistema; (3) AICV: avaliação dos potenciais impactos do ciclo de vida, onde os dados do ICV são aplicados nas categorias de potencial impacto, e por fim, (4) interpretação, onde há um teste de suposições e incertezas (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016), como pode ser melhor descrito através da Figura 7 (ABNT, 2009a).

Figura 7 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: Adaptado de ABNT, 2009a

A referência para qual todas as entradas e saídas do sistema na ACV são calculadas é a Unidade Funcional (LIJÓ *et al.*, 2014), que além de apresentar os dados quantitativamente, pode permitir comparações (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012).

Na fase 1 também são definidos os limites do sistema. Outra questão a ser definida na fase 1 é como serão realizadas as alocações, uma das fases mais críticas da ACV; este procedimento consiste em definir quais os fluxos de entrada e saída quando há mais de um produto gerado em um sistema; a ISO 14044 dá as orientações focando na não realização de alocações (LIJÓ *et al.*, 2014). Porém, Bacenetti *et al.* (2016), que fizeram uma revisão dos estudos da ACV envolvendo a digestão anaeróbia, mostraram que a maioria dos estudos fez alocação em relação ao digestato.

A fase do ICV - fase 2 – Inventário do Ciclo de Vida necessita de muitos esforços, pois há a necessidade de dados altamente confiáveis (LIJÓ *et al.*, 2014). Há os dados primários, que são verificados *in loco*, e os dados secundários, consultados em bases de dados. Para dados do processo de digestão anaeróbia, Bacenetti *et al.* (2016) recomenda o uso de dados secundários, já que a coleta de dados primários é

cara, perigosa e demorada, mas, para outras situações, como plantio e geração de dejetos, a recomendação são os dados primários.

Devido a quantidade de dados a serem processados em uma ACV, na fase (3), de AICV - Avaliação dos Potenciais Impactos do Ciclo de Vida os dados geralmente são colocados em *softwares* como GaBi, SimaPro, OpenLCA e Umberto NXT (SILVA *et al.*, 2019); o OpenLCA é um *software* gratuito e considerado de fácil aprendizagem (BOTTON; FOGAÇA, 2017).

Na AICV, após os dados serem colocados no *software*, o resultado da avaliação dos potenciais impactos do ciclo de vida é apresentado na forma de categorias de potencial impacto, havendo as categorias de ponto médio - categorias mais específicas - e as categorias de ponto final - resultados mais abrangentes, que geralmente englobam as categorias de ponto médio (BOTTON; FOGAÇA, 2017).

As principais preocupações da suinocultura estão relacionadas principalmente a potencial de mudanças climáticas, uso e degradação da terra e biodiversidade, representadas pelas categorias de potencial impacto de aquecimento global, acidificação e eutrofização (KAUFMANN, 2015).

O potencial de aquecimento global é uma medida de quanto os gases de efeito estufa absorvem radiação e emitem na forma de calor; é medido em função do tempo de vida que o CO₂ fica na atmosfera, devido a ser o GEE mais abundante (SOUZA FILHO, 2017). A eutrofização e acidificação são associadas à qualidade do ar, água e solo. A eutrofização é causada principalmente pela difusão de nutrientes como nitrogênio e fósforo em corpos aquáticos (REYES *et al.*, 2019), e causa a proliferação de algas azuis-esverdeadas; enquanto a acidificação causa chuva ácida e poluição atmosférica (KAUFMANN, 2015).

O conjunto pronto de categorias de potencial impacto a serem utilizadas compõe os métodos (ESNOUF *et al.*, 2018) disponíveis nos *softwares* escolhidos. Métodos como CML 2001 e TRACI usam categorias de ponto médio; já Eco-indicator 99 e EPS 2000 usam categorias de ponto final, enquanto ReCiPe 2008 e Impact 2002 combinam os dois tipos de categorias (BUENO *et al.*, 2016).

Ainda sobre a fase (3), ela é formada por três etapas: caracterização, normalização e ponderação (WANG *et al.*, 2016); onde cada método tem suas próprias abordagens de normalização e ponderação (BUENO *et al.*, 2016).

Na última fase da ACV, fase (4) Interpretação ocorre também a análise de sensibilidade, que simula cenários alternativos mudando algumas variáveis (LIJÓ *et al.*, 2014).

Uma das possibilidades que a ACV oferece são as comparações, que podem ser um desafio, já que cada estudo apresenta seu próprio escopo (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016; REYES *et al.*, 2019), por isso, harmonizações e definições de como conduzir uma ACV são cada vez mais necessárias (BACENETTI *et al.*, 2016). Além disso, dentro da suinocultura deve-se prestar atenção nas diferenças de manejo da produção, e outros itens como quantidade de fertilizantes (ZHOU *et al.*, 2018).

3.4. Potenciais Impactos Ambientais na Suinocultura

Ao analisar quais são as proteínas animais que mais impactam no meio ambiente conforme dados de literatura, a carne suína impacta potencialmente menos que a carne bovina e de cordeiro, porém mais que a carne de aves (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016; WIEDEMANN; MCGAHAN; MURPHY, 2016). Mesmo que o suíno gere 5,7 kg de CO₂ eq. por kg de carne, valor menor que a carne bovina - que está entre 22,2 e 25,4 kg de CO₂ eq. por kg de carne -, a carne suína ainda apresenta potenciais impactos ambientais (JACOBSEN *et al.*, 2013).

E esta acaba sendo uma das crescentes preocupações que os produtores de carne suína vêm passando: a sustentabilidade, tema com cada vez mais tendência, e que se torna um desafio ainda maior devido à crescente demanda por produtos de origem animal (KAUFMANN, 2015). Diante deste cenário, são necessárias práticas que garantam a agricultura sustentável, e, para isto, deve ser primeiramente entendido os impactos que a atividade gera no meio ambiente (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016).

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma técnica que tem sido muito utilizada na pecuária para avaliação dos potenciais impactos ambientais, e seus dados têm sido utilizados para tomada de decisão ao simular cenários e compará-los (CHERUBINI *et al.*, 2015).

A escolha na Unidade Funcional – UF – utilizada nos estudos de ACV é fundamental para apresentação dos resultados; no estudo de Basset-Mens e Werf (2005) foram utilizadas duas UF: 1 kg de carne e 1 ha de uso da terra, onde ao analisar

eutrofização e acidificação nos dois sistemas de produção: produção intensiva interna e agricultura orgânica. Ao usar UF de 1 kg, os resultados foram parecidos entre os sistemas, porém, ao utilizar unidade funcional de 1 ha, a agricultura orgânica teve os melhores resultados. A unidade funcional de 1kg de carne acaba sendo distorcida em baixas densidades (BASSET-MENS; WERF, 2005). Por isso, a importância de se definir corretamente a unidade funcional, e de se fazerem análises de sensibilidade e simulações.

Quando comparados os potenciais impactos ambientais gerados na fase agrícola da produção de carne suína com a produção de biogás, os maiores potenciais impactos estão relacionados a fase agrícola (HAMELIN *et al.*, 2012). Já em relação a cadeia da produção de carne suína, foi detectado em uma análise ponta a ponta da pegada de carbono através do método PAS2050 – desde a produção de ração até o frigorífico -, que a ração foi responsável por 63,4% do resultado, armazenamento de esterco 25,3% e fase de industrialização menos de 4% (JACOBSEN *et al.*, 2013).

Para Dalgaard, Halberg e Hermansen (2007) que analisaram a carne *in natura* produzida na Dinamarca e entregue no Reino Unido, a ração foi responsável pela maioria dos potenciais impactos, seguida pelos dejetos, e o transporte respondeu por apenas 1% do aquecimento global.

Já para Zhou *et al.* (2018), num estudo realizado na China em uma fazenda de grande escala, 55% da pegada de carbono analisada foi devido a produção de ração, 28% manejo de esterco, 13% consumo de energia e 4% fermentação entérica, sendo que, na produção da ração, 66% é devido ao plantio da safra, e os outros 34% transporte e processamento da ração, devido principalmente as longas distâncias de transporte e fertilização excessiva.

Num estudo de Nguyen *et al.* (2010) o preço do kg da carne suína era vendido a €1,40, porém o custo ambiental para sua produção era de €1,90 – valor calculado através do Método Stepwise 2006; entretanto, caso houvesse uma maior eficiência da alimentação e gestão de resíduos, este cenário poderia ser melhorado – e até equiparado.

Assim, percebeu-se que uma suinocultura mais sustentável depende principalmente de dois aspectos: eficiência alimentar e gestão de resíduos, isto porque, 60% dos gases de efeito estufa na produção da suinocultura provém da produção da ração, e 27% da gestão de dejetos (KAUFMANN, 2015).

3.4.1. Potenciais Impactos Ambientais da Alimentação dos Suínos

Como visto, a eficiência da alimentação dos animais é uma questão chave dentro do sistema produtivo de suínos, que também está ligada ao aspecto econômico, já que 60% dos custos da suinocultura são da ração para alimentação (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016). Na China, para grandes produtores essa porcentagem de custo é ainda maior, de aproximadamente 80%, já que há necessidade de compra de ração, enquanto pequenas propriedades há produção local, e os custos ficam em 60,1% (WANG *et al.*, 2016).

No estudo de Cherubini *et al.* (2015), que analisou os potenciais impactos ambientais causados para produção de carne suína - desde o plantio da matéria-prima para fazer ração, até o abate, contemplando toda a cadeia de produção – a ração foi responsável por 61,5% das emissões na categoria mudanças climáticas. As terras para plantação da ração consideradas neste estudo estão no Centro-Oeste brasileiro, sendo muitas destas terras com origem de desmatamento. O desmatamento teve um alto potencial impacto nos resultados, principalmente a plantação de milho e soja; as plantações responderam por 49% dos danos à biodiversidade e 45,8% da transformação natural do solo, com a soja respondendo por 83,5% dos resultados.

Já referente à outras categorias de potencial impacto, ainda analisadas por Cherubini *et al.* (2015), foi encontrado que 91,8% da acidificação terrestre é oriunda de emissões de amônia que provém principalmente das lavouras de milho (55,1%), aplicação de esterco no solo (19,7%) e alojamento de animais (18,3%).

Na eutrofização de água doce, o que mais teve potencial impacto foi a aplicação de esterco como fertilizante orgânico devido a lixiviação do fósforo (61,7%). Na eutrofização marinha os maiores potenciais impactos foram ocasionados pela presença de nitrato (76,3%) e amônia (21,3%) - a produção de grãos é a principal responsável pela emissão de 96% do nitrato e 59,3% da amônia (CHERUBINI *et al.*, 2015).

Nas questões energéticas, produção de ração foi a principal fonte, devido ao uso de fertilizantes artificiais (25%), transporte de grãos (26%) e desmatamento (9,5%) (CHERUBINI *et al.*, 2015). A ecotoxicidade terrestre foi causada principalmente pela aplicação de esterco no solo devido às emissões de cobre (61,5%) e zinco (19,9%) (CHERUBINI *et al.*, 2015).

Ou seja, baseado nos resultados de Cherubini *et al.* (2015) a produção do alimento do animal é um dos maiores causadores dos potenciais impactos ambientais, principalmente pelo fato de que as áreas ocupadas para plantação no estudado analisado – Brasil – foram desmatadas nos últimos 20 anos. Essa conversão de terras para plantação dos cereais que compõem a ração impacta tanto na biodiversidade como nas vegetações que antes ajudavam a sequestrar dióxido de carbono (KAUFMANN, 2015).

Kaufmann (2015) mostrou que ao diminuir 3% do consumo de proteína na ração, ao reestruturar a dieta do animal, mas sem prejudicar o crescimento, há redução em vários potenciais impactos ambientais, o que permitiria aumentar o consumo de carne em 10 kg por pessoa por ano e ainda reduzir a produção do nitrogênio em 3%. Isto reitera a importância de melhores taxas de conversão animal, sendo que, a conversão alimentar diminui com a idade do animal (CHERUBINI *et al.*, 2015).

Porém, mesmo sendo um dos principais problemas ambientais o plantio para fabricação de ração, as maiores atenções na sua produção são em relação aos aspectos nutricionais e econômicos, tanto devido à falta de ferramentas, como a falta de pressão pública; este cenário está começando a ser mudado com o desenvolvimento de iniciativas tanto por parte das universidades como por fabricantes e consultorias, como *softwares* com o foco ambiental como o AMINOFootprint 2.0. Este *software* calcula para cada etapa o potencial impacto ambiental causado ao produzir 1 tonelada de ração para suínos ou aves, e outros indicadores como conversão alimentar, permitindo simulações entre alimentação padrão e uma ecologicamente otimizada (KAUFMANN, 2015).

Importante ressaltar que a produção da ração colabora pouco para os potenciais impactos, sendo que o que realmente impacta são as matérias-primas que compõem a ração (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016).

Dentre as fases de vida do suíno, a fase de terminação se apresenta como a que causa mais potenciais impactos ambientais, devido a quantidade de ração consumida (JACOBSEN *et al.*, 2013), por isso a importância de melhorias na taxa de conversão alimentar com foco nessa fase.

A eficiência alimentar pode ser melhorada com o uso de aditivos, enzimas e aminoácidos, enquanto a gestão de resíduos pode ser otimizada com a digestão

anaeróbia, que além de contribuir ambientalmente também contribui economicamente, ao produzir energia (KAUFMANN, 2015).

3.4.2. Potenciais Impactos Ambientais dos Resíduos dos Suínos

Os resíduos suínos provêm tanto da fase industrial, mas principalmente da fase agrícola - suinocultura. Os dejetos suínos são os principais resíduos originados da suinocultura (LIJÓ *et al.*, 2014); devido a presença de nitrogênio e fósforo no excremento dos animais, a gestão desses resíduos se tornou uma preocupação (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016) e até mesmo um desafio frente ao que deve ser feito com esses resíduos (CHERUBINI *et al.*, 2015).

Os dejetos suínos contribuem para o aquecimento global através das emissões dos gases do efeito estufa (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012), além disso, excrementos mal administrados podem ter presença de medicamentos que tiveram baixa absorção pelos animais, levando ao escoamento de nitrogênio e fósforo, e acidificação da amônia, aumentando o potencial de lixiviação, que pode prejudicar os recursos hídricos (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016). Além disso, a suinocultura também gera um odor desagradável na localidade (CIRINO *et al.*, 2017).

O manejo desses resíduos está previsto em regulamentações que exigem essa gestão, e as formas mais comuns de destinação dos dejetos suínos são (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012; GUTIÉRREZ *et al.*, 2016):

1. Lagoa: é um processo que consiste na decomposição descontrolada da matéria orgânica. Tem alto potencial impacto ambiental, emitindo 6,1 kg de CH₄ por porco acabado, 0,8 kg de NH₃, além de possibilidades de vazamentos. Geralmente há baixa manutenção das lagoas, o que impacta em alta emissão de odores e baixa remoção de matéria orgânica (REYES *et al.*, 2019). Os efluentes líquidos são usados para fertirrigação e o lodo para fertilização (REYES *et al.*, 2019).
2. Espalhamento direto na terra: este tipo de destinação é em geral melhor do que armazenar na lagoa do ponto de vista ambiental, pois enquanto as emissões de metano na terra são insignificantes, nas lagoas são emitidos 6,1 kg por

animal acabado de metano, entretanto, as emissões de N_2O são maiores, porém, não tão significativas quanto às diferenças do metano.

3. Compostagem: na compostagem, após separação da fração sólida da líquida, ocorre o tratamento aerado do esterco de porco, onde há decomposição de parte da matéria orgânica, que então pode ser utilizado para fertilização; emite 2,1 kg de metano por animal acabado; as emissões de N_2O são insignificantes e comparáveis a aplicação direta na terra, assim como NH_3 .
4. Digestão anaeróbia: o esterco de porco é anaerobicamente degradado na lagoa, e com o uso de reatores de tanque agitado ou de fluxo em pistão é produzido o biogás, que evita a emissão de CH_4 para atmosfera.
5. Combustão: recupera grande parte da energia e reduz várias categorias de potenciais impactos ambientais. O fósforo e o potássio são retidos nas cinzas, que são recicladas como fertilizante. Inicialmente, devido à alta umidade do esterco de porco, de 70 a 90%, a combustão fica inviável, mas, após a separação da parte líquida da sólida, onde o teor de umidade fica em aproximadamente 46%, a combustão torna-se possível. Porém, é um método que requer altos investimentos, cooperação entre agricultores e distribuidores de eletricidade e não tem uma tecnologia para queimar esterco desenvolvida ainda.

Dentre estas opções, a digestão anaeróbia e combustão são as mais sustentáveis. Uma opção que não precisa de altos investimentos e que não impacta tanto o meio ambiente é o espalhamento direto no solo, porém, não tão viável, já que a demanda de fertilizantes não é constante durante o ano, precisando haver armazenamento, que então gera mais emissões. Cada uma destas formas de destinação irá impactar de diferentes formas dependendo do tipo de solo, precipitação, método de aplicação (espalhamento de faixa ou injeção), estação, temperatura, densidade microbiana do solo (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016).

Segundo Cherubini *et al.* (2015), relacionado a questões ambientais, o biodigestor é o que apresenta os melhores resultados para gestão de resíduos suínos em relação a outros sistemas de gestão de resíduos como tanque de lama aberto e compostagem - nas categorias de potencial mudança climática, eutrofização de água doce, demanda de energia cumulativa, ecotoxicidade terrestre, potencial de danos a

biodiversidade e transformação natural da terra, só não tendo os melhores resultados em acidificação terrestre e eutrofização marinha.

Ao comparar a destinação dos dejetos suínos através de uma ACV, os resíduos utilizados nos biodigestores apresentam uma redução de 117% na categoria mudança climática e 59% na categoria esgotamento de combustível fóssil em relação a um processamento de dejetos e aplicação dos produtos como fertilizantes (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012). Isto ocorre devido principalmente à geração e utilização de energia renovável (VRIES, GROENESTEIN; BOER, 2012).

Com o uso de digestão anaeróbia e da energia em uma CHP, as emissões podem ser reduzidas entre 60 a 64% segundo os estudos de Wiedemann, Mcgahan e Murphy (2016), e 76% segundo os estudos de Zhou *et al.* (2018). Além de gerar menos emissões, o esterco digerido ainda pode aumentar a quantidade de nitrogênio direto disponível para as plantas e reduzir a necessidade de fertilizantes (ZHOU *et al.*, 2018).

Ou seja, além de gerir os resíduos suínos - mitigando os impactos ambientais e diminuindo emissões de metano -, a digestão anaeróbica ainda traz os benefícios da produção de biogás, que além de gerar energia - diminuindo a dependência da utilização de combustíveis fósseis -, produz o digestato que pode ser usado como fertilizante (HAMELIN *et al.*, 2011; VRIES *et al.*, 2012; MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016).

Kaufmann (2015) traz o conceito de LEF: *Low Emission Farming*, ou Agricultura de Baixa Emissão, que incorpora em seus processos a biodigestão, diminuindo a pegada de carbono e emissão de gases do efeito estufa ao capturar e destruir grande parte do CH₄ dos dejetos e ainda gerar energia renovável.

Dentre os dejetos de animais que podem ser utilizados nos biodigestores os dejetos suínos são os que mais produzem biogás: a cada tonelada de substrato suíno são produzidos 560 m³ de biogás, como pode ser visto na Tabela 4 (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010).

O volume de dejetos produzido por animal irá depender do metabolismo do animal, de como é sua alimentação e como esses dejetos são geridos (MARTINS; OLIVEIRA, 2011), além disso, em dias de limpeza esses valores tendem a aumentar, devido a água utilizada para lavagem (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010). Na literatura são adotadas diversas quantidades de esterco e de biogás produzido por animal, mostradas no Quadro 8.

Tabela 4 - Estimativa de biogás gerado a partir de diferentes origens de substrato

Substrato com origem nos dejetos	Produção de biogás por tonelada de substrato (a partir do material seco)
Bovinos	270
Suínos	560
Equinos	260
Ovinos	250
Aves	285

Baseado em Cervi; Esperancini; Bueno, 2010

Quadro 8 - Quantidade de Esterco e Biogás gerados na Suinocultura

Autores	Esterco	Biogás
Reyes <i>et al.</i> , 2019	5% do peso do animal, sendo 20% sólidos voláteis	0,35 m ³ de biogás/kg de sólido volátil
Martins; Oliveira, 2011	0,005 m ³ por animal na terminação	-
Cervi; Esperancini; Bueno, 2010	0,0061 m ³ /animal na terminação	0,799 m ³ /animal/dia na terminação e 0,933 m ³ /animal/dia para porca reprodutora criando leitões
Cirino <i>et al.</i> , 2017	-	0,0833 m ³ /kg de dejetos suíno
Sousa <i>et al.</i> , 2020	0,08 m ³ / (matriz + animais que ela gera)	0,799 m ³ /animal/dia
Edwiges <i>et al.</i> , 2012	2.278 m ³ /ano para 520 animais	33.310 m ³ /ano para 520 animais
Antônio; Oliveira Filho; Silva, 2018	0,0086 m ³ /animal	-
Meinen; Kephart; Graves, 2014	-	13,21 m ³ /1000 litros de estrume
Gutiérrez <i>et al.</i> , 2016	-	18,3 m ³ /animal

Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo Diel *et al.* (2020) para atingir os níveis adequados de biogás são necessários os dejetos de ao menos 500 animais.

Embora o biodigestor tenha muitas vantagens, a destinação mais comum dos dejetos suínos são as lagoas, que emitem metano, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio; isso porque enquanto a produção de suínos é vista como algo comercial, e o manejo dos dejetos é algo não comercial (GUTIÉRREZ *et al.*, 2016).

Entre os autores analisados, Reyes *et al.* (2019) foram os únicos que apresentaram os maiores potenciais impactos para a fase de produção de suínos, não sendo a produção de ração. Entre as suas definições, consideraram a fermentação entérica e como tratamento de dejetos a lagoa, sem uma barreira física para a terra.

Por fim, apesar da literatura apresentar diferentes estudos e indicações aqui abordadas, é importante ressaltar que a cadeia de suinocultura apresenta diferentes condições e variáveis, tais como condição genética, oferta de insumos e formas para alimentação de animais, formas de manejo e criação de animais, manejo de dejetos, clima etc. que podem não permitir a generalização de dados e afirmações conclusivas para diferentes sistemas de produção.

3.4.3. Outros Potenciais Impactos Ambientais da Produção de Suínos

A fermentação entérica também gera impactos ambientais, emitindo cerca de 1,5 kg de metano por suíno por ano, 95,7 kg de CO₂ eq. na fase de terminação e 31,4kg de CO₂ eq. na fase de criação de leitões, por tonelada de carcaça suína (CHERUBINI *et al.*, 2015).

Em grande parte dos estudos não é considerado o metabolismo do animal no cálculo; porém, Gutiérrez *et al.* (2016) mostraram que quando o metabolismo é considerado, há emissões de 8,4 kg de CO₂ eq. por quilo de peso vivo na categoria de potencial de aquecimento global, e caso não fosse incluído o metabolismo no cálculo, o potencial impacto seria de 3,5 kg de CO₂ eq. - valores médios de outros estudos que não consideraram o metabolismo ficou entre 1,3 kg e 6,4 kg CO₂ eq.

A localização da produção de suínos não tem tantos potenciais impactos ambientais, já que o transporte representou menos de 8% nas categorias de potencial impacto em uma viagem da África do Sul até a Europa (DEVERS; KLEYNHANS; MATHIJS, 2012), porém, McAuliffe, Chapman e Sage (2016) ao analisarem a composição da ração vinda de longas distâncias, mostraram que há potenciais impactos a níveis globais.

No estudo de Werf, Petite e Sanders (2015), uma ACV realizada na França até a parte de campo da produção suína, a localização do plantio das culturas usadas na ração teve papel fundamental nos resultados dos potenciais impactos ambientais

ao comparar sistemas que usam plantios da França com plantios no Brasil – que aumentam os potenciais impactos ainda mais ao considerar áreas de desmatamento.

Para construção da ACV, itens como limpeza e remédios são considerados insignificantes para o resultado, podendo não serem levados em consideração para o cálculo (REYES *et al.*, 2019). Nos estudos de Gutiérrez *et al.* (2016) não foram considerados produtos de limpeza, remédios - não consideraram relevantes - e nem infraestrutura.

3.4.4. Resultados da Pesquisa (i)

O Quadro 9 mostra a relação do conteúdo dos artigos selecionados para a pesquisa (i) - estudos selecionados através do método descrito na seção 2.3 -, onde os estudos selecionados fizeram uma ACV da cadeia suína que tem biodigestores em seu processo.

Quadro 9 - Conteúdo dos artigos da pesquisa (i)

Autores	O que fizeram
Cherubini <i>et al.</i> , 2015	ACV do suíno comparando 4 tipos de manejo de dejetos
Cong e Termansen, 2016	ACV e análise de custo-benefício da produção de ração para suínos em dois sistemas de alimentação, um deles contendo concentrado proteico.
Gutiérrez <i>et al.</i> , 2016	ACV nas fazendas de suínos em Cuba e busca por melhorias
Kaufmann, 2015	Comparação entre os teores de proteína da ração na China
McAuliffe, Chapman e Sage, 2016	Revisão do estado da arte para produção de ração, criação de animais e gestão de resíduos
Reyes <i>et al.</i> , 2019	ACV de 3 tipos de fazendas suínas e proposição de melhorias
Wang <i>et al.</i> , 2016	Comparação ambiental, econômica e de recursos de 4 modelos de produção de suínos com diferentes escalas ECA - análise econômica
Wiedemann, McGahan e Murphy, 2016	ACV de seis cadeias de suínos para determinar emissões e como mitigar isso através dos dejetos
Zhou <i>et al.</i> , 2018	ACV de uma fazenda de grande escala para quantificar as emissões de cada setor da produção

Fonte: Autoria própria (2022)

Quanto às fronteiras dos estudos, apenas Cherubini *et al.* (2015) e Wiedemann, McGahan e Murphy (2016) analisaram desde a matéria-prima utilizada para fazer ração até o abate para o primeiro estudo, e até o ponto comercial para o segundo estudo; os demais sete estudos analisaram desde a matéria-prima para ração até a produção do animal vivo prestes a ser entregue para o frigorífico.

Para cada estudo foram relacionadas as unidades funcionais utilizadas, presentes no Quadro 10, onde é possível perceber que todas foram relacionadas ao animal.

Quadro 10 - Unidades funcionais dos estudos da pesquisa (i)

Autores	Unidade Funcional
Cherubini <i>et al.</i> , 2015	1000 kg de carcaça suína
Cong e Termansen, 2016	1000 kg de carne suína
Gutiérrez <i>et al.</i> , 2016	1 porco acabado de 120 kg
Reyes <i>et al.</i> , 2019	1 unidade pecuária suína de 50kg
Wiedemann, McGahan e Murphy, 2016	1 kg de animal vivo e 1 kg de carne de porco no atacado
Zhou <i>et al.</i> , 2018	1 kg de animal vivo

Fonte: Autoria própria (2022)

Como visto, não há um consenso sobre qual deve ser a unidade funcional a ser utilizada, devendo ser avaliada pelo pesquisador.

Na Tabela 5 são trazidas quais as unidades funcionais utilizadas para a realização da ACV.

Tabela 5 – Categorias de Impactos Avaliadas nas Pesquisas

Categorias de Impacto Avaliadas	Reyes <i>et al.</i> , 2019	Cherubini <i>et al.</i> , 2015	Cong e Termansen, 2016	Kaufmann, 2015	McAuliffe, Chapman e Sage, 2016	Gutiérrez <i>et al.</i> , 2016	Wang <i>et al.</i> , 2016	Wiedemann, McGahan e Murphy, 2016	Zhou <i>et al.</i> , 2018	TOTAL
Potencial de Aquecimento Global	x	x		x	x	x	x	x	x	8
Acidificação terrestre	x	x			x	x	x			5
Eutrofização	x	x			x	x	x			5
Toxicidade terrestre	x	x				x	x			4
Análise energética		x	x				x			3
Uso da terra		x	x					x		3
Toxicidade humana						x	x			2
Esgotamento de água							x			1
Dano potencial à biodiversidade		x								1
Emissões de N para água, ar			x							1
Depleção abiótica de combustível fóssil						x				1
Formação de foto-oxidante						x				1
Ecotoxicidade aquática de água doce							x			1
Pegada de Carbono									x	1

Fonte: Autoria própria (2022)

É possível perceber na Tabela 5 a predominância da categoria de impacto de potencial de aquecimento global, onde quase todos os estudos a utilizaram; apenas Cong e Termansen (2016) que não. As outras duas categorias mais utilizadas foram acidificação e eutrofização, seja de água doce ou marinha, seguida pela toxicidade terrestre. Há outras categorias que também foram utilizadas, porém, não com tanta frequência.

Quanto à base de dados utilizada, tanto Reys *et al.* (2019), como Wang *et al.* (2016) e Wiedemann, McGahan e Murphy (2016) utilizaram a Ecoinvent, e os outros estudos não apresentaram qual base de dados utilizaram. Em relação aos métodos utilizados, dois estudos utilizaram o ReCiPe: Reys *et al.* (2019) e Cherubini *et al.* (2015), e três utilizaram CML 2001 - Cherubini *et al.* (2015), Gutiérrez *et al.* (2016) e Wang *et al.* (2016). Por fim, em relação aos *softwares* utilizados, Reys *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2016) usaram o OpenLCA, e Cherubini *et al.* (2015) e Wiedemann, McGahan e Murphy (2016) utilizaram o SimaPro. Kaufmann *et al.* (2015) utilizou ainda um outro *software* para simulação de composição da ração.

Quanto aos países onde foram realizados os estudos de caso - não foi contabilizado McAuliffe, Chapman e Sage (2016) por ser uma revisão bibliográfica - houve predominância da China, com três estudos, e no Brasil houve apenas um estudo, como pode ser visualizado no Quadro 11.

Quadro 11 - Países onde foram realizadas as ACVs da pesquisa (i)

Autores	País
Cherubini <i>et al.</i> , 2015	Brasil
Cong e Termansen, 2016	Dinamarca
Gutiérrez <i>et al.</i> , 2016	Cuba
Kaufmann, 2015	China
McAuliffe, Chapman e Sage, 2016	Revisão Bibliográfica
Reyes <i>et al.</i> , 2019	Cuba
Wang <i>et al.</i> , 2016	China
Wiedemann, McGahan e Murphy, 2016	Austrália
Zhou <i>et al.</i> , 2018	China

Fonte: Autoria própria (2022)

Por fim, alguns estudos fizeram análise de sensibilidade, Cherubini *et al.* (2015) fez em relação às emissões de Nitrogênio; Cong e Termansen (2016) variaram a produtividade das porcas, os preços de produção na biorrefinaria (que produz a grama utilizada na composição da ração), diferentes prensagens para o suco da

grama e condições de solo diferentes. A análise de sensibilidade de Zhou *et al.* (2018) foi feita em relação a quantidade de fertilizantes, distâncias percorridas e taxa de excreção do nitrogênio.

3.5. Avaliação Econômica

Através da viabilidade econômica é possível visualizar projeções a respeito de um projeto, observando seus números e fornecendo informações que embasam a tomada de decisão de investidores (DIEL *et al.*, 2020). O primeiro passo para uma análise de viabilidade econômica é identificar os valores de fluxo de caixa e depois calcular índices como VPL - valor presente líquido (CIRINO *et al.*, 2017).

Valor Presente Líquido, ou VPL, é uma forma de avaliar a viabilidade econômica do projeto (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010) ao somar, atualmente, os fluxos de caixa obtidos durante todo o período em que um projeto ocorre a uma taxa de juros pré-determinada. O VPL é calculado por meio da Equação (1) (MARTINS; OLIVEIRA, 2011; CIRINO *et al.*, 2017) - em R\$. É basicamente quanto os pagamentos futuros valeriam atualmente mais o custo inicial (ANTÔNIO; OLIVEIRA FILHO; SILVA, 2018).

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

onde,

I = investimento inicial (R\$)

FC = fluxo de caixa (R\$), diferença entre as receitas anuais e custos anuais

i = taxa de desconto (%)

t = tempo de planejamento do projeto (anos)

n = vida útil do projeto (anos)

Caso retorne um valor positivo, o projeto é viável, indicando que o investimento foi recuperado (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010) e gerou riquezas (CIRINO *et al.*, 2017; ANTÔNIO; OLIVEIRA FILHO; SILVA, 2018).

3.6. Avaliação Econômica de Biodigestores na Suinocultura

Embora haja muitas vantagens para a utilização do biogás, como geração de energia, manejo de resíduos, benefícios ambientais, só isto não é o suficiente para motivar criadores de suínos a adotar a tecnologia (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010). Isto porque, para instalação de um biodigestor são necessários altos investimentos, por isso, sua viabilidade econômica precisa ser verificada antecipadamente (KAUFMANN, 2015), dimensionando de forma correta o projeto para que todo o biogás seja aproveitado (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010).

Num projeto de viabilidade de obtenção de energia elétrica através do biogás, a receita pode ser considerada o valor da energia deixado de pagar pelo produtor com a utilização de energia provinda do biogás (MARTINS; OLIVEIRA, 2011). Na análise de viabilidade econômica os custos anuais que compõem o fluxo de caixa são relacionados a manutenção do motor-gerador, do biodigestor e da operação - limpeza e zelo das instalações, e ignição do motor (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010).

A energia gerada através do biogás pode ser comercializada, ou utilizada no próprio sistema de produção, sendo que, no Brasil, os benefícios são maiores ao utilizar a energia em seu próprio sistema, já que a tarifa que a concessionária vende a energia é maior do que a tarifa que ela compra (MARTINS; OLIVEIRA, 2011). Além disso, há outro sistema que consiste no empréstimo de energia excedente gerada pelo biogás para o sistema elétrico, e quando necessário o sistema retorna a energia para o sistema - regulamentação n° 687 de 24/11/2015 (ANTÔNIO; OLIVEIRA FILHO; SILVA, 2018).

No estudo apresentado por Cirino *et al.* (2017), foi incluída a comercialização de créditos de carbono no projeto de viabilidade econômica, além dos benefícios de economia com energia elétrica. Para obtenção desses créditos houve um tempo médio de registro de 3 anos, válidos por 10 anos. Em 2017 os custos para certificação eram de R\$ 59.000,00, além disso, era pago mais R\$ 29.500,00 para o formulador do projeto e mais uma taxa para a ONU de 2% dos créditos de carbono. Para geração de 1 crédito de carbono eram necessários 110 m³ de biogás, que equivale a 1 ton de CO₂, onde cada tonelada foi avaliada em €\$10,04 no estudo.

Além da receita gerada com a geração de energia, comercialização de créditos de carbono, há a possibilidade de venda do biofertilizante, que foi avaliado pelo estudo referenciado em R\$ 0,26/kg, com uma produção de 50,88 kg de biofertilizante por matriz e os animais que ela gera (de SOUSA FILHO *et al.*, 2020). O custo de produção do biogás avaliado por Cirino *et al.* (2017) foi de R\$ 0,1854 /kWh.

O custo de instalação de um biodigestor foi calculado em R\$ 257,68 por matriz e os animais que ela gera (SOUSA *et al.*, 2020).

No estudo de Edwiges *et al.* (2012) foram avaliados dois cenários para implantação de um biodigestor, onde o primeiro cenário é uma instalação descentralizada, onde cada propriedade rural tem seu próprio biodigestor, enquanto o cenário 2 o biodigestor é centralizado, e um caminhão coleta os resíduos e leva para uma central onde várias propriedades fazem parte, deixando o digestato à disposição dos produtores rurais. Neste último seria necessário investidores. Para o primeiro cenário houve viabilidade econômica, enquanto para o segundo não.

Nos estudos de projeto de viabilidade econômica de Antônio, Oliveira Filho e Silva (2018) também foram feitas análises de sensibilidade, variando 10% e 20% positivo e negativo para custos de eletricidade e 20% e 40% positivo e negativo para custos de equipamentos. Em ambos os cenários extremos o projeto deixou de ser viável, enquanto nas outras três situações apresentaram viabilidade.

Mesmo que no Brasil já haja geração de eletricidade obtida a partir de energia renovável, como é o caso das hidrelétricas, ainda há alguns fatores que fazem com que a tarifa energética se torne mais cara, como em períodos de seca, viabilizando ainda mais o uso de outras fontes de geração de energia como o biogás (ANTÔNIO; OLIVEIRA FILHO; SILVA, 2018). O Brasil tem forte potencial para a instalação de biodigestores, principalmente na área rural, porém, ainda há carência de investimentos (DIEL *et al.*, 2020).

Importante ressaltar que embora o interesse econômico seja a principal força motriz para a maioria das atividades feitas pelos seres humanos, principalmente a curto prazo, a sociedade deve começar a se preocupar a longo prazo, onde pode haver várias consequências ambientais (WANG *et al.*, 2016).

3.6.1. Resultados da Pesquisa (ii)

No Quadro 12 estão descritos os estudos selecionados na pesquisa (ii), seleção descrita na seção 2.3 - e que fazem relação com projetos de viabilidade econômica para utilização de biodigestores na suinocultura.

Quadro 12 - Conteúdo dos artigos da pesquisa (ii)

Autores	O que fizeram
Antônio, Oliveira Filho e Silva, 2018	Analisar viabilidade econômica e análise de sensibilidade da geração de energia com o uso de dejetos suínos com o biogás
Cervi, Esperancini, Bueno, 2010	Viabilidade econômica para gerar energia a partir do biogás com a utilização de dejetos suínos
Cirino <i>et al.</i> , 2017	Viabilidade econômica para gerar energia a partir do biogás com a utilização de dejetos suínos e análise de risco
Diel <i>et al.</i> , 2020	Analisar viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos suínos
Edwiges <i>et al.</i> , 2012	Avaliar o potencial de uso energético advindo do uso de resíduo animal e comparar a viabilidade econômica entre 2 cenários de gestão de resíduos
Martins e Oliveira, 2011	Estruturar um projeto para tornar viável a geração de energia elétrica com o uso do biogás a partir da necessidade energética
Meinen, Kephart, Graves, 2014	Fazer um sistema de deposição de esterco para biodigestão e fazer análise de viabilidade disso
Santos Lima e Miranda, 2014	Analisar a viabilidade econômica da implantação de uma unidade geradora de energia elétrica com os biodigestores já instalados
Sousa <i>et al.</i> , 2020	Analisar o retorno do investimento de diferentes formas de tratamento em 37 granjas suínas de ciclo completo

Fonte: Autoria própria (2022)

No Quadro 13 é apresentado os dados sobre os estudos, como local onde aconteceu o estudo, se o projeto foi aceito ou não, ou seja, sua viabilidade, qual foi a TIR utilizada, assim como a taxa de juros, o tempo de vida útil do biodigestor - tempo de projeto e o *payback* descontado.

Quadro 13 - Dados sobre os estudos da pesquisa (ii) - local, viabilidade, taxas e tempos

Autores	Local	Viabilidade	TIR	Taxa de juros	Tempo de projeto	Payback descontado
Antônio, Oliveira Filho e Silva, 2018	Minas Gerais	Aceito	12,32%	6,50%	11,66 anos	8,2 anos
Cervi, Esperancini, Bueno, 2010	São Paulo	Aceito com restrições	9,34%	5,64%	10 anos	-
Cirino <i>et al.</i> , 2017	Minas Gerais	Aceito	23,50%	12% taxa financiamento e 7,2297% poupança	15 anos	6 anos, 3 meses e 25 dias
Diel <i>et al.</i> , 2020	Rio Grande do Sul	Aceito	26%	9,50%	10 anos	6 anos e 3 meses
Edwiges <i>et al.</i> , 2012	Paraná	Aceito para cenário 1	31% e 14%	15%	10 anos	3 anos
Martins e Oliveira, 2011	Santa Catarina	Aceito	-	6,46%	8 anos	-
Meinen, Kephart, Graves, 2014	Estados Unidos	Aceito com investidores	-	-	8 anos	-
Santos Lima e Miranda, 2014	Minas Gerais	Aceito	-	2,50%	10 anos	-
Sousa <i>et al.</i> , 2020	São Paulo	Aceito	6,11%	-	20 anos	11,4 anos

Fonte: Autoria própria (2022)

No estudo de Antônio, Oliveira Filho e Silva (2018) foram considerados 11,66 anos de vida útil do biodigestor devido ao fato de haver empréstimo da energia

excedente para a rede de energia elétrica quando produzida energia em excedente, e retorno desse empréstimo ocasionalmente, permitindo que o biodigestor fique parado por algum tempo, aumentando sua vida útil de 10 anos para 11,66 anos.

Essa predominância de estudos brasileiros se deve provavelmente ao fato de que em outros lugares além de utilizar diferentes substratos, há a utilização da codigestão, ou seja, mais de um tipo de substrato. Além disso, o foco pode não ser a destinação de resíduos, como foi o caso desta pesquisa, mas sim a geração de energia, já que na Europa por exemplo, há produção de culturas para fins de produção do biogás. Os estudos apresentados pelos brasileiros também têm como característica a análise da viabilidade da geração de eletricidade, enquanto estudos de outros países já analisam a viabilidade de melhorias ou novas formas no processo de biodigestão. As condições econômicas e mercadológicas da época em que cada estudo foi realizado também influenciam nos resultados econômicos e não se recomenda generalizações conclusivas devido às especificidades de cada projeto, mercado e região.

O Quadro 14 apresenta mais informações da avaliação econômica dos projetos dos estudos selecionados, como VPL, investimento inicial, benefícios e custos anuais, além do quanto foi considerado de custo de manutenção. Já o Quadro 15 mostra dados mais relacionados as propriedades, como quantidade de animais, volume do biodigestor, tarifa considerada, produção e consumo de biogás, e por fim, consumo e produção de energia.

Quadro 14 - Dados sobre os estudos da pesquisa (ii) - avaliação econômica

Autores	VPL (R\$)	Investimento Inicial (R\$)	Benefícios (R\$)	Custo Anual (R\$)	Custo de manutenção
Antônio, Oliveira Filho e Silva, 2018	173.325,51	504.061,00	497.047,28	45.045,53	R\$ 3,19/h
Cervi, Esperancini, Bueno, 2010	9.494,90	51.537,17	18.250,05	11.465,37	-
Cirino <i>et al.</i> , 2017	1.203.309,26	553.542,71	1.189.448,83	9.200,00	-
Diel <i>et al.</i> , 2020	117.247,41	168.500,00	-	-	-
Edwiges <i>et al.</i> , 2012	313.741,67	467.520,00	303.630,00	147.962,00	10% custo de operação
Martins e Oliveira, 2011	53.398,00	97.000,00	-	24.908,00	2,5% do valor inicial
Santos Lima e Miranda, 2014	16.912,03	75.000,00	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 15 - Dados sobre os estudos da pesquisa (ii) - propriedade e biodigestor

Autores	Quantidade de animais	Volume biodigestor	Tarifa - R\$ / kWh	Produção de biogás	Consumo de biogás	Consumo de energia	Produção de energia
Antônio, Oliveira Filho e Silva, 2018	8.000	-	0,30677	1096,83 m ³ /dia	42 m ³ /h	953 kWh/dia	76,8 kWh
Cervi, Esperancini, Bueno, 2010	2.300	496 m ³	FPS: 0,165 FPU: 0,151 PS: 0,694 PU: 0,671	670.760,5 m ³ /ano	72.072 m ³ /ano	35 kWh/dia	-
Cirino <i>et al.</i> , 2017	15.000	-	0,68	-	-	-	383.040 kWh/ano
Diel <i>et al.</i> , 2020	4.790	680 l	-	-	-	-	-
Martins e Oliveira, 2011	4.167	625 m ³	0,20 e 0,23	-	-	-	-
Meinen, Kephart, Graves, 2014	-	807 m ³	-	-	-	-	842 MJ/dia
Santos Lima e Miranda, 2014	6.800	-	-	-	-	6099,59 kWh/mês	-
Sousa <i>et al.</i> , 2020	-	-	0,238	-	-	-	-

onde, FPS: horário fora de ponta no período seco; FPU: horário fora de ponta no período úmido; PS: horário de ponta no período seco; PU: horário de ponta no período úmido

Fonte: Autoria própria (2022)

3.7. Melhorias Propostas por outros Autores

Muitos dos estudos analisados trazem melhorias que foram encontradas, sendo estas melhorias trazidas nesta seção.

Uma forma de reduzir os impactos ambientais é através da composição da ração; num estudo no Japão, de Ogino *et al.* (2013), foi substituído o farelo de soja por uma dieta com baixa proteína e com aminoácidos, e então o animal, que antes ingeria 171 kg da proteína durante seu crescimento, passou a ingerir 140kg; já na engorda, antes era ingerido 140 kg, e então passou para 108kg. Essas mudanças diminuiriam 20% os potenciais impactos no aquecimento global, além de diminuir eutrofização e acidificação também. Uma outra forma que vem sendo abordada é a utilização de algas marinhas na ração, que diminui o consumo de soja (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016).

Na Dinamarca um produto enzimático utilizado para fabricação de ingredientes sintéticos ajudou a diminuir os potenciais impactos ambientais em 17%

no aquecimento global, 100% acidificação e 700% em eutrofização (NIELSEN; WENZEL, 2007).

Ao reduzir a proteína bruta na composição da ração, como a soja, e aumentar o uso de cereais ou aminoácidos sintéticos há uma redução da taxa de excreção dos animais e diminuição das emissões gasosas relacionadas ao nitrogênio durante o manejo de dejetos (ZHOU *et al.*, 2018).

A composição em geral das rações resulta em um alto teor de fósforo no esterco, isto porque 80% de fósforo está na forma de ácido fítico que é de difícil digestão para animais monogástricos como porcos; além disso, os porcos não conseguem utilizar aminoácidos essenciais de forma eficiente, resultando em alto teor de nitrogênio no esterco também (CONG; TERMANSEN, 2016). Para solucionar isso, parte dos cereais constituintes da ração podem ser substituídos por fonte de proteína alta, como por exemplo grama - as gramíneas gerenciam nutrientes de forma mais eficiente -, mesmo não sendo indicada para animais não ruminantes, depois de passar por uma planta de bio-refinaria verde, a grama é transformada em suco e torta de prensagem, ricos em proteínas, o que também diminui a dependência da soja. O uso dessa ração de capim diminuiu em 5,01% o custo médio da alimentação dos animais e a lixiviação de nitrogênio em 28,2%, além de economia de energia e uso da terra; porém, aumentou em 7% a emissão de nitrogênio no ar devido ao maior uso de fertilizantes para produção de capim. As barreiras deste sistema são o investimento nas plantas de bio-refinaria verde, e o menor preço da grama em comparação com os cereais, que não deixa atrativo converter o cultivo (CONG; TERMANSEN, 2016).

A presença de nitrogênio nos dejetos animais em excesso pode levar a um acúmulo de amônia, que pode inibir a formação de metano no processo de biodigestão; além disso, devido aos dejetos serem bem diluídos, há pouco carbono que degrada facilmente, o que também impacta no rendimento de metano (HAMELIN *et al.*, 2011). Para potencializar a produção, podem ser trabalhados com maiores biodigestores e tempo de permanência para compensar os baixos rendimentos de biogás, ou aumentar a quantidade de metano ao adicionar substratos com alto teor de carbono, como culturas energéticas (HAMELIN *et al.*, 2011).

Essa junção de matérias-primas no biodigestor é chamada de codigestão e dependendo de como as matérias-primas são colocadas para produção do biogás, pode haver aumento em até 10% do seu rendimento, já que uma matéria-prima pode compensar alguma deficiência da outra (LIJÓ *et al.*, 2014).

A monodigestão de esterco suíno apresenta um bom desempenho ambiental em relação ao armazenamento convencional, porém, a produção de bioenergia é baixa (VRIES *et al.*, 2012). Então, para obter o melhor cenário ambiental e de produção de biogás Vries *et al.* (2012) simularam cenários de mono e codigestão; seus resultados indicaram que a utilização de podas de grama com esterco suíno é a melhor combinação de matéria-prima para o biodigestor, já que diminui os potenciais impactos ambientais, mas aumenta a produção de bioenergia. A digestão do esterco animal reduz em 16 kg a emissão de CO₂, em relação à quando o esterco não é digerido; já o esterco em conjunto com a poda de grama reduz em 89 kg o CO₂; este último cenário também foi onde mais houve redução de acidificação terrestre (VRIES *et al.*, 2012). Já para otimização do rendimento do metano devem ser usados itens com gordura e que contenham amido, como farinha (KAUFMANN, 2015).

Outra forma de otimizar a geração de biogás é através da separação do conteúdo líquido do sólido dos dejetos, utilizando as pastas mais concentradas como substrato; numa comparação do desempenho ambiental de diferentes tecnologias de separação dos dejetos em lama feita por Hamelin *et al.* (2011) o sistema em que são feitas duas separações para então utilização de fertilizante apresentou os melhores resultados. Ainda há oportunidades de melhoria em relação ao armazenamento da lama devido a sua acidificação, e em relação as consequências no solo devido a diminuição de carbono ocasionada pela separação das lamas (HAMELIN *et al.*, 2011).

Relacionado ao melhor tipo de alojamento, foi encontrado que o alojamento de cama profunda (com palha, serragem cascas de arroz renovadas a cada lote) para as terminações produz 30% emissões do que o alojamento convencional (piso de ripas onde resíduos são descarregados e encaminhados a lagoas anaeróbias abertas) devido ao manejo de esterco; o sistema ao ar livre (porcos andam livremente e são fornecidos abrigos) apresentou os maiores potenciais impactos devido a menor eficiência de produção, aumentando a alimentação (WIEDEMANN; MCGAHAN; MURPHY, 2016). No geral, sistemas fechados de engorda apresentam melhor desempenho ambiental devido ao fato dos animais não excretarem diretamente no solo (MCAULIFFE; CHAPMAN; SAGE, 2016).

Já para Gutiérrez *et al.* (2016) as formas de buscar melhorias ambientais são: redução da concentração de metais pesados em fertilizantes, aumento da produção de ingredientes agrícolas locais, uso de ingredientes com menos impactos como trigo ao invés de milho, além de uma maior taxação de impostos naqueles itens que mais

contribuem para os impactos ambientais na formulação das rações, transformando itens com menos impactos mais em conta.

Por fim, na fase industrial, mesmo que tenha pouco impacto, as maiores emissões ocorrem devido às perdas produtivas de produto durante o processo, sendo este mais um caminho para melhorias (WIEDEMANN; MCGAHAN; MURPHY, 2016).

Os resultados apresentados por cada um desses estudos são específicos e de acordo com a realidade em que foram realizados, por isso, cada ação de melhoria sugerida deve ser analisada em seu real contexto, adequando apenas o que for interessante, levando em consideração o sistema de produção, mercado, região, tecnologias etc.

4 RESULTADOS

Essa seção do trabalho apresenta os resultados relacionados a avaliação ambiental e interpretações econômicas do estudo.

4.1. Caracterização da Cadeia Suína

A produção de suínos envolve um processo que mantém o material genético das linhagens; esse processo se inicia nas casas genéticas com os animais de linhagens puras; então, ao reproduzir, estes animais dão origem as bisavós, que iniciam o cruzamento gerando as avós - ambos os processos são realizados em grandes empresas ou casas genéticas. As avós darão origem às matrizes, que irão gerar os animais a serem abatidos, sendo estes últimos dois processos realizados por qualquer empresa (MORAES; CAPANEMA, 2012).

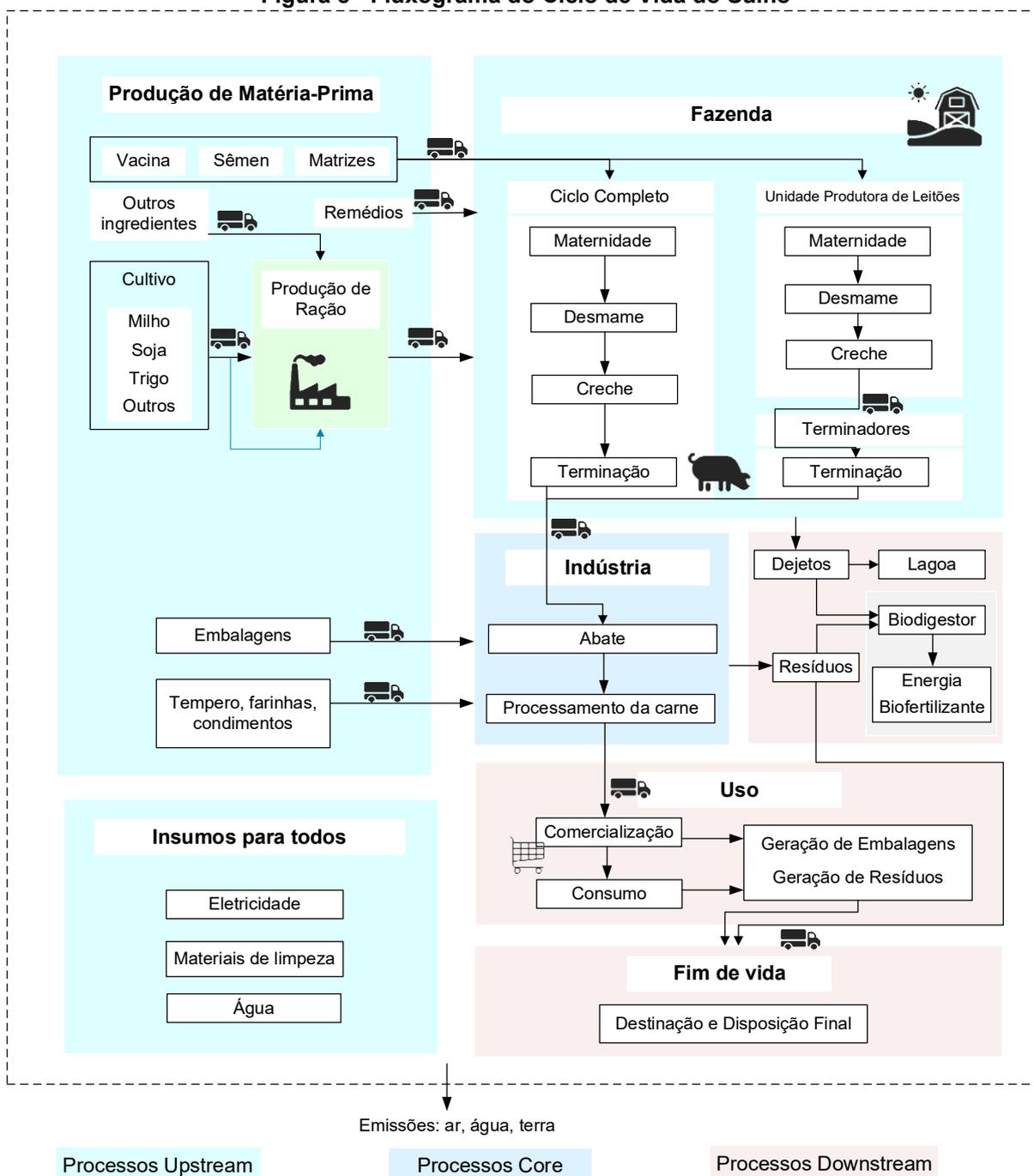
Esta pesquisa conta com os dados de uma organização que produz carne suína, localizada no estado do Paraná, Brasil, com uma produção que representa aproximadamente 10% da produção estadual (Fonte: informação construída com os dados fornecidos pela organização referentes ao ano de 2020). O fluxo da produção da carne suína da empresa estudada, desde a produção da ração que alimenta os animais até sua comercialização, é descrito através do fluxograma presente na Figura 8.

Para produção de um animal o processo começa com a produção dos constituintes da ração: a plantação da soja, trigo, milho, entre outros. Após a colheita dessas culturas e seu transporte, juntamente com alguns outros ingredientes, há o processamento e transformação destes itens na ração dos animais, que é transportada até as propriedades. Os animais ingerem água e rações, e para seu manejo são necessários materiais para limpeza como detergente, desinfetante, além de eletricidade – usada para aquecer animais no início de vida - e água; há a geração de dejetos.

O processo se inicia com o recebimento das matrizes, que então irão gerar os leitões para engorda. Há dois tipos de ciclos para reprodução das matrizes que as propriedades trabalham: (i) ciclo completo ou (ii) UPL (Unidade Produtora de Leite) + terminadores. No ciclo (i) há recebimento das matrizes e sêmen, e na propriedade

há a gestação, parto, desmame, creche, terminação. Já no ciclo (ii), a fase de gestação, parto, desmame e creche são realizadas na UPL, e então o animal segue para uma propriedade especializada em terminação. Como as vacinas não são aplicadas nos terminadores, elas são enviadas apenas a UPL e as granjas de ciclo completo, enquanto os remédios podem ser utilizados em qualquer fase do ciclo da vida do animal.

Figura 8 - Fluxograma do Ciclo de Vida do Suíno



Fonte: Autoria própria (2022)

Após a terminação, o animal é transportado para o abate no frigorífico. No frigorífico são gerados resíduos já que há partes do animal que não conseguem ser aproveitadas, como sangue, pelo, testículo, alguns ossos, destinando esses resíduos para a graxaria; após o abate a carne é processada, e pode ser comercializada *in natura* ou industrializada, constituindo produtos como presunto, mortadela, *bacon*, linguiça - que utilizam também outras matérias-primas como temperos, farinhas e condimentos. Na indústria também são utilizados produtos de limpeza, eletricidade – para geração de frio no ambiente e cozimento de produtos industrializados - e água - tanto para formulação dos produtos industrializados, como para limpeza. Após o produto pronto, são utilizadas embalagens primárias e secundárias, sendo as primárias aquelas geralmente de plástico, que envolvem o produto, e as secundárias as caixas onde os produtos prontos são alocados.

Após o produto pronto, estes são transportados até um armazém, e então seguem para o ponto comercial, sendo consumidos, e por algumas vezes, jogados fora.

Baseado na Figura 8 é possível determinar quais são os processos a montante, principais e a jusante (SILVA; MASONI, 2016):

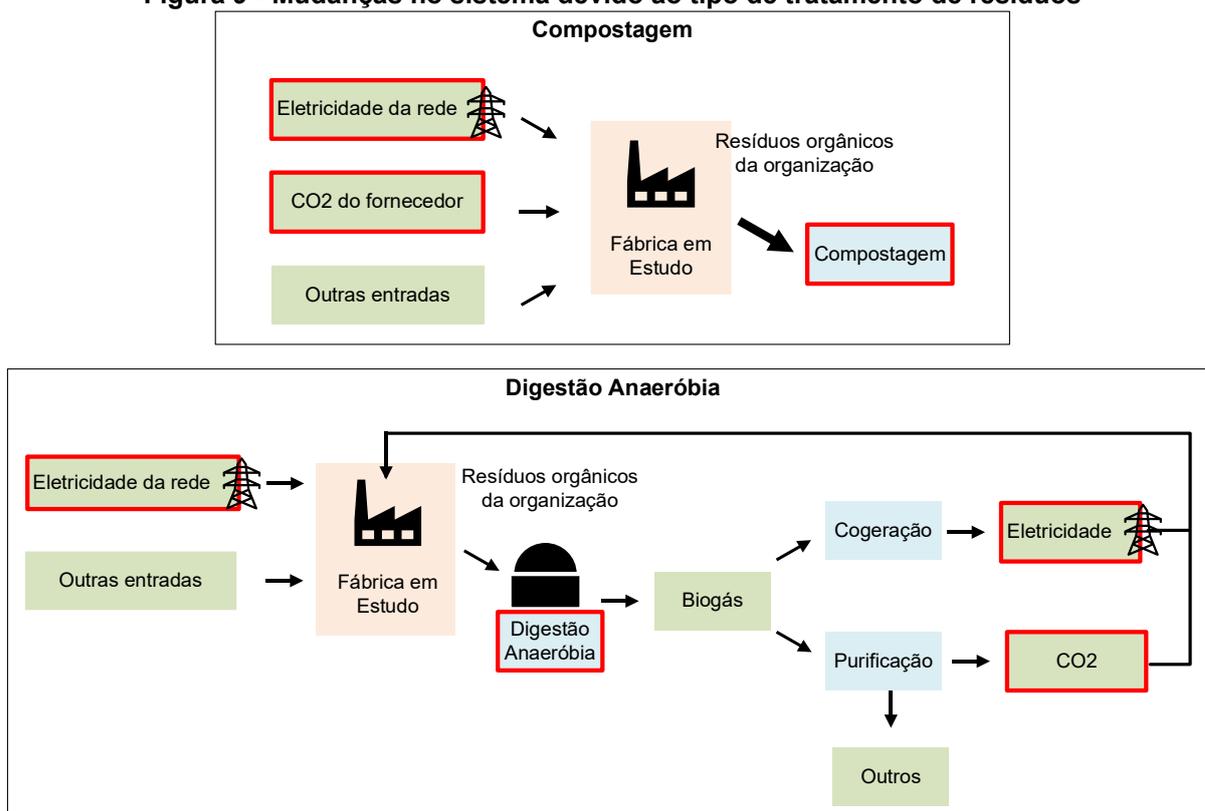
- Processos a montante – *upstream*, são os fluxos de extração e transporte dos recursos para manufatura
- Processos principais – *core*, ou seja, o processo referência, e
- Processos a jusante – *downstream*, são os fluxos de distribuição e uso do produto.

Todos esses processos têm um potencial impacto no meio ambiente, que pode ser avaliado através da ACV: avaliação do ciclo de vida.

4.2. Avaliação do Ciclo de Vida

Para avaliação do ciclo de vida e conseqüente cálculo dos potenciais impactos ambientais evitados com a aquisição do biodigestor, foram identificadas três situações em que ocorreriam mudanças, ressaltadas na Figura 9. Importante frisar que na Figura 9 só estão as entradas estritamente relacionadas ao sistema de estudo deste trabalho.

Figura 9 - Mudanças no sistema devido ao tipo de tratamento de resíduos



Fonte: Autoria própria (2022)

Uma das mudanças é a forma de destinação de resíduos da organização que a fábrica está inserida, que deixam de ir para a compostagem e passam a ir para o biodigestor. A segunda mudança é a redução da utilização da energia elétrica da rede, usando parte da energia que o biodigestor produz. Já a última mudança é a utilização do CO₂ produzido pelo biodigestor.

Nos frigoríficos de suínos são utilizados métodos de atordoamento para conferir insensibilização e diminuir o sofrimento do animal durante o seu abate, baseado nos requerimentos de bem-estar animal (VELARDE, 2022). Uma das tecnologias para essa insensibilização é através da injeção de CO₂, onde o animal entra em uma câmara hermeticamente fechada, e é injetado o gás para que o animal fique inconsciente e assim possa ser realizada a sangria (MARCON, 2017).

Uma das saídas do biodigestor é o CO₂; porém, para se ter esse gás, é necessário um sistema de purificação do biogás. No sistema estudado foi considerado um sistema de purificação realizado por uma terceira empresa, que então comercializa o gás com a organização estudada a preço de mercado. Portanto, economicamente sugere-se não haver diferenças para o projeto estudado, somente na questão dos

impactos ambientais evitados, já que o CO₂ não precisará ser transportado, evitando as cargas ambientais associados a esta operação. Haverá também uma diferença de emissões da forma como o CO₂ é produzido.

Após o levantamento de todas as entradas e saídas dentro das fronteiras definidas para o sistema estudado, e modelagem destes dados no OpenLCA, foi identificado quais os valores deveriam mudar do cenário Compostagem para o novo cenário, Biodigestor. Os fluxos necessários à mudança estão apresentados no Quadro 16. Os outros dados, que não estão apresentados, permaneceram iguais.

Quadro 16 - Mudanças de Dados entre os cenários Compostagem x Biodigestor

Mudança de Dados			
Mudança	O que mudou	Compostagem	Biodigestor
Destinação dos Resíduos	Troca dos Fluxos	Biowaste {RoW} treatment of biowaste, industrial composting Cut-off, S - Copied from Ecoinvent	Biowaste {RoW} treatment of biowaste by anaerobic digestion Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Utilização da Energia Elétrica (kWh)	Retirada da Eletricidade gerada pelo biodigestor (kWh)	Energia vinda da rede = Total de Energia	Energia vinda da rede = 67,12% do Total de Energia
Consumo de CO ₂	Produção de CO ₂ (kg)	Produção de CO ₂	0,00
	Retirada do frete do fornecedor de CO ₂ (t*km)	Transporte = Transporte Total	Transporte = 89,95% do Transporte Total

Fonte: Autoria própria (2022)

Foram simuladas as duas modelagens, e então comparados os seus cenários, a fim de identificar como a operação do biodigestor impacta nos potenciais impactos ambientais do sistema estudado. Neste estudo, o biodigestor está instalado na fase de industrialização, e o cálculo dos potenciais impactos ambientais foi concentrado nesta fase.

Os valores dos potenciais impactos ambientais e suas respectivas unidades para os dois sistemas – compostagem e biodigestor - estão presentes na Tabela 6, dado esse analisado em relação a 1kg de carne suína pronta para ser embalado.

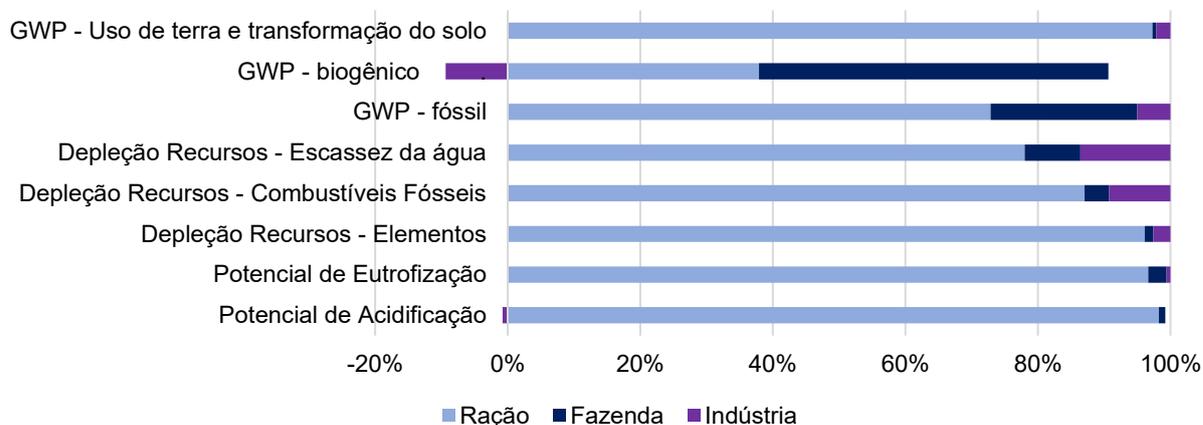
Na Tabela 6 é apresentado o quanto cada fase do ciclo de vida do produto - que está inserida dentro do escopo do estudo - contribuiu para os potenciais impactos ambientais. Na Tabela 6 também é apresentada a diferença entre os dois cenários, que mostra os impactos que o biodigestor trouxe ao sistema analisado, calculada através das mudanças apresentadas no Quadro 16.

Tabela 6 - Potenciais Impactos Ambientais em relação a Unidade Declarada de 1kg

Categoria de Impacto (Potencial)	Depleção dos recursos naturais					Mudanças climáticas (GWP)				
	Acidificação	Eutrofização	Elementos	Combustíveis fósseis	Escassez da água	Total	Fóssil	Biogênico	Uso e transformação do solo	
Unidade	(kg SO ₂ eq.)	(kg eq.)	(kg Sb eq.)	(MJ)	(m ³)	(kg CO ₂ eq.)	(kg CO ₂ eq.)	(kg CO ₂ eq.)	(kg CO ₂ eq.)	
Compostagem	Total	2,0E-2	1,6E-2	1,5E-5	1,4E+1	3,2E+0	2,9E+0	1,9E+0	6,7E-1	4,0E-1
	Ração	2,0E-2	1,5E-2	1,4E-5	1,2E+1	2,5E+0	2,1E+0	1,4E+0	3,1E-1	3,9E-1
	Fazenda	99,7%	96,7%	96,1%	87,0%	78,0%	70,3%	72,9%	46,6%	97,3%
	Indústria	2,0E-4	4,2E-4	1,9E-7	5,1E-1	2,7E-1	8,5E-1	4,1E-1	4,4E-1	2,4E-3
		1,0%	2,7%	1,3%	3,7%	8,4%	28,5%	22,1%	64,9%	0,6%
Biodigestor	Total	-1,6E-4	9,4E-5	3,8E-7	1,3E+0	4,4E-1	2,4E-2	9,3E-2	-7,8E-2	8,5E-3
	Ração	-0,8%	0,6%	2,6%	9,3%	13,6%	0,81%	5,0%	-11,5%	2,1%
	Fazenda	2,1E-2	1,6E-2	1,5E-5	1,4E+1	3,1E+0	2,9E+0	1,8E+0	6,6E-1	4,0E-1
	Indústria	2,0E-2	1,5E-2	1,4E-5	1,2E+1	2,5E+0	2,1E+0	1,4E+0	3,1E-1	3,9E-1
		95,9%	96,3%	96,2%	88,1%	80,9%	71,2%	73,8%	47,4%	97,9%
Diferença	Total	1,9E-4	4,2E-4	1,9E-7	5,0E-1	2,7E-1	8,5E-1	4,1E-1	4,4E-1	2,4E-3
	Ração	0,9%	2,7%	1,3%	3,7%	8,7%	29,3%	22,4%	65,8%	0,6%
	Fazenda	6,7E-4	1,7E-4	3,6E-7	1,1E+0	3,3E-1	-1,1E-2	7,0E-2	-8,7E-2	5,9E-3
	Indústria	3,2%	1,0%	2,5%	8,2%	10,4%	-0,4%	3,8%	-13,2%	1,5%
	Sistema	-8,3E-4	-7,2E-5	1,5E-8	1,7E-1	1,1E-1	3,5E-2	2,3E-2	9,8E-3	2,7E-3
	-4,1%	-0,5%	0,1%	1,2%	3,5%	1,2%	1,2%	1,4%	0,6%	

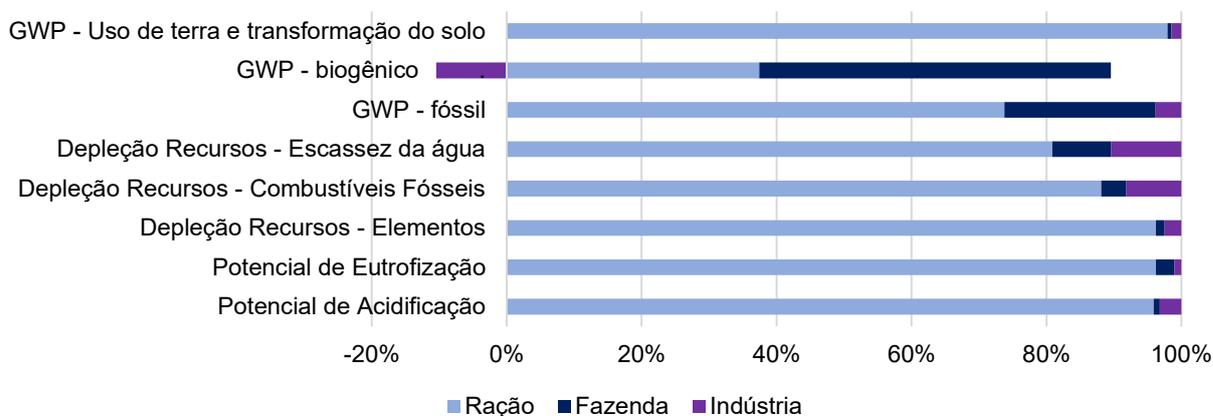
Fonte: Autoria própria (2022)

Nos Gráfico 2 e Gráfico 3 é possível ver a contribuição de cada fase do ciclo de vida: fabricação da ração, fazenda e indústria, para os dois cenários avaliados.

Gráfico 2 - Contribuições das fases do ciclo de vida para cada potencial impacto ambiental - Compostagem

Fonte: Autoria própria (2022)

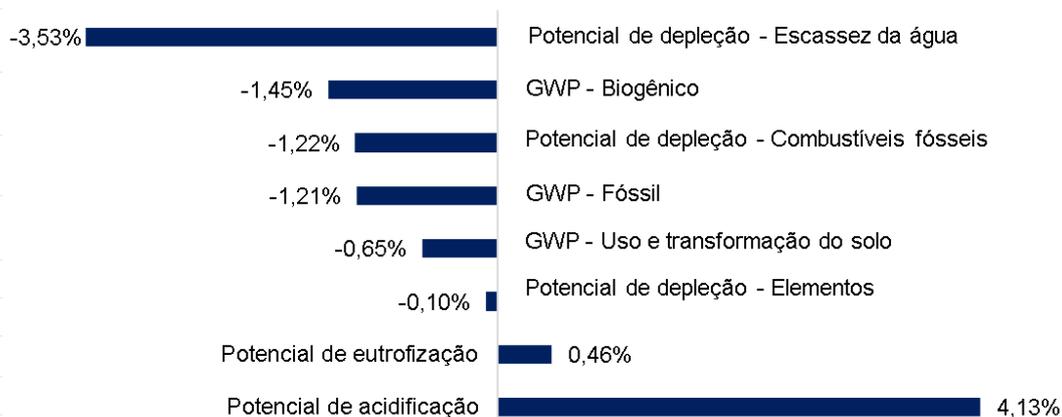
Gráfico 3 - Contribuições das fases do ciclo de vida para cada potencial impacto ambiental - Biodigestor



Fonte: Autoria própria (2022)

No Gráfico 4 é possível visualizar o quanto cada categoria de impacto aumentou ou diminuiu quando foi implementado o biodigestor, calculado a partir da diferença entre os cenários em relação ao sistema todo.

Gráfico 4 - Variação dos Potenciais Impactos Ambientais com a Implantação do Biodigestor para o Sistema Todo



Fonte: Autoria própria (2022)

Para quase todos os impactos ambientais, em ambos os cenários, a fase de fabricação da ração, que compreendeu desde a plantação da matéria-prima utilizada para fazer a ração, até a fabricação em uma unidade fabril, foi o que mais contribuiu. Isso é corroborado pelos autores que fizeram uma análise compreendendo fases similares deste estudo, Jacobsen *et al.* (2013) - que para a pegada de carbono também encontrou uma maior contribuição da fabricação da ração - e Cherubini *et al.* (2015) onde, em várias categorias de impacto por eles analisadas, e já discutidas na

seção 3.4.1, também houve predominância da fase da fabricação da ração para os maiores impactos.

Nas categorias de impacto de potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial de depleção de recursos naturais (elementos) e potencial de aquecimento global – representado por GWP do inglês *Global Warming Potencial* – (uso de terra e transformação do solo), a fase de fabricação da ração correspondeu por mais de 95% dos potenciais impactos ambientais.

Para as categorias de impacto de potencial de depleção de recursos naturais (combustíveis fósseis e escassez da água) e potencial de aquecimento global, (total e fóssil) ainda houve uma predominância da fase da fabricação da ração, com a responsabilidade do total dos potenciais impactos entre 70% e 90%.

A única categoria de impacto em que a fabricação de ração não foi a principal responsável pela geração dos potenciais impactos ambientais foi no potencial de aquecimento global (biogênico), onde a fase da fazenda, que representa a criação dos suínos, no cenário compostagem respondeu por 64,9% dos potenciais impactos, e a fase da fabricação da ração por 46,6%; no cenário biodigestão, para a mesma categoria de impacto, a fase da fazenda correspondeu a 65,8% dos impactos e a fase da fabricação da ração 47,3%.

A fase da industrialização da carne suína, que compreendeu o abate do animal e esposteamento, foi a menos responsável pelos potenciais impactos ambientais gerados; a categoria Escassez de água foi aquela que mais a indústria teve responsabilidade, com 13,6% no cenário compostagem e 10,4% no cenário biodigestor.

Na fase industrialização há índices que estão negativos. Isso porque, ao absorver os resíduos, o tratamento – tanto compostagem como biodigestão - evita que sejam gerados potenciais impactos para o ambiente, criando uma espécie de “crédito” ao sistema. Nas categorias potencial aquecimento global biogênico em ambos os cenários, e potencial de acidificação no cenário compostagem, esse valor evitado supera os potenciais impactos causados pelas outras atividades do sistema indústria - como a geração de energia advinda da rede e transporte e produção do CO₂ -, o que justifica seus valores negativos.

O potencial de acidificação foi a categoria de impacto que mais teve mudanças, passando de um valor de -0,00015942 kg SO₂ eq. com o uso da compostagem para, 0,00066978 kg SO₂ eq. por kg de produto na saída do frigorífico

com a implantação do biodigestor. Quando analisado o sistema todo estudado, o aumento foi de 4,13%.

Isso se deveu principalmente ao fluxo tratamento de resíduos, já que, conforme é apresentado na Tabela 7 - que mostra quais são as emissões consideradas no fluxo pelo OpenLCA, proveniente da base de dados da Ecoinvent v.3.7.1 - é possível observar que das principais emissões relatadas para o processo de compostagem, não há emissões para a água, uma das formas como é avaliada a acidificação, ao contrário do biodigestor, que emana várias emissões, ou seja, há fluxos para a água no *dataset* da Ecoinvent.

Tabela 7 - Emissões do Fluxo de Compostagem e Biodigestão da Ecoinvent v.3.7.1

	Unidade	Compostagem	Biodigestão
Emissões para o ar			
Amônia	kg	7,00E-04	0
Dióxido de carbono, não fóssil	kg	2,20E-01	2,10E-01
Monóxido de dinitrogênio	kg	2,50E-05	3,30E-05
Sulfeto de hidrogênio	kg	5,26E-04	8,96E-05
Metano, não fóssil	kg	1,00E-03	2,40E+01
Água	m ³	1,25E-04	0
Emissões para a água			
Íon amônio	kg	0	9,28E-08
Nitrato	kg	0	2,97E-06
Nitrito	kg	0	9,28E-08
Nitrogênio, orgânico ligado	kg	0	1,09E-07
Fósforo	kg	0	7,04E-08

Fonte: Zschokke-Gohl (2020a) e Zschokke-Gohl (2020b)

Além do potencial de acidificação, o potencial de eutrofização também apresentou melhores resultados no cenário da compostagem, onde apresentava um potencial de eutrofização de 0,00009391 kg PO_4^{3-} eq. e no cenário da biodigestão o valor passou a ser 0,00016561 kg PO_4^{3-} eq., tendo um aumento de 0,46% em relação a todo o sistema todo analisado; isso porque, como mostra o Quadro 5, a eutrofização também é influenciada por fluxos para o ambiente aquático.

Quando analisada a categoria de Potencial de Aquecimento Global, do inglês GWP, houve uma redução de 1,19% para o sistema todo, onde o valor deixou de ser 2,94 kg CO_2 eq. e passou a ser 2,91 kg CO_2 eq. para o sistema todo. Quando analisada a fase indústria, o valor deixou de ser 0,0238 kg CO_2 eq. por kg de produto e passou a ser -0,0112 kg CO_2 eq., ou seja, a pegada de carbono da implantação do biodigestor melhorou quase 150%. Como essa categoria é a soma do GWP fóssil, biogênico e

uso da terra e transformação do solo, essa diferença se deu principalmente pelo que aconteceu com cada uma dessas categorias.

Na categoria GWP uso da terra e transformação do solo houve melhoras de 0,65% com a implantação do biodigestor para o cenário todo, e de 30,97% em relação somente ao cenário da indústria, categoria essa que obteve a maior melhoria em relação ao sistema indústria. Os valores deixaram de ser 0,0085 kg CO₂ eq. e passaram a ser 0,0060 kg CO₂ eq. por kg de carne suína para a categoria de impacto com a implantação do biodigestor. Essa categoria foi impactada basicamente pela mudança da fonte energética, ou seja, o fluxo eletricidade que foi responsável pela mudança nos valores.

Sobre a categoria de GWP fóssil houve uma diminuição de 1,21% com o biodigestor em relação ao sistema analisado, onde, o valor deixou de ser 0,093 kg CO₂ eq. e passou a ser 0,070 kg CO₂ eq.; em relação ao cenário somente da indústria, o valor teve uma diminuição de 24,31%. Essa mudança ocorreu principalmente devido a dois fatores, ao tratamento de resíduos biodigestor que apresentou menores valores que o da compostagem, e a participação da energia advinda do biodigestor.

A categoria GWP biogênico diminuiu 1,45% com a implantação do biodigestor em relação ao sistema todo analisado, enquanto em relação ao sistema indústria houve uma diminuição de 12,59%; o valor deixou de ser -0,077 CO₂ eq. e passou a ser -0,087 CO₂ eq. Nesse caso, ambos os tratamentos de resíduos diminuíram os impactos gerados no sistema todo, ou seja, são valores negativos. Porém, no total, os impactos gerados pelo biodigestor são menores do que os gerados pela compostagem; isso se deve ao uso da energia produzida pelo biodigestor.

Já o potencial de depleção de recursos naturais – elementos, diminuiu 4,01% com a implantação do biodigestor em relação ao sistema indústria, e 0,10% em relação ao sistema todo, passando de 3,7E-07 kg Sb eq. para 3,6E-07 kg Sb eq. Embora nesse cenário o tratamento de resíduos compostagem traga benefícios a essa categoria de impacto, os benefícios gerados pela utilização da energia advinda do biodigestor - e não da rede -, se sobressaem, e garantem que no cenário com o biodigestor haja um resultado melhor.

Sobre o potencial de depleção de recursos naturais da parte de Combustíveis Fósseis, no novo cenário – implantação do biodigestor - houve uma diminuição de 1,22% em relação ao sistema todo, e uma diminuição de 13,17% em relação ao sistema indústria, onde o valor deixou de ser 1,28 MJ e passou a ser 1,11 MJ. Isso

ocorreu principalmente devido a energia que passou a vir do biodigestor e ao CO₂, que também passou a vir do biodigestor e deixou de ser produzido por uma fornecedora.

Por fim, a última categoria, que foi a que mais impactou positivamente com a implantação do biodigestor no sistema todo analisado, com redução de 3,53% foi a Escassez de água; nessa categoria em relação ao sistema indústria houve uma diminuição de 25,98% com o biodigestor. Isso se deu principalmente, e quase que exclusivamente a troca parcial das fontes da energia; o valor dessa categoria deixou de ser 0,439m³ e passou a ser 0,325m³.

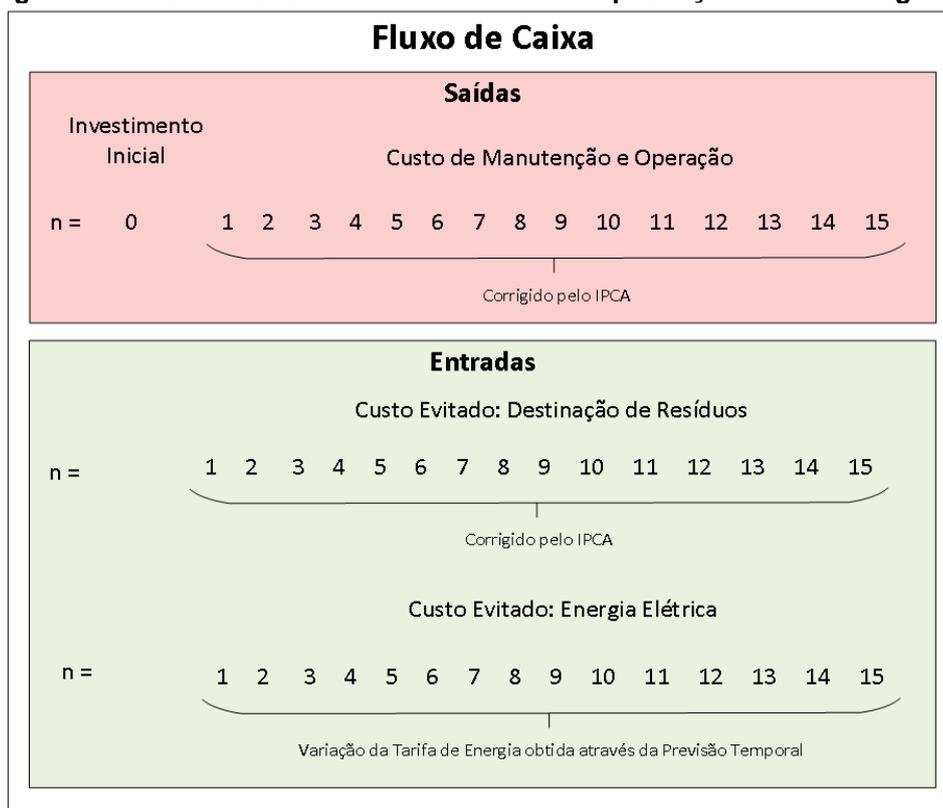
Com a implantação do biodigestor houve uma diminuição dos potenciais impactos ambientais no ciclo de vida da proteína suína - desde a fabricação da ração até o momento da embalagem no frigorífico - nas categorias de potencial de aquecimento global, que pode ser associada a pegada de carbono, e potencial de depleção de recursos, ou seja, no saldo há ganhos o ciclo de vida analisado. Isso é corroborado pelo estudo de Cherubini *et al.* (2015), onde para a digestão anaeróbia foram apresentados melhores resultados para potencial de mudança climática e potencial de danos a biodiversidade. Assim como no estudo de Cherubini *et al.* (2015) nas categorias de acidificação e eutrofização a biodigestão não obteve os melhores resultados (para Cherubini *et al.* (2015) esse foi o resultado para a eutrofização marinha).

Mesmo a fase da fabricação da ração sendo a maior responsável pelos potenciais impactos ambientais gerados, caso haja possibilidade de melhoria em alguma outra fase do ciclo de vida, ela deve ser buscada, como foi o caso da implantação do biodigestor nesta unidade fabril.

4.3. Avaliação de Influência Econômica

Para cálculos da Avaliação Econômica são necessários os valores dos custos - composto pelo investimento inicial e custos anuais -, e dos ganhos da operação, que nesse projeto são os custos evitados, representados na Figura 10, onde n corresponde ao período em questão, em anos.

Figura 10 - Fluxo de Caixa do investimento de implantação de um biodigestor



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a análise econômica não foram considerados os investimentos, custos de operação e custo evitado com o CO₂ gerado pelo processo de purificação da planta de biogás, uma vez que se modelou os dados considerando uma terceira empresa que purifica o biogás, extrai o CO₂ e o comercializa.

O Investimento Inicial ocorreu somente no período 0. Os custos de Manutenção e Operação são valores anuais calculados para um período de 15 anos, que são então corrigidos ao longo dos anos pelo índice inflacionário representado pelo IPCA; esses valores da inflação dos próximos anos foram obtidos do Relatório Focus (2022), onde há uma previsão da inflação para os próximos 3 anos; para os anos subsequentes foi fixado o último valor da previsão, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Previsão do IPCA

Ano	Previsão IPCA
2021	0,10420
2022	0,05090
2023	0,03400
2024 - 2035	0,03000

Fonte: Relatório Focus (2022)

Já para os valores de Gastos Evitados foram feitos dois cálculos: um para Destinação de Resíduos e outro para Energia Elétrica. O custo evitado de Destinação de Resíduos também foi corrigido anualmente pelo IPCA.

Os dados do custo evitado de Energia Elétrica foram obtidos a partir da tarifa energética presente no site da ANEEL (2021). Nesta planilha foram selecionados os valores através dos filtros descritos no Quadro 17, e selecionada a coluna de “Tarifa Média de Fornecimento com Impostos”.

Quadro 17 - Filtros Aplicados para Selecionar os Dados

Filtro	Seleção
Nome Agente	Copel Dis
Nome Região	Sul
Classe Consumo	Sul

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir dos valores de tarifa médios obtidos no Relatório de Consumo e Receita de Distribuição da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – foi feita uma simulação através do *software @risk* (Pacote *Decisions Tools*, licenciado pela UTFPR) para prever os valores dos próximos anos da tarifa energética. O primeiro dado é do ano de 2003 e o último dado apresentado é do ano de 2021, portanto são feitas estimativas a partir para os anos 2022 a 2035. Importante salientar que para o cálculo do custo evitado foi utilizado o quanto os valores variaram entre os períodos. Os valores das tarifas estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Variações da Tarifa Energética entre os anos de 2003 a 2021

Ano	Tarifa	Variação	Ano	Tarifa	Variação
2003	148,3		2020	725,9	-4,0%
2004	190,1	22,0%	2021	781,4	7,1%
2005	239,6	20,7%	2022	811,8	3,7%
2006	279,1	14,1%	2023	841,9	3,6%
2007	290,7	4,0%	2024	871,8	3,4%
2008	281,0	-3,5%	2025	901,0	3,2%
2009	289,7	3,0%	2026	930,2	3,1%
2010	298,8	3,0%	2027	958,8	3,0%
2011	310,5	3,8%	2028	987,0	2,9%
2012	308,0	-0,8%	2029	1014,4	2,7%
2013	297,0	-3,7%	2030	1042,2	2,7%
2014	342,6	13,3%	2031	1070,2	2,6%
2015	612,8	44,1%	2032	1100,2	2,7%

2016	607,0	-1,0%	2033	1128,7	2,5%
2017	622,7	2,5%	2034	1156,7	2,4%
2018	708,8	12,1%	2035	1181,0	2,1%
2019	754,9	6,1%			

Fonte: ANEEL (2021)

4.3.1. Custos Evitados: Forma de Cálculo

Como visto na Figura 10 as entradas do fluxo de caixa são os custos evitados, representados neste projeto pelo (i) custo evitado para destinar os resíduos da organização, que com a mudança será destinado para o biodigestor e (ii) custos evitados com custo energético na fábrica, já que parte da eletricidade é gerada pelo biodigestor.

4.3.1.1. Destinação de Resíduos

No cenário sem o biodigestor, vários resíduos da empresa onde a fábrica estudada está inserida eram direcionados ao processo de compostagem. Além dos diferentes encargos ambientais, no cenário sem o biodigestor há também um custo de destinação evitado estimado através da Equação 2.

$$CD_i = VD_i * CC \quad (2)$$

Onde:

CD_i = custo de destinação no ano i (R\$)

VD_i = volume destinado no ano i (ton)

CC = custo de destinação por ton (R\$/ton)

Os valores de cada ano foram inseridos no fluxo de caixa, e corrigidos pelo índice IPCA anualmente.

4.3.1.2. Energia Elétrica

Assim como na parte ambiental, para encontrar quais seriam os custos evitados foram calculados dois cenários: o cenário sem o biodigestor, e aquele com o biodigestor. No cenário sem o biodigestor, para obter o custo anual de energia elétrica foi multiplicado o consumo energético da fábrica pelo valor de tarifa energética média, conforme Equação 3.

$$CEA_i = CE_i * VT_i \quad (3)$$

Onde:

CEA_i = custo energético do ano i no cenário sem o biodigestor (R\$)

CE_i = consumo energético do ano i vindo da rede sem o biodigestor (kWh)

VT_i = valor da tarifa energética do ano i prevista através das simulações com base histórica (R\$/kWh)

No novo cenário com o biodigestor, 32,9% do consumo energético da fábrica poderia ser gerado pelo biodigestor, logo, 67,1% deveria vir da rede. Então, para obter-se o gasto com energia elétrica neste novo cenário, foi multiplicada a nova quantidade de eletricidade pelo mesmo valor da tarifa média usado no cenário sem o biodigestor, conforme Equação 4.

$$CET_i = CR * VT_i \quad (4)$$

Onde:

CET_i = custo energético do ano i no cenário com o biodigestor (R\$)

CR = consumo energético do ano i vindo da rede com o biodigestor (kWh)

VT_i = valor da tarifa energética do ano i prevista através das simulações (R\$/kWh)

A diferença entre esses valores, dos cenários sem e com o biodigestor, são os custos evitados, conforme mostra a Equação 5.

$$CVA_i = CEA_i - CET_i \quad (5)$$

Onde:

CVA_i = custo evitado no ano i devido ao uso do biodigestor para gerar energia

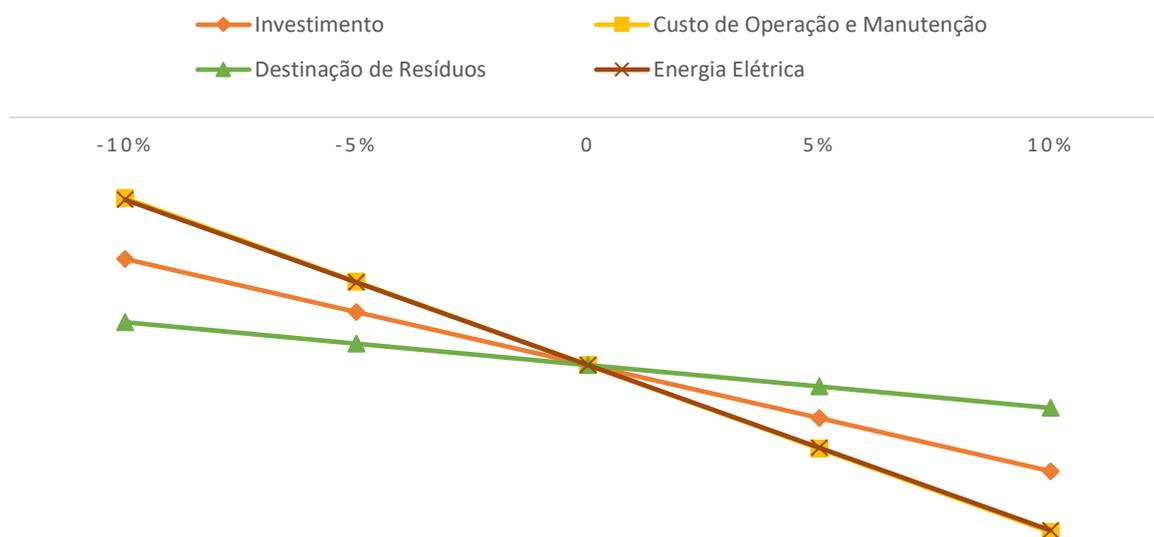
O custo evitado de cada ano foi inserido no fluxo de caixa para posterior cálculo dos índices econômicos.

4.3.2. Valor Presente Líquido

A Taxa Mínima de Atratividade adotada foi de 11% ao ano. Primeiramente foi calculado o Fluxo de Caixa, que é o resultado da diferença entre o que saiu e entrou no caixa para cada período n . Com esses valores foi possível calcular o VPL a partir de uma fórmula do *software* de planilha eletrônica.

Devido ao sigilo dos dados não é possível expor os resultados na íntegra dos indicadores econômicos, então, optou-se por analisar quais variáveis mais impactam na Avaliação Econômica do projeto estudado por meio de uma Análise de Sensibilidade do VPL, como mostra o Gráfico 5.

Gráfico 5 - Análise de Sensibilidade Econômica para Implantação e Operação do Biodigestor perante variação para VPL



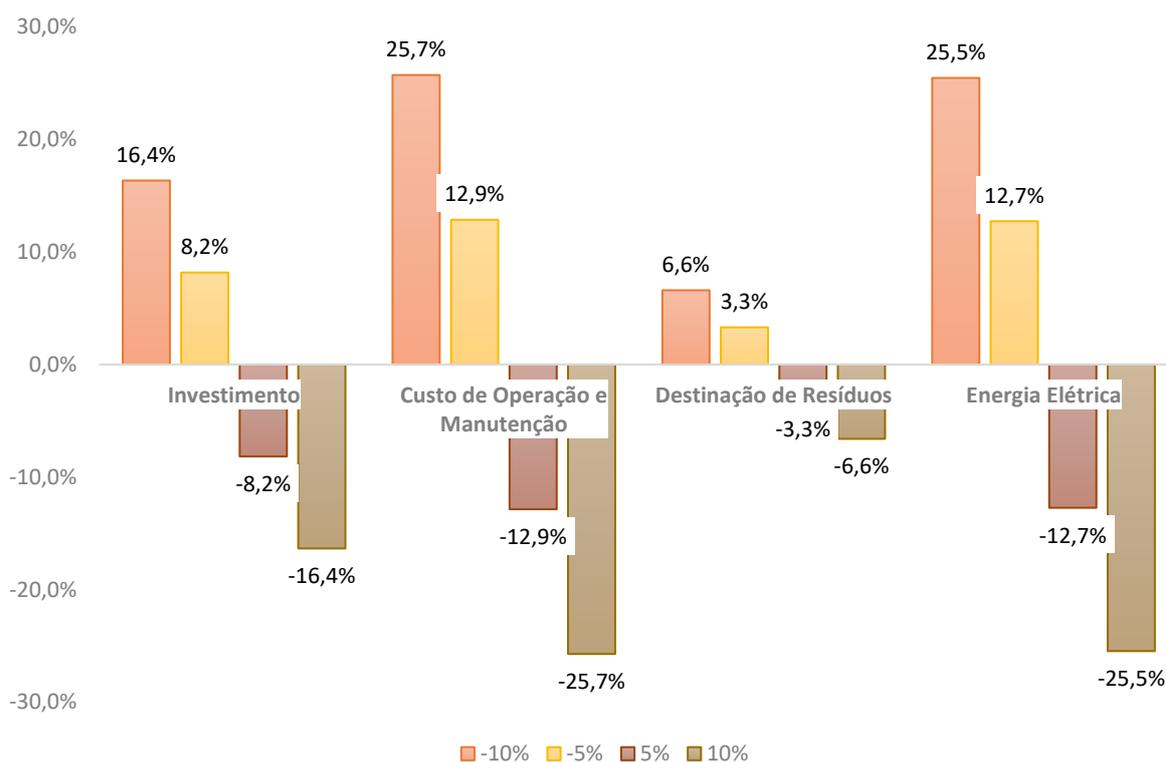
Fonte: Autoria própria (2022)

Para cada uma das variáveis: investimento, custo de manutenção e operação anual, custo evitado com destinação de resíduos e custo evitado com a nova fonte de energia - que provém do biodigestor -, foi analisado o comportamento do VPL ao mudar cada um desses valores isoladamente: 5% e 10% menor, e 5% e 10% maior.

É importante salientar que para as variáveis de saída de caixa como investimento e custo de manutenção e operação anual, são do tipo “quanto menor, melhor”, ou seja, quando diminui essas variáveis o retorno do projeto é maior. Já as variáveis destinação de resíduos e energia elétrica são custos evitados, ou seja, entrada de caixa, e são do tipo “quanto maior, melhor”, então, ao aumentar essas variáveis, o retorno do projeto é maior.

A análise de sensibilidade do Gráfico 6 mostra que a variável que mais tem sensibilidade é o custo de manutenção e operação anual, já que é a que mais causa variação no VPL ao alterar o seu valor. Ao diminuir em 10% o valor do custo de manutenção e operação anual, há um aumento de 25,7% no VPL, assim como, ao diminuir 5% do valor do custo de manutenção o VPL aumenta 12,9%.

Gráfico 6 - Análise de Sensibilidade Numérica da Implantação e Operação do Biodigestor



Fonte: Autoria própria (2022)

A variável custo de Energia Elétrica apresenta uma sensibilidade parecida com o custo de manutenção, porém ao contrário do custo de manutenção, ou seja, quando é aumentado em 10% o custo de energia elétrica, o VPL melhora e aumenta 25,5%.

A variável que menos é influenciada pelas alterações feitas – 10%, 5%, -5% e -10% isoladamente – é o custo evitado de destinação de resíduos, que aumenta apenas 6,6% do VPL ao aumentar 10% o custo evitado.

A fim de montar cenários alternativos, foram simulados 6 cenários, apresentados na Tabela 10. Todos os cenários são otimistas, ou seja, partem do princípio em que vai haver uma melhora nos valores das variáveis.

Tabela 10 - Possíveis Cenários e Impactos no VPL

Cenário	1	2	3	4	5	6
Investimento	-5%	-10%	0%	0%	0%	0%
Custo de Manutenção	-5%	-10%	-5%	-10%	-5%	-10%
Destinação de Resíduos	5%	10%	5%	10%	0%	0%
Energia Elétrica	5%	10%	5%	10%	5%	10%
Variação do VPL	+37,08%	+74,16%	+28,90%	+57,81%	+25,60%	+51,20%

Fonte: Autoria própria (2022)

Nos cenários 1 e 2 todas as variáveis foram alteradas 5% e 10% respectivamente, sendo que, num cenário otimista as duas primeiras variáveis – investimento e custo de manutenção e operação anual – diminuem, enquanto as variáveis destinação de resíduos e energia elétrica aumentam. No cenário 1 houve uma melhora de 37,08%, enquanto no cenário 2, em que ocorrem mudanças efetivamente, a melhora foi de 74,16%.

Porém, a variável investimento já ocorreu, então, não tem como efetivamente mudar, por isso, os cenários 3 e 4 não consideram essa mudança, obtendo uma melhora do VPL de 28,90% e 57,81% respectivamente.

Por fim, os cenários 5 e 6 não consideraram variação do custo para destinar resíduos, e somente as variáveis mais sensíveis, tendo uma melhora do VPL parecida com os cenários 3 e 4, de 25,90% e 51,20% respectivamente, reforçando que as ações devem ser focadas nas variáveis que efetivamente influenciam para atingir os melhores resultados. Num cenário em que o custo de manutenção seja melhorado, ou seja, diminuído em 20%, o VPL aumenta em 51,46%. E supondo que juntamente com essa diminuição de 20% no custo de manutenção, haja um aumento de 20% no fornecimento de energia elétrica da rede, o VPL aumenta em 102,40%.

Dentre as duas variáveis que mais influenciam o resultado do VPL, a variável custo de manutenção e operação anual é a que pode ser trabalhada internamente pela organização para diminuir esse valor, aumentando consideravelmente o

resultado; enquanto o custo evitado de energia é um resultado que está fora do controle da empresa (custo da tarifa de energia proveniente da rede), que depende de condições climáticas, investimentos governamentais, entre outros.

Por fim, relacionando aos resultados de outros estudos, no estudo de Antonio, Filho e da Silva (2018) foi feita uma análise de sensibilidade em relação aos custos de eletricidade e do custo dos equipamentos. Nesse estudo, o VPL duplicou quando o custo de eletricidade aumentou 10%, e duplicou também quando o custo dos equipamentos caiu 20%, tendo variáveis mais sensíveis que no presente estudo.

Já para Martins e Oliveira (2011) foram feitas simulações relacionadas a tarifa energética, e em uma delas, em que houve uma oscilação de 4,55% no valor da tarifa, teve um aumento no VPL de aproximadamente 12%, valores aproximados ao desse trabalho.

5 CONCLUSÕES

5.1. Atingimento dos Objetivos Propostos

Este estudo teve como objetivo geral identificar os potenciais impactos ambientais e a influência de variáveis econômicas associadas ao uso do biodigestor na produção industrial de proteína suína. Para isso, atingiu os objetivos específicos descritos a seguir.

O primeiro objetivo específico caracterizou a cadeia de produção de proteína suína na região do estudo. Foram realizadas entrevistas e preenchidos questionários para o levantamento dessas informações. Os dados da caracterização da cadeia suína foram usados para atingir o segundo objetivo específico, que avaliou os potenciais impactos ambientais da produção de proteína suína com e sem biodigestores.

Para atingir o segundo objetivo específico foi realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida com o uso de dois tipos de tratamento de resíduos orgânicos industriais: a compostagem e o biodigestor. Na ACV foi levado em consideração desde a fabricação de matéria-prima para a ração, até o processamento da carne crua antes de ser embalada. Não foram considerados neste estudo a instalação de biodigestores na fase de campo (produção de suínos).

Nesta análise, foi possível observar que a maioria das categorias de impacto analisadas diminuíram os potenciais impactos ambientais com o tratamento de resíduos biodigestor. Quando analisado o sistema todo, houve destaque na categoria escassez da água que diminuiu 3,5% seu valor. Quando analisado somente a fase indústria, a categoria que se destacou foi o potencial de aquecimento global de uso da terra e transformação do solo, em que houve uma diminuição de 30,97%. O potencial de aquecimento global total, associado a pegada de carbono, também emanou menos potenciais impactos, melhorando o indicador para o sistema indústria em quase 150%.

Considerando as premissas e a modelagem adotada neste estudo, para as categorias de impacto de potencial de acidificação e eutrofização não houve melhorias, ou seja, quando utilizado o tratamento de resíduos compostagem, os potenciais impactos ambientais são menores, considerando os *datasets* utilizados da

Ecoinvent neste estudo. Para dados mais precisos e específicos, recomenda-se que em estudos futuros, sejam utilizados dados de inventários de ciclo de vida regionalizados ou específicos do biodigestor utilizado pela empresa. Isso poderá alterar os resultados do estudo e o comportamento das categorias de impacto analisadas que utilizaram de dados disponíveis em base de dados internacional.

Relacionado ao terceiro objetivo específico, onde foi estruturado o modelo econômico para estudo de engenharia econômica da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína, foi calculado o VPL a partir dos dados fornecidos pela organização analisada para a implantação do biodigestor. Esses dados foram utilizados para o quarto objetivo específico, que foi avaliar a sensibilidade/influência de variáveis econômicas e possíveis cenários da implantação de biodigestor na fase industrial da cadeia produtiva de proteína suína.

Dentre as variáveis que influenciam na implantação do biodigestor, as mais influentes, ou sensíveis economicamente foram o custo de manutenção e operação anual e o custo evitado de energia elétrica. Ambas as categorias impactam no VPL de forma parecida; ao diminuir o custo de manutenção em 10% o VPL aumenta 25,7%, assim como ao aumentar o custo de energia elétrica em 10% o VPL aumenta 25,5%. Em um cenário em que o custo de manutenção varie 10% de forma positiva, ou seja, o custo de manutenção diminua e o custo de energia elétrica aumente, o VPL chega a aumentar 51,20%, mostrando que a variável custo de manutenção efetivamente é aquela que deve ser trabalhada, já que o custo de energia é um fator externo.

Assim, utilizando a ACV como metodologia robusta para avaliação de potenciais impactos ambientais, pode-se concluir neste estudo que a instalação de um biodigestor traz, no geral, benefícios ambientais que variam entre 0,1% e 3,5% de melhoria em termos de impacto ambiental evitado. Além disso, é importante voltar atenção e ações para redução de dispêndios nas variáveis associadas ao custo de operação e manutenção do sistema de biodigestão que se apresentou com significativa influência na avaliação econômica.

5.2. Limitações do Estudo

Este trabalho trata de uma região específica do Brasil, onde não foi levado em consideração outras regiões, ou seja, os dados não podem ser generalizados, já que

cada região tem suas condições de produtividade, modelos de produção, mercado, custos etc. Em contrapartida, foram considerados fluxos no estudo da base de dados que retratam outras regiões, geralmente de caráter global, e podem não representar fielmente as condições locais do estudo; porém, mesmo assim, a ACV é a técnica que pode melhor representar os potenciais impactos ambientais gerados em um sistema devido a sua robustez.

Relacionado a implantação do biodigestor, esse trabalho focou somente na implantação na parte industrial, mas, há possibilidades em outras fases da cadeia produtiva, como na fase de campo.

Também devido ao uso de diferentes unidades funcionais e/ou declaradas, não foi possível a comparação deste estudo com outros.

Como para a análise econômica a tarifa energética considerada foi uma média dos últimos anos, não foi levado em consideração bandeiras tarifárias, que fazem com que o valor das tarifas varie de acordo com as condições de geração de energia (ANEEL, 2015), assim como consumo e demanda contratada em horários de ponta e fora de ponta ou variação devido a fatores externos, como clima.

Relacionado a parte econômica, porém, nas variáveis que podem influenciar seus resultados, não foram consideradas algumas rotas tecnológicas, como purificação e venda do CO₂, uso do biogás para diferentes formas, como por exemplo, biometano para fins energéticos (motor gerador) ou para fins de mobilidade (uso como biocombustível), geração de energia térmica proveniente do biogás, venda do biofertilizante, venda de créditos de carbonos etc.

5.3. Sugestões para Estudos Futuros

São vários os caminhos que podem ser tomados para pesquisas futuras. Um dos caminhos que deveria ser priorizado é em relação a como diminuir os potenciais impactos ambientais em relação a fase da fabricação da ração, ou da conversão alimentar, já que os maiores potenciais impactos estão associados a esta fase.

Uma outra análise que também poderia ser feita, é a inclusão da comercialização de créditos de carbono gerados pelo biodigestor na avaliação econômica, identificando o quanto impactaria no VPL.

Além disso, há outros itens além dos aspectos ambientais dentro da sustentabilidade a serem analisados dentro de uma cadeia de suínos também, caso como aspectos sociais e econômicos levando em consideração taxas de mortalidade e uso de antibióticos, por exemplo.

A energia elétrica no Brasil é oriunda aproximadamente 83% de fontes renováveis (EPE, 2020), porém, no uso da energia para combustíveis essa predominância não ocorre, e apenas 25,3% da sua fonte é renovável (EPE, 2020). Nos estudos realizados no Brasil, o biogás foi apenas utilizado para geração de eletricidade, ou seja, ainda há potencial de utilização do biogás para geração de combustível no país, sendo uma área a serem realizados estudos para implantação e avaliação econômica.

Assim, há muita área a ser explorada ainda, sendo a pesquisa um passo a mais para obtenção de progresso científico para a sociedade.

REFERÊNCIAS

ABEPRO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **A Profissão**: Áreas da Engenharia de Produção. Disponível em <http://portal.abepro.org.br/a-profissao/#1521896862865-5590ca00-3aad>. Acesso em 28 jan. 2021.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009** Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044:2009** Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

ABPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. **Relatório anual 2020**. Disponível em: https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2020/05/abpa_relatorio_anual_2020_portugues_web.pdf. Acesso em: 20 nov. 2020.

ACERO, A. P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. **LCIA methods**. 2016. Disponível em: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/08/LCIA-METHODS-v.1.5.5.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2022.

AMORIM, J. O. **Carne suína**: mercado, benefícios e riscos. 2021. 48 f. Monografia (Graduação) – Instituto Federal Goiano, Campus Ceres, 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bandeiras Tarifárias**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 03 fev. 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acesso em 06 dez. 2021.

ANTÔNIO, A. S.; OLIVEIRA FILHO, D.; SILVA, S. C. da. Electricity generation from biogas on swine farm considering the regulation of distributed energy generation in Brazil: A case study for Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 4, p. 518-525, 2018.

BACENETTI, J. *et al.* Agricultural anaerobic digestion plants: What LCA studies pointed out and what can be done to make them more environmentally sustainable. **Applied Energy**, v. 179, p. 669-686, 2016.

BASSET-MENS, C.; WERF, H.M.G. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 105, n. 1-2, p. 127-144, 2005.

BOTTON, V. G.; FOGAÇA, D. R. Análise de ciclo de vida com auxílio de *software*: Estudo quantitativo em uma indústria de nutrição animal no Brasil. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. **Anais...** Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

BUENO, C. *et al.* Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208-2220, 2016.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S.T; BUENO, O. de C. Economic viability for electrical power generation using biogas produced in swine grange. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 831-844, 2010.

CHERUBINI, E. *et al.* Life cycle assessment of swine production in Brazil: a comparison of four manure management systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 68-77, 2015.

CI-BIOGÁS. **Panorama Do Biogás No Brasil Em 2019**. Foz do Iguaçu, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.cibiogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2019.pdf>. Acesso em: 20 out. 2020.

CI-BIOGÁS. **Purificação de biogás e identificação de equipamentos para geração de energia elétrica, térmica e veicular**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355242/1529323/Biog%C3%A1sFert+6.pdf/4383a60c-6ac8-4496-99e8-998326c0aa62>. Acesso em: 20 out. 2020.

CIRINO, J. F. *et al.* Financial and economic analysis under risk conditions for investment projects on biodigester for generation of electric energy from pig farming: a case study for a farm in Minas Gerais. **Custos e Agronegócio on line**, v. 13, p. 155-182, 2017.

CONG, R.; TERMANSEN, M. A bio-economic analysis of a sustainable agricultural transition using green biorefinery. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 153-163, 2016.

DALGAARD, R.; HALBERG, N.; HERMANSEN, J.E. Danish pork production: an environmental assessment. **DJF Animal Science**, n. 82, 2007.

DEVERS, L.; KLEYNHANS, T.E.; MATHIJS, E. Comparative life cycle assessment of Flemish and Western Cape pork production. **Agrekon**, v. 51, n. 4, p. 105-128, 2012.

DIEL, P.B. *et al.* Economic management model of electricity generated from biomass in a pig farm. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 132-138, 2020.

DOLMAN, M.A.; VROLIJK, H.C.J.; BOER, I.J.M. Exploring variation in economic, environmental and societal performance among Dutch fattening pig farms. **Livestock Science**, v. 149, n. 1-2, p. 143-154, 2012.

EDWIGES, T. *et al.* Economic evaluation of the use of biogas in Entre Rios Do Oeste, Brazil. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 10, n. 3&4, p. 1121-1123, 2012.

ENVIRONDEC. **The International EPD System**. Disponível em: <https://www.environdec.com/home>. Acesso em: 23 fev. 21.

ENVIRONDEC. **Declaração Ambiental de Produto**. Disponível em: <https://portal.environdec.com/api/api/v1/EPDLibrary/Files/ac952b6b-b246-48da-564f-08da12da9675/Data>. Acesso em: 03 mar. 22.

EMBRAPRA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Estatísticas Brasil Suínos**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas/suinos/brasil>. Acesso em 28 jan. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2020**: Ano base 2019. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 23 fev. 21.

ESNOUF, A. *et al.* Representativeness of environmental impact assessment methods regarding Life Cycle Inventories. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 1264-1271, 2018.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, 2019.

GEF BIOGÁS BRASIL. **Biogás Invest**. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br/biogasinvest.html>. Acesso em: 22 nov. 21.

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

GUTIÉRREZ, A.S. *et al.* Environmental assessment of pig production in Cienfuegos, Cuba: alternatives for manure management. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2518-2528, 2016.

HAMELIN, L. *et al.* Environmental consequences of future biogas technologies based on separated slurry. **Environmental science & technology**, v. 45, n. 13, p. 5869-5877, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Total Energy Supply**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em 03 mai. 2022.

JACOBSEN, R. *et al.* The carbon footprint of pigmeat in Flanders. **Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors**, v. 1, p. 167-189, 2014.

KAUFMANN, T. Sustainable livestock production: Low emission farm–The innovative combination of nutrient, emission and waste management with special emphasis on Chinese pig production. **Animal Nutrition**, v. 1, n. 3, p. 104-112, 2015.

KOU, Steven G.; WANG, Hui. First passage times of a jump diffusion process. **Advances in applied probability**, v. 35, n. 2, p. 504-531, 2003.

LIJÓ, L. *et al.* Life Cycle Assessment of electricity production in Italy from anaerobic co-digestion of pig slurry and energy crops. **Renewable Energy**, v. 68, p. 625-635, 2014.

LIMA, W. M. F. *et al.* Análise de risco para avaliação financeira da produção de feijões especiais: um estudo a partir da simulação de Monte Carlo. **RRCF**, v.12, n. 2, 2021.

MARCON, A. V. **Qualidade da carne de suínos submetidos a diferentes métodos de insensibilização no abate**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017.

MARTINS, F.M.; OLIVEIRA, P.A.V. Economic analysis of the generation of electric energy from biogas in pig production. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 477-486, 2011.

MCAULIFFE, G.A.; CHAPMAN, D.V.; SAGE, C.L. A thematic review of life cycle assessment (LCA) applied to pig production. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 56, p. 12-22, 2016.

MEINEN, R.J.; KEPHART, K.B.; GRAVES, R.E. Economic feasibility and evaluation of a novel manure collection and anaerobic digestion system at a commercial swine finisher enterprise. **Biomass and Bioenergy**, v. 63, p. 10-21, 2014.

MORAES, V.E.G.; CAPANEMA, L.X.L. A genética de frangos e suínos: a importância estratégica de seu desenvolvimento para o Brasil. **BNDES Setorial**, n. 35, p. 119–154, 2012.

NEPA: Núcleo de Estudos e pesquisas em Alimentação. **Tabela Brasileira de composição de alimentos**. 2011. 161 p. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. 4 ed. rev. e ampl. Campinas, 2011.

NERES, L. M.; RAMOS, H. R.; MOURA, M. Biodigester models used worldwide in the context of intelligent cities. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 9, n. 69, 2021.

NGUYEN, T.L.T.; HERMANSEN, J.E.; MOGENSEN, L. Fossil energy and GHG saving potentials of pig farming in the EU. **Energy Policy**, v. 38, n. 5, p. 2561-2571, 2010.

NIELSEN, P.H.; WENZEL, H. Environmental assessment of Ronozyme® P5000 CT phytase as an alternative to inorganic phosphate supplementation to pig feed used in intensive pig production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 7, p. 514, 2007.

NWAFOR, C.N.; OYEDELE, A.A. Forecasting OPEC oil price: a comparison of parametric stochastic models. **European Journal of Business and Management**, v. 10, n. 10, p. 49-60, 2018.

OGINO, A. *et al.* Life cycle assessment of Japanese pig farming using low-protein diet supplemented with amino acids. **Soil science and plant nutrition**, v. 59, n. 1, p. 107-118, 2013.

OPENLCA. **About**: the idea. Disponível em: <https://www.openlca.org/the-idea/>. Acesso em 04 abr. 2022.

PACTO GLOBAL, **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://pactoglobal.org.br/ods>. Acesso em 28 jan. 2021.

PALISADE. **Análise de Risco**. Disponível em: https://www.palisade-br.com/risk/risk_analysis.asp. Acesso em 06 abr. 2022.

PCR - PRODUCT CATEGORY RULES. 2012:11 **Meat of Mammals** (3.11), 2019. Product Group Classification: UN CPC 2111, 2113. Version 3.11. Disponível em: <https://www.environdec.com/pcr-library>. Acesso em 14 jul. 2021.

RELATÓRIO FOCUS. **Relatório de Mercado**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>. Acesso em 14 jan. 2021.

REYES, Y.A. *et al.* Life Cycle Assessment for the Cuban pig production: case study in Sancti Spiritus. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 99-109, 2019.

RICHETTI, A.; MELO, C. L. P. Análise da viabilidade econômica do cultivo do feijão-comum, safra 2013, em Mato Grosso do Sul. **Embrapa Agropecuária Oeste**, 2012.

SANTOS, R.M.; SÁ RODRIGUES, M.; CARNIELLO, M.F. Energia e Sustentabilidade: panorama da matriz energética Brasileira. **Scientia: Revista Científica Multidisciplinar**, v. 6, n. 1, p. 13-33, 2021.

SANTOS LIMA, D.F.; MIRANDA, G.J. Economic and financial viability analysis of the use of biogas to produce electricity. **Custos e Agronegócio On line**, v. 10, n. 3, p. 83-99, 2014.

SHAFIQ, A. *et al.* Statistical modeling for bioconvective tangent hyperbolic nanofluid towards stretching surface with zero mass flux condition. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-11, 2021.

SILVA, D.A.L. *et al.* Why using different Life Cycle Assessment *software* tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem. **Sustainable Production and Consumption**, v. 20, p. 304-315, 2019.

SILVA, D.A.L.; MASONI, P. Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: análise crítica das principais políticas de gestão, manutenção e uso de bancos de dados internacionais de inventários do ciclo de vida de produto. **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia** - IBICT, Brasília: 2016.

SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 2001.

SOUZA FILHO, W. **Intensidade de emissão de gases de efeito estufa e potencial de aquecimento global em um sistema integrado de produção agropecuária no subtropical brasileiro**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SOUSA, A.P.M. *et al.* Retorno de investimento de sistemas de tratamento de resíduos em granjas de suínos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 21, 2020.

VELARDE, A. **Alinhamento da estratégia nacional de bem-estar dos animais de produção, adotando o conceito proposto pela OIE** (“one world, one health, one welfare”): Guia de Boas Práticas: Insensibilização por gás em suínos. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/arquivos/GUIASUINOS2019.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2021.

WERF, H.M.G.; PETIT, J.; SANDERS, J. The environmental impacts of the production of concentrated feed: the case of pig feed in Bretagne. **Agricultural Systems**, v. 83, n. 2, p. 153-177, 2005.

VRIES, J. W. *et al.* Comparing environmental consequences of anaerobic mono-and co-digestion of pig manure to produce bio-energy—a life cycle perspective. **Bioresource technology**, v. 125, p. 239-248, 2012.

VRIES, J. W.; GROENESTEIN, C. M.; BOER, I. J. M. Environmental consequences of processing manure to produce mineral fertilizer and bio-energy. **Journal of environmental management**, v. 102, p. 173-183, 2012.

WANG, X. *et al.* Integrated analysis on economic and environmental consequences of livestock husbandry on different scale in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 1-12, 2016.

WIEDEMANN, S. G.; MCGAHAN, E.J.; MURPHY, C.M. Environmental impacts and resource use from Australian pork production assessed using life-cycle assessment. 1. Greenhouse gas emissions. **Animal Production Science**, v. 56, n. 9, p. 1418-1431, 2016.

ZHOU, Y. *et al.* Carbon footprint assessment of a large-scale pig production system in northern China: A case study. **Transactions of the ASABE**, v. 61, n. 3, p. 1121-1131, 2018.

ZSCHOKKE-GOHL, M. **Ecoinvent dataset documentation**: Treatment of biowaste, industrial composting, v.3.7.1, 2020a.

ZSCHOKKE-GOHL, M. **Ecoinvent dataset documentation**: treatment of biowaste by anaerobic digestion, v.3.7.1, 2020b.