

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAURÍCIO DE OLIVEIRA GONDAK

SIMULAÇÃO DE CENÁRIO PARA A SUSTENTABILIDADE DA PROPRIEDADE RURAL PELO APROVEITAMENTO DE DEJETO BOVINO VIA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA, SEGUNDO PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR

CURITIBA

2019

MAURÍCIO DE OLIVEIRA GONDAK

SIMULAÇÃO DE CENÁRIO PARA A SUSTENTABILIDADE DA PROPRIEDADE
RURAL PELO APROVEITAMENTO DE DEJETO BOVINO VIA BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA, SEGUNDO PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR

Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação de MBA Negócios Ambientais, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Negócios Ambientais.

Orientador: Prof. M.Sc. Marcelo Langer

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

MAURÍCIO DE OLIVEIRA GONDAK

SIMULAÇÃO DE CENÁRIO PARA A SUSTENTABILIDADE DA PROPRIEDADE RURAL PELO APROVEITAMENTO DE DEJETO BOVINO VIA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA, SEGUNDO PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR

Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em MBA em Negócios Ambientais, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Negócios Ambientais.

Prof. M.Sc. Marcelo Langer

Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Prof. Dr. Gilson Martins

Departamento de Economia Rural e Extensão, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Curitiba, 23 de fevereiro de 2019.

A toda minha família e amigos minha eterna gratidão

AGRADECIMENTOS

Aos professores e colaboradores do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA) - UFPR, pela excelência do curso ofertado.

Aos amigos e colegas de curso com os quais convivi e tive a oportunidade de crescer com a troca de experiências e por proporcionarem um ambiente favorável ao debate das diversas questões relacionadas aos negócios ambientais tanto nos fóruns quanto nos encontros presenciais.

Ao professor Marcelo Langer pela orientação, conhecimento compartilhado e confiança para execução do trabalho. E ao professor Luiz Antonio Corrêa Lucchesi pela colaboração e contribuição na fase inicial do desenvolvimento do tema.

A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo.

(PETER DRUCKER)

RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo identificar a quantidade de gases causadores do efeito estufa (GEE) emitidos anualmente pela atividade de criação de gado bovino leiteiro confinado no estado do Paraná. Um subproduto importante da criação de gado bovino é o esterco, cuja utilização como biofertilizante em diversas culturas, permite reciclar nutrientes e manter a produtividade do solo em níveis adequados, e além disso, uma alternativa como fonte de geração de biogás. No presente trabalho, foi avaliada a produção de esterco bovino, desde o ponto de vista energético, considerando seu valor como fertilizante; seu potencial de oferta de macronutrientes; e, a sua capacidade para substituir fertilizantes minerais. Também foi avaliado o potencial de produção de biogás a partir de esterco, assumindo dados de operação de biodigestores rurais. A aplicação dos princípios da Economia Circular (EC) pode ser adotada como proposta de modelo de negócio para as propriedades rurais destinadas à criação de animais confinados; para transformar resíduos em recursos (coprodutos) e conectar as atividades de produção e consumo; para intensificar as atividades por meio da melhora do manejo de pastagens, da qualidade do alimento fornecido aos animais e do manejo dos dejetos de animais confinados. Considerando o rebanho do Paraná em 2015, foram estimados o potencial de geração de biogás do esterco bovino em $1,01 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$; valor energético em $1,0 \times 10^7 \text{ GJ} \cdot \text{ano}^{-1}$; geração de $1,87 \text{ TWh} \cdot \text{ano}^{-1}$ de energia elétrica; oferta disponível anual de $2,95 \times 10^5$ toneladas de macronutrientes e total de emissões evitadas em $521,33 \text{ Gg}$ de $\text{CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ano}^{-1}$. O uso de tecnologias como a biodigestão anaeróbia para o tratamento destes dejetos mostrou-se estrategicamente importante para atender, de forma sustentável, à demanda da Economia da Biomassa.

Palavras-chave: Economia Circular 1. Economia de Baixa Emissão de Carbono 2. Valor Energético 3. Esterco Bovino 4. Sustentabilidade 5.

ABSTRACT

This work has as objective to identify the quantity of greenhouse gases (GHG) issued annually by the activity of the creation of dairy cattle confined in Paraná State. An important by-product of the rearing of beef cattle is the dung, whose use as fertilizer in various cultures, allows recycling nutrients and maintaining the soil productivity at appropriate levels. In the present study, to evaluate the production of bovine manure, from the point of view of energy, whereas its fertilizer value, in terms of macronutrients available and the replacement of chemical fertilizer with equal value fertilizer. In the present study, to evaluate the production of bovine manure, from the point of view of energy, whereas its fertilizer value, in terms of macronutrients available and the replacement of chemical fertilizer with equal value fertilizer. Also evaluates the potential of biogas production from manure, assuming operating data of rural digesters. The application of the principles of Circular Economy (CE) as proposed business model for the rural properties for the creation of animals confined to transform waste into resources and connect the activities of production and consumption. It presents itself as one of the alternatives for intensification of activity through the improvement of the management of pastures, the quality of the food supplied to the animals and the management of animal manure containment, using technologies such as anaerobic digestion for the treatment of waste to meet the demand of the economy of biomass. Considering the herd of Paraná in 2015, the potential for biogas generation of bovine manure was estimated in $1,01 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{year}^{-1}$; energy value in $1,0 \times 10^7 \text{ GJ} \cdot \text{year}^{-1}$; generation of $1,87 \text{ TWh} \cdot \text{year}^{-1}$ electric power; available annual supply of $2,95 \times 10^5$ tons of macronutrients and total avoided emissions in $521,33 \text{ Gg}$ of $\text{CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{year}^{-1}$. Therefore, the Circular Economy presents itself as an effective way to the sustainable development of the agribusiness, how the model in accordance with the principle of sustainable and harmonious development of agriculture with the natural ecosystem.

Keywords: Circular economy 1. Economy of Low Carbon Emission 2. Energetic Value 3. Cattle Manure 4. Sustainability 5.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

GRÁFICO 1 – HISTÓRICO DE EMISSÕES DO ESTADO DO PARANÁ (1996 à 2017).....	18
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DAS PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO DE GEE DO PARANÁ EM RELAÇÃO AO BRASIL.....	19
GRÁFICO 3 – EMISSÕES DE GEE POR ATIVIDADE ESPECÍFICA DO SETOR DA AGROPECUÁRIA DE 2017.	19
GRÁFICO 4 – EMISSÕES PROMOVIDAS PELA PRODUÇÃO DE LEITE COMPARADA AS OUTRAS ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS NO PARANÁ (2000 à 2017).....	20
FIGURA 1 – PIRÂMIDE DOS ODS.....	27
FIGURA 2 – PENSAMENTO DE CICLO DE VIDA.....	31
FIGURA 3 – MAIORES REGIÕES PRODUTORAS DE LEITE NO ESTADO DO PARANÁ.	40
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DE METODOLOGIA.	40
QUADRO 1 – ASPECTOS AMBIENTAIS.	62
QUADRO 2 – ASPECTOS ECONÔMICOS.	65
QUADRO 3 – ASPECTOS SOCIAIS.....	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE DE LEITE NOS PRINCIPAIS PAÍSES, 2016.	16
TABELA 2 – PRODUÇÃO DE LEITE POR ESTADOS BRASILEIROS (1996/2017).	17
TABELA 3 – EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA CÁLCULO DE BIOMASSA RESIDUAL.	47
TABELA 4 – ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DIÁRIA DE DEJETOS DE DIVERSOS ANIMAIS.	50
TABELA 5 – PRODUÇÃO ANUAL DE ESTERCO BOVINO DA PECUÁRIA LEITEIRA CONFINADA.	50
TABELA 6 – COEFICIENTES ENERGÉTICOS (CE) MÉDIOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES MINERAIS.	51
TABELA 7 – VALOR ENERGÉTICO ESTIMADO PARA OS MACRONUTRIENTES DO ESTERCO BOVINO, CONSIDERANDO A SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL POR BIOFERTILIZANTE.	51
TABELA 8 – POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DIFERENTES RESÍDUOS ORGÂNICOS DE ANIMAIS.	52
TABELA 9 – ECONOMIA DE ENERGIA FÓSSIL PELA USO DO ESTERCO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA, NO PARANÁ.	52
TABELA 10 – VALOR ENERGÉTICO (VE) DO BIOGÁS DE ACORDO COM A PRODUÇÃO DIÁRIA DE ESTERCO BOVINO.	53
TABELA 11 – EMISSÃO DE GEE NA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES MINERAIS.	53
TABELA 12 – SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES ANUAIS EVITADAS PELA SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL PELO BIOFERTILIZANTE, NO PARANÁ.	54
TABELA 13 – FATORES DE EMISSÃO DE METANO PARA FERMENTAÇÃO ENTÉRICA DE GADO DE CORTE, MACHOS E JOVENS, FÊMEAS E VACAS LEITEIRAS.	55
TABELA 14 – FATORES DE EMISSÃO DE METANO POR FERMENTAÇÃO ENTÉRICA POR OUTRAS CATEGORIAS DE ANIMAIS.	55

TABELA 15 –TOTAL DAS EMISSÕES EVITADAS PELA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO NO ESTADO DO PARANÁ POR ANO.....	55
TABELA 16 – BENEFÍCIOS POTENCIAIS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO CONSIDERANDO O REBANHO LEITEIRO DO ESTADO DO PARANÁ E BRASIL.	56
TABELA 17 – CÁLCULO DE BENEFÍCIO AMBIENTAL DO USO DOS DEJETOS COMO BIOFERTILIZANTES, EMISSÕES ANUAIS EVITADAS.....	61
TABELA 18 –TOTAL DAS EMISSÕES EVITADAS PELA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO NO ESTADO DO PARANÁ E NO BRASIL POR ANO.	61
TABELA 19 – SIMULAÇÃO DE CUSTO EVITADO PELA SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL PELO BIOFERTILIZANTE NO PARANÁ E BRASIL.	63
TABELA 20 – CÁLCULO DE BENEFÍCIO ECONÔMICO DO USO DOS DEJETOS COMO BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA.	64
TABELA 21 – EMPREGOS GERADOS COM UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES PARA APROVEITAMENTO DE DEJETOS.	67

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

a	- número de dias no ano
CE	- Coeficiente energético
CEM K	- Coeficiente energético médio utilizado na produção de macronutriente potássio
CEM N	- Coeficiente energético médio utilizado na produção de macronutriente nitrogênio
CEM P	- Coeficiente energético médio utilizado na produção de macronutriente fósforo
CH ₄	- Gás metano
CH ₄ Fermentação	- Fator de emissão de CH ₄ para fermentação entérica
CO	- Monóxido de carbono
CO ₂	- Dióxido de carbono
CO ₂ eq	- Dióxido de carbono equivalente
DAK	- Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino
DAN	- Disponibilidade anual de nitrogênio presente no esterco bovino
DAP	- Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino
DBO	- Demanda Biológica de Oxigênio
DK	- Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino
DMK	- Disponibilidade média diária de potássio presente no esterco bovino
DMN	- Disponibilidade média diária de nitrogênio presente no esterco bovino
DMP	- Disponibilidade média diária de fósforo presente no esterco bovino
DN	- Disponibilidade de nitrogênio presente no esterco bovino
DP	- Disponibilidade de fósforo presente no esterco bovino
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
E	- Potencial energético do biogás
EC	- Economia circular
EE	- Total de Energia Elétrica Gerada
E _{elétrica}	- Energia elétrica gerada através do biogás em biodigestores
EF ₃	- Fator de emissão
FE _{CH₄ Fermentação}	- Fator de emissão de CH ₄ para fermentação entérica
FE GEE N	- Fator de emissão de GEE na produção de nitrogênio
FEM	- Fator de Emissão Médio

FRAC _{PRP Nex}	- Fração do N total excretado pelos animais diretamente em pastagens
GEE	- Gases de efeito estufa
GHG	- <i>Greenhouse gases</i>
IPCC	- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
K	- Potássio
M GEE FQ	- Mitigação de Gases de efeito estufa pela substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante
M GEE	- Mitigação de Gases de efeito estufa
N	- Nitrogênio
n	- Número de animais
N ₂ O	- Óxido nitroso
N ₂ O _{Dejetos}	- Emissão de óxido nitroso associada ao manejo de dejetos
Nex	- Total de N excretado anualmente por animal de cada categoria
η_{gerador}	- Rendimento do grupo gerador
NO _x	- Óxidos de Nitrogênio
ODS	- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
P	- Fósforo
PAG CH ₄	- Potencial de aquecimento global do CH ₄ em relação ao CO ₂
PAG N ₂ O	- Potencial de aquecimento global do N ₂ O em relação ao CO ₂
Pbiogás	- Produção diária de biogás
PCI	- Poder calorífico inferior do biogás proveniente do esterco bovino
PE	- Produção de esterco
Pest	- Produção diária de esterco
PK	- Teores totais de potássio presente no esterco bovino
PN	- Teores totais de nitrogênio presente no esterco bovino
PP	- Teores totais de fósforo presente no esterco bovino
PV	- Peso vivo
RPM CH ₄	- Relação entre o peso molecular do CH ₄ e do nitrogênio
RPM N ₂ O	- Relação entre o peso molecular do N ₂ O e do nitrogênio
VEest	- Valor energético estimado do biogás
VEest(T)	- Valor energético total estimado do esterco
VM	- Valor médio de produção de esterco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	22
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	23
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	23
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 ECONOMIA VERDE E ECONOMIA VERDE INCLUSIVA.....	25
2.2 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS).....	25
2.3 ECONOMIA CIRCULAR.....	28
2.4 PENSAMENTO DE CICLO DE VIDA	30
2.5 PECUÁRIA LEITEIRA	31
2.6 CARACTERÍSTICAS DOS DEJETOS BOVINOS	32
2.7 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E GASES DE EFEITO ESTUFA.....	33
2.8 BIOGÁS.....	35
2.8.1 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	36
2.8.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS	36
2.9 BIOFERTILIZANTE	36
2.10 INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE	37
2.10.1 PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL.....	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 MATERIAL	39
3.2 MÉTODOS	39
3.2.1 Estimativa da produção de esterco	41
3.2.2 Estimativa de disponibilidade diária de macronutrientes	41
3.2.3 Estimativa do valor energético de substituição do esterco	42
3.2.4 Estimativa de disponibilidade anual de macronutrientes	42
3.2.5 Biogás	43
3.2.5.1 Valor energético do biogás proveniente da biodigestão de dejetos bovinos	43
3.2.6 Estimativa da mitigação de gases de efeito estufa pelo manejo dos dejetos ...	43
3.2.7 Fermentação entérica.....	44
3.2.8 Manejo de dejetos de animais (exceto animais em pastagem)	44

3.2.9 Estimativa da mitigação de GEE decorrente da substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante.....	45
3.2.10 Estimativa de produção de energia elétrica.....	46
3.2.11 Estimativa das emissões de GEE evitadas pela geração de energia elétrica através do biogás	46
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	50
4.1 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ESTERCO	50
4.2 ESTIMATIVA DE VALOR ENERGÉTICO DE SUBSTITUIÇÃO DO ESTERCO	50
4.3 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	51
4.4 VALOR ENERGÉTICO DO BIOGÁS PROVENIENTE DA BIODIGESTÃO DE DEJETOS DE BOVINOS.....	52
4.5 ESTIMATIVA DA MITIGAÇÃO DE GEE DECORRENTE DA SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL	53
4.6 BENEFÍCIOS DECORRENTES DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO	54
4.7 BENEFÍCIOS DA TRANSFORMAÇÃO DOS DEJETOS BOVINOS EM COPRODUTOS.....	57
4.7.1 ASPECTOS AMBIENTAIS	57
4.7.2 ASPECTOS ECONÔMICOS	59
4.7.3 ASPECTOS SOCIAIS.....	59
4.8 PRINCIPAIS IMPACTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DA APLICAÇÃO DO CONCEITO DE EC NA PECUÁRIA LEITEIRA	60
4.8.1 ASPECTOS AMBIENTAIS	61
4.8.2 ASPECTOS ECONÔMICOS	63
4.8.3 ASPECTOS SOCIAIS.....	65
5. CONCLUSÃO.....	70
6. RECOMENDAÇÕES	71
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

Os bovinos representam um dos maiores rebanhos de animais do Brasil com cerca de 215 milhões de cabeças, sendo constituído por um rebanho de vacas ordenhadas de aproximadamente 21 milhões de cabeças e totalizando uma produção de pouco mais que 35 bilhões de litros de leite por ano (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2015).

O Brasil ocupa o quarto lugar como maior produtor leiteiro em todo o mundo, resultado apontado pelo Anuário Leite 2018 (RENTERO, 2018) desenvolvido pela Embrapa Gado de Leite de acordo com a Tabela 1.

TABELA 1 – PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE DE LEITE NOS PRINCIPAIS PAÍSES, 2016.

País	Produção		Produtividade	
	Mi t/ano	% ¹	t/vaca/ano	% ¹
Índia	170,89	4,4	1,3	2,1
EUA	92,28	1,8	9,9	1,5
Paquistão	45,84	2,0	2,1	2,7
Brasil	34,23	1,0	1,6	2,7
Alemanha	33,48	1,5	7,9	1,3
China	32,08	-0,3	6,4	5,7
Rússia	28,45	-1,0	3,4	0,4
França	25,16	0,2	6,9	0,3
Nova Zelândia	24,21	2,0	4,8	-0,1
Holanda	15,52	4,2	8,9	0,7

¹ Taxa anual de crescimento no período de 2011 a 2016

Fonte: RENTERO, 2018.

O estado do Paraná representa a segunda principal região produtora de leite do País com 1.641.009 vacas ordenadas, gerando 4.660.174 bilhões de litros de leite por ano conforme o Anuário Brasileiro da Pecuária, 2017 (ANUÁRIO BRASILEIRO DA PECUÁRIA, 2017).

A Tabela 2 representa a produção de leite dos estados brasileiros no período de 1996 a 2017, conforme IBGE 2018.

TABELA 2 – PRODUÇÃO DE LEITE POR ESTADOS BRASILEIROS (1996/2017).

Estados	Produção de leite (Milhões de litros)			
	1996	2006	2016	2017*
Minas Gerais	5.601	7.094	8.971	8.814
Paraná	1.515	2.704	4.730	4.826
Rio Grande do Sul	1.861	2.625	4.614	4.625
Santa Catarina	866	1.710	3.114	3.175
Goiás	1.999	2.614	2.933	2.599
São Paulo	1.985	1.744	1.692	1.653
Pernambuco	422	630	839	893
Rondônia	317	637	791	754
Bahia	660	906	858	753
Mato Grosso	376	584	663	624
Pará	238	691	577	589

(*) Estimativa de produção, não considerando indicadores de captação da indústria.

Fonte: IBGE/PPM, 2018.

Devido ao crescimento desta atividade, as tecnologias de criação intensiva e o confinamento dos animais tendem a gerar uma grande concentração de dejetos, cujo tratamento e destino final assumem um caráter preocupante. O volume produzido de dejetos e os problemas relacionados à falta de tratamento dos resíduos podem ocasionar a poluição do ambiente, particularmente dos corpos d'água e o ar, devido a emissão de gases do efeito estufa (GEE) relacionada a decomposição de dejetos e ao sistema de fermentação entérica do animal.

Os dejetos não recuperados geram poluição e devido ao seu potencial para uso como biogás e biofertilizante, a falta de gestão leva a perdas diretas (contaminações ambientais e perdas da qualidade dos recursos naturais água e solo) e perdas indiretas pelo não uso do seu potencial energético e fertilização natural.

Desta forma, a gestão correta desses coprodutos pode contribuir para a mitigação dos problemas socioambientais relacionados ao aquecimento global.

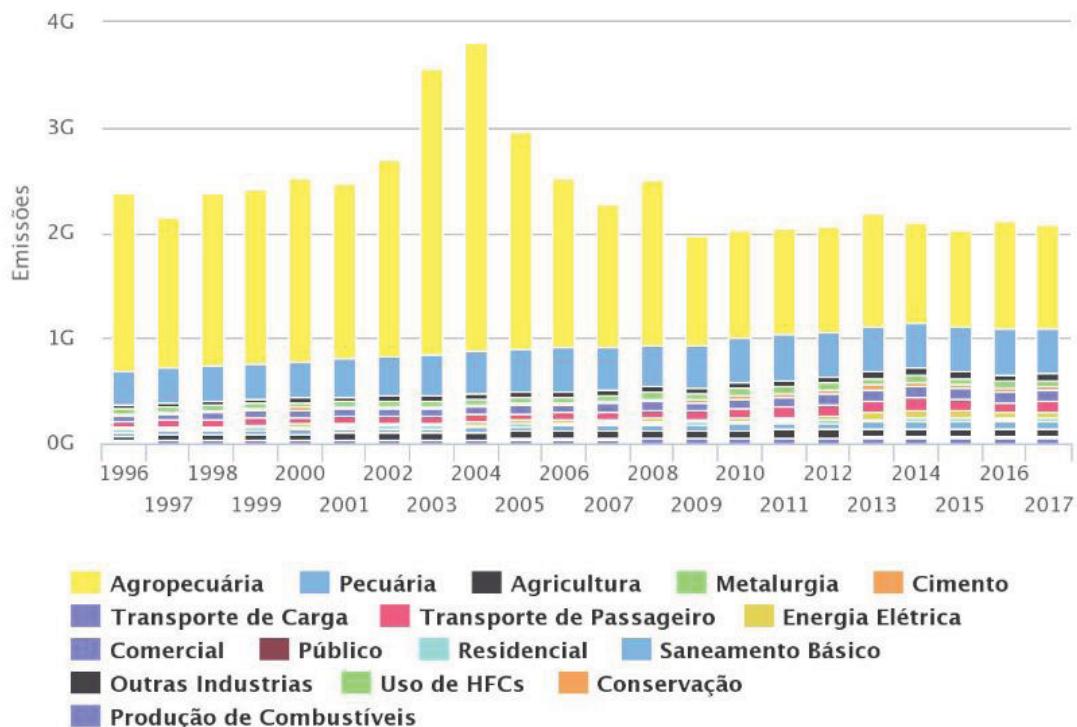
A emissão de metano da ruminação de bovinos manejados em sistemas intensivos é estimada a uma relação de 137 kg.cabeça⁻¹.ano⁻¹ em vacas da raça holandesa em lactação; ou em torno de 60 kg.cabeça⁻¹.ano⁻¹ em novilhas de corte, mas torna-se menor por quilograma de leite e/ou carne, por conta, por exemplo, da redução da idade de abate ou por aumento na produção de leite por vaca (PEDREIRA; PRIMAVESI, 2006).

O Plano Nacional Sobre Mudança do Clima (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA, 2013) destaca a relevância e a complexa interconexão entre o ganho de eficiência no setor agropecuário e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Na atividade pecuária destacam-se as emissões de metano (CH₄) resultantes da fermentação entérica e das fezes; e o óxido nitroso (N₂O) resultante das fezes, urina e eventualmente da utilização de fertilizantes nitrogenados ou do preparo do solo para produção de forragem. Dentre os GEE citados, o de maior interesse para a pecuária é o CH₄, pois, segundo o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG-BRASIL, 2017), a atividade agropecuária é, de longe, a principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa no país: ela respondeu por 73% das emissões nacionais em 2016, somando as emissões diretas da agropecuária (22%) e as emissões por mudança de uso da terra (51%).

O Gráfico 1 representa o histórico de emissões referentes ao estado do Paraná nos períodos de 1996 a 2017, dados gerados da plataforma SEEG-BRASIL.

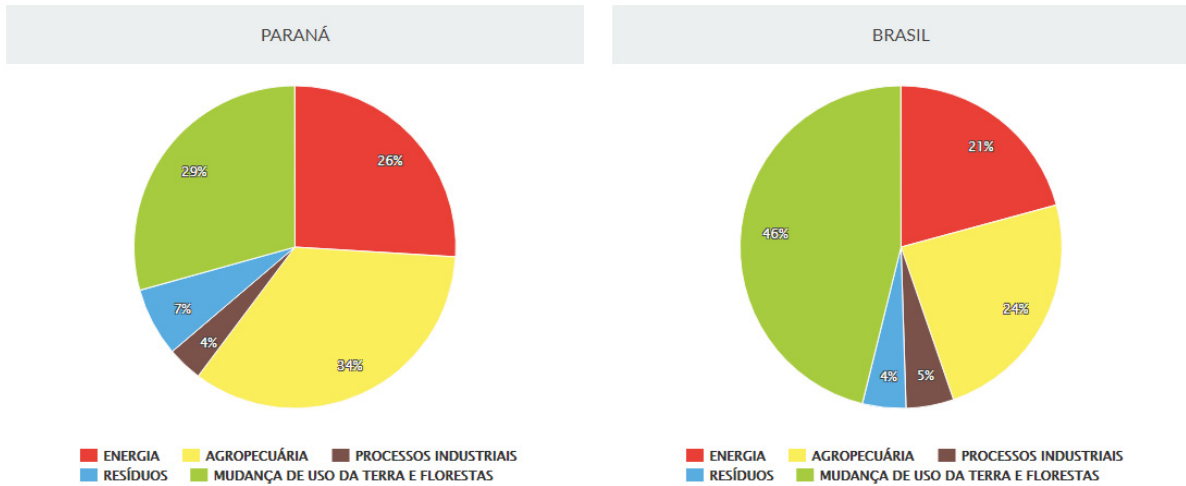
GRÁFICO 1 – HISTÓRICO DE EMISSÕES DO ESTADO DO PARANÁ (1996 a 2017).



Fonte: SEEG-BRASIL (2018).

O Gráfico 2 representa o estado do Paraná em comparação ao Brasil com relação participação das principais fontes de emissão de GEE do estado em relação ao perfil nacional no ano de 2017.

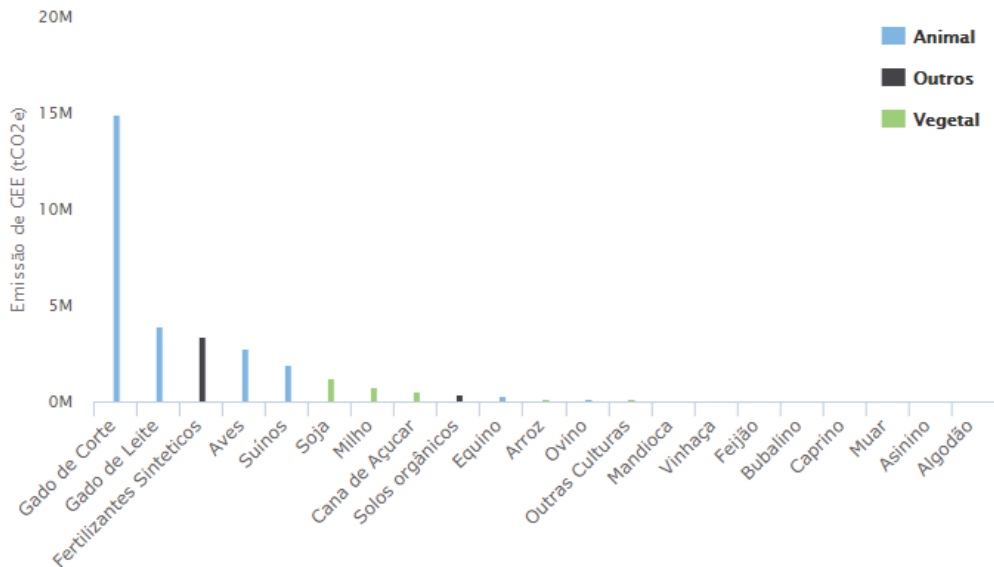
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DAS PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO DE GEE DO PARANÁ EM RELAÇÃO AO BRASIL.



Fonte: SEEG-BRASIL (2018).

O Gráfico 3 apresenta as emissões de GEE por atividade específica do Setor de Agropecuária e suas fontes de origem para o ano de 2017.

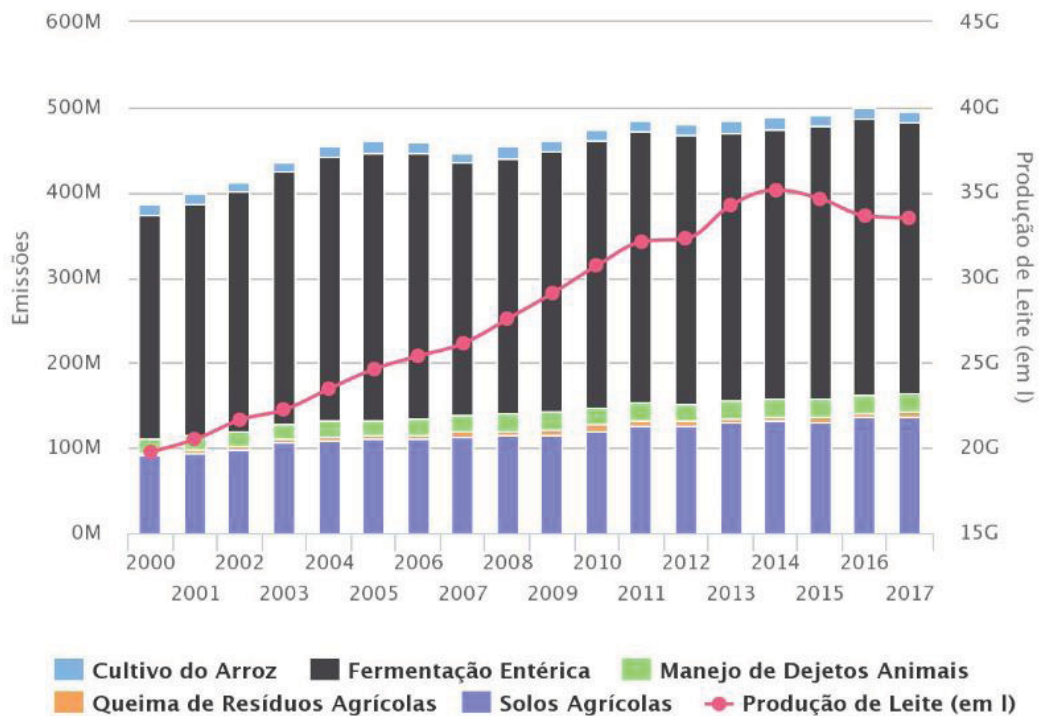
GRÁFICO 3 – EMISSÕES DE GEE POR ATIVIDADE ESPECÍFICA DO SETOR DA AGROPECUÁRIA DE 2017.



Fonte: SEEG-BRASIL (2018).

O Gráfico 4 representa as emissões promovidas pela produção de leite comparada as outras atividades agropecuárias entre o período compreendido dos anos 2000 até 2017 para o Paraná.

GRÁFICO 4 – EMISSÕES PROMOVIDAS PELA PRODUÇÃO DE LEITE COMPARADA AS OUTRAS ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS NO PARANÁ (2000 a 2017)



Fonte: SEEG-BRASIL (2018).

Os problemas de grande produção de dejetos sólidos e líquidos da pecuária leiteira e das emissões de GEE podem ser aproveitados em outras cadeias produtivas (biogás e biofertilizante), mudando o conceito econômico linear, de alto impacto social e ambiental, para um modelo econômico circular de menor impacto socioambiental.

A Economia Circular (EC) propõe como princípio a inclusão dos materiais em ciclo de uso “*closing material loops*”, reuso e reciclagem de nutrientes biológicos para extrair seu valor máximo com o mínimo gasto no uso de tecnologias e processos de produção existentes, conforme publicado pela Fundação Ellen MacArthur (WEBSTER, 2015), os quais podem promover a mitigação dos GEE. Na EC os produtos e processos são redesenhados para maximizar o valor dos recursos empregados, associando o crescimento econômico e a utilização destes recursos a

um ciclo de desenvolvimento positivo e contínuo, que preserva e aprimora o capital natural, que otimiza a produção de recursos e minimiza riscos sistêmicos da administração de estoques finitos e fluxos renováveis.

De maneira geral, em um cenário mundial marcado pelo esgotamento de vários recursos naturais, aumento populacional, desperdícios da produção agrícola, elevada geração de resíduos e mudanças climáticas resultantes do aumento das emissões dos GEE e de suas concentrações na atmosfera, é imprescindível a busca por novas abordagens econômicas. O modelo econômico linear “extrair, transformar, descartar” adotado no último século e perdurando até a atualidade, além de depender de grande quantidade de matérias-primas e energia geram grandes impactos negativos ambientais, sociais e econômicos. Esse modelo está atingindo seus limites físicos e, portanto, é necessária a adoção de um modelo econômico que perdure a existência e uso sustentável de um recurso.

Segundo Higman e Burgt (2003) “biomassa é qualquer combustível ou matéria bruta derivada de organismos que estiveram vivos recentemente”. Os dejetos bovinos se caracterizam como biomassa oriunda da atividade agropecuária podendo ser reinseridos ao sistema de produção intensiva de leite sob confinamento para a geração de bioenergia e biofertilizante, seguindo o conceito da EC e gerando ganhos econômicos, sociais e ambientais ao sistema produtivo. Ganhos estes provenientes do reaproveitamento técnico e econômico desses coprodutos e que contribuem para a mitigação dos GEE e redução dos problemas ambientais, econômicos e à saúde humana.

A aplicação dos aspectos inter-relacionados de biodiversidade-biomassa-biotecnologia, ou seja, a economia da Biomassa, conforme proposto por Sachs (2010) possibilita alcançar futuro promissor, para que as tecnologias atuem no início e fim do processo de produção, tanto para aumentar os rendimentos de biomassa como para ampliar o número de produtos derivados da agropecuária, tais como: alimentos, biofertilizante, bioenergias, insumos entre outros.

Visando estudar as condições da produção pecuária leiteira sustentável via aplicação dos princípios da EC, esse trabalho quantificou a produção de dejetos e os seus potenciais em valor energético os macronutrientes do esterco bovino e do biogás obtido através da biodigestão anaeróbia considerando a pecuária bovina leiteira do estado do Paraná e comparou essa realidade estadual ao cenário nacional. Também foi estimada a mitigação de gases de efeito estufa pelo manejo

correto do esterco, pela produção de energia elétrica e pela substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante.

1.1 JUSTIFICATIVA

A intensificação da atividade pecuária em sistemas de produção leiteira proporciona um aumento na quantidade de dejetos gerados e a destinação não adequada destes resíduos pode acarretar problemas ambientais, riscos de contaminação e comprometimentos da saúde pública.

O manejo adequado dos dejetos representa uma oportunidade de valorizar este material como coproduto para aplicação na forma de biofertilizantes em substituição aos insumos externos (nitrogênio, fósforo e potássio) e na geração de bioenergia nas propriedades rurais.

Em razão destes fatos salienta-se a importância da quantificação e da possibilidade de uso dos dejetos, bem como, estimativa dos GEE.

1.2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados Objetivo geral e Objetivos específicos respectivamente.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é estudar, sob os princípios da Economia Circular, a pecuária leiteira do estado do Paraná, particularmente sob o aspecto da sustentabilidade, comparando-a com a nacional, com respeito à geração de biogás e à produção de biofertilizante, resultantes da transformação dos dejetos animais produzidos pela biodigestão, e quantificar a utilização destes coprodutos em termos de seu valor energético e dos nutrientes reciclados com ênfase no N, no P e no K. Além disso, estimar a mitigação dos GEE e avaliar a substituição de fertilizantes minerais por biofertilizante, na produção de culturas forrageiras.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Estimar a quantidade de dejetos bovinos no estado do Paraná e Brasil.
- b. Avaliar a possibilidade de uso dos dejetos como biofertilizante e uso energético.
- c. Estimar a quantidade dos gases de efeito estufa (GEE) emanados pela atividade de criação de gado bovino leiteiro confinado no estado do Paraná.
- d. Projetar os impactos provenientes da transformação dos dejetos em coprodutos.
- e. Analisar o uso dos dejetos da pecuária leiteira com a aplicação conceitual e teórica do modelo de Economia Circular como fator contribuinte para a geração de renda e sustentabilidade das propriedades rurais.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A adoção da filosofia da “Economia Circular”, pelas propriedades agrícolas que exploram a pecuária leiteira de maneira intensiva no Paraná, pode promover uma melhor gestão de dejetos bovinos, redução dos impactos e agregar resultados ambientais, sociais e financeiros ao empreendimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O atual modelo de crescimento econômico está ameaçado por riscos promovidos pelo acelerado processo de desgaste do capital natural, através do consumo irracional dos recursos, escassez da água, níveis elevados de poluição, alterações climáticas e uma irreversível perda de biodiversidade. Este cenário prejudica perspectivas futuras de crescimento (*United Nations Environment Programme*¹ - UNEP, 2015).

A transição para o desenvolvimento de uma economia de crescimento verde, baseada em um modelo de baixa emissão de carbono depende de várias circunstâncias e de capacidades de visão e de inovação na forma como são desenvolvidos e produzidos os produtos e serviços (UNEP, 2016).

O crescimento verde significa fomentar o crescimento e o desenvolvimento econômico, assegurando simultaneamente que as riquezas naturais continuem a fornecer os recursos e os serviços ambientais, dos quais depende o nosso bem-estar. Para tal, conforme UNEP (2015) deve-se catalisar o investimento e a inovação que irão apoiar o crescimento verde e dar origem às novas oportunidades econômicas.

A Economia Circular constitui-se em um modelo para alcançar a Economia Verde e resulta da transição do modelo linear de produção de bens – extração de matéria-prima, produção, uso e descarte dos produtos, na utilização de matérias-primas como se suas fontes fossem ilimitadas - para um modelo circular, onde os materiais e resíduos são devolvidos ao ciclo produtivo através da reutilização, recuperação e reciclagem. O modelo circular é uma abordagem que busca contribuir para um relacionamento mais equilibrado entre as empresas, os consumidores e os recursos naturais desde a produção ao consumo e permite desenvolver inovação no desenvolvimento de novos produtos, serviços e modelos de negócio (RITZÉN; SANDSTRÖM, 2017).

¹ No Brasil, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) trabalha para disseminar, entre seus parceiros e a sociedade em geral, informações sobre acordos ambientais, programas, metodologias e conhecimentos em temas ambientais relevantes da agenda global e regional e, por outro lado, para promover uma participação e contribuição mais intensa de especialistas e instituições brasileiras em fóruns, iniciativas e ações internacionais.

2.1 ECONOMIA VERDE E ECONOMIA VERDE INCLUSIVA

A Economia Verde é “uma economia que resulta na melhoria do bem-estar humano e equidade social, reduzindo significativamente os riscos ambientais e a escassez ecológica” (UNEP, 2015). A partir do conceito de Economia Verde, a UNEP (2015) vem trabalhando e difundindo um novo conceito de modelo econômico, a Economia Verde Inclusiva (*Inclusive Green Economy*) (LANGER, 2015).

Uma Economia Verde Inclusiva vê o crescimento da renda e do emprego em investimentos que reduzem as emissões de carbono e a poluição, melhorando a saúde humana e desempenho ambiental. O Crescimento Verde pode ser entendido como o processo ativo de mudança para uma economia verde: “progresso econômico que fomenta o desenvolvimento ambientalmente sustentável, baixa emissão de carbono e socialmente inclusivo” (UNEP, 2015). Economia Verde Inclusiva ou Crescimento Verde Inclusivo busca a equidade e coesão social. “Promover a sustentabilidade e a equidade social como funções de um sistema financeiro estável e próspero dentro dos contornos de um planeta finito e frágil” (UNEP, 2017), é um caminho para alcançar a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.

2.2 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

A Economia Verde Inclusiva fortalece o caminho para o Desenvolvimento de Baixo Carbono e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Desde a era da industrialização, a maioria das economias em todo o mundo foi caracterizada pela produção insustentável e elevados padrões de consumo – sistema econômico cartesiano (SILVA, 2014). Este contexto conduziu a excessivas taxas de emissões de gases de efeito estufa (GEE), uso insustentável de recursos naturais e poluição ambiental, distribuição irregular da riqueza e a falta do acesso aos recursos (UNEP, 2015).

O Desenvolvimento de Baixo Carbono refere-se a um desenvolvimento que visa dissociar o crescimento econômico e o desenvolvimento social do aumento das emissões de gases de efeito estufa (UNEP, 2017). Este conceito correlaciona a

necessidade de mitigar as mudanças climáticas com a exigência de mudar fundamentalmente os padrões de produção e consumo.

Os ODS buscam “promover crescimento econômico inclusivo e sustentável, pleno emprego e produtividade, trabalho decente para todos” e “desconectar o crescimento da degradação ambiental”, pois existe a necessidade urgente para uma transformação para um ambiente mais verde e mais inclusivo (UNEP, 2015).

O caminho do desenvolvimento econômico é refletido em quase todas as metas. Com os ODS foi estabelecido um conjunto abrangente de metas e objetivos para fornecer orientação para diferentes setores e áreas de ação e orientação sobre como configurar as economias (UNEP, 2017), entre esses objetivos definidos é possível destacar os ODS relacionados a esse estudo:

- Garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos (Meta 2.4)
- Reduzir substancialmente o número de mortes e doenças causadas por produtos químicos perigosos, a poluição e a contaminação do ar, da água e do solo (Meta 3.9)
- Melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, aumentar substancialmente eficiência no uso da água, implementar a gestão integrada de recursos hídricos (Metas 6.3, 6.4, 6.5)
- Aumentar substancialmente a quota de energias renováveis e duplicar a quota global taxa de melhoria na eficiência energética (Metas 7.2 e 7.3)
- Promover um crescimento econômico sustentável, inclusivo e sustentável, pleno emprego produtivo e trabalho decente para todos (Meta 8)
- Melhorar a eficiência dos recursos globais no consumo e produção e esforçar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental (Meta 8.4)
- Atualizar a infraestrutura e as indústrias para torná-las sustentáveis, com maior eficiência no uso de recursos, tecnologias limpas e ambientalmente sustentáveis de processos industriais (Meta 9.4)
- Fornecer sistemas de transporte sustentáveis para todos (Meta 11.2)
- Garantir padrões sustentáveis de consumo e produção (Meta 12)

- Tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos (Meta 13)
- Conservar, proteger e utilizar de forma sustentável ecossistemas como oceanos, florestas ou terra (Meta 14 e 15)

Para que ocorra cumprimento da Agenda 2030² de acordo com a Figura 1, existe a necessidade de engajar e conscientizar os atores-chave representados pela sociedade civil, dos governos locais, do setor privado e também da academia. Importante que transcenda a mera relação de aspirações e boas intenções, de forma que a complexidade característica desta agenda seja objeto de diálogos e esforços conjuntos, e que os objetivos e princípios que os fundamentam sejam enraizados nas ações e condutas gerais de todos esses atores (Estratégia ODS, 2018).

FIGURA 1 – PIRÂMIDE DOS ODS.



Disponível em: <<http://www.stockholmresilience.org>>. Acesso em: 26 set. 2017 (adaptado).

Fonte: Disponível em: <<http://www.stockholmresilience.org>>. Acesso em 17 dez. 2018 (adaptado).

² O documento adotado na Assembleia Geral da ONU em 2015, “Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” é um guia para as ações da comunidade internacional nos próximos anos. E é também um plano de ação para todas as pessoas e o planeta que foi coletivamente criado para colocar o mundo em um caminho mais sustentável e resiliente até 2030.

Países de todo o mundo estão agora se preparando para implementar os ODS, o que proporciona a abertura de uma janela de oportunidade para mudar o curso nos próximos anos, o que é um enorme desafio e oportunidade ao mesmo tempo e será determinado pelas decisões de investimento e escolhas de políticas as quais a sociedade define agora (ROBINSON, 2006).

De acordo com Ritzén e Sandström (2017) o desenvolvimento sustentável exige mudanças disruptivas, inovações radicais e a capacidade de adaptar a inovação a um desenvolvimento sustentável, estendendo sua proposta de valor aos novos serviços e modelos de negócio. A forte integração entre os caminhos desejados para inovações sustentáveis com o desenvolvimento sustentável requer diminuição do uso de recursos consumidos pelos produtos e seus usos, enquanto ainda permite que empresas ou propriedades rurais gerem receitas nas entregas para o mercado.

2.3 ECONOMIA CIRCULAR

A Economia Circular é uma visão para um futuro desejado, tentando transformar modelos lineares cartesianos (produzir, distribuir, usar e dispor) em *loops* circulares. O conceito refere-se a uma economia que reduz o consumo de recursos e a geração de resíduos, reutiliza e recicla os resíduos ao longo dos processos de produção, distribuição e consumo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - EMF, 2016), considerando-os como coprodutos fonte de matéria-prima de alto valor.

O conceito da Economia Circular vem ganhando impulso desde o final dos anos 1970 (EMF, 2013). Outros autores, como Andersen (2007), Ghisellini *et al.* (2016) e Su *et al.* (2013) atribuem a introdução do conceito para Pearce e Turner (1989)³ descrevendo como os recursos naturais influenciam a economia, fornecendo insumos para produção e consumo, bem como servindo como um sumidouro de saídas na forma de resíduos. Estes autores investigam características abertas dos sistemas econômicos contemporâneos. Isso é influenciado por Boulding (1966)⁴ que

³ PEARCE, D., TURNER, R., 1989. *Economics of Natural Resources and the Environment*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

⁴ BOULDING, K., 1966, *The Economics of the Coming Spaceship Earth*. New York.

descreve a terra como um sistema fechado e circular com limitada capacidade de assimilação e, que inferiu, a partir dessa constatação, que a economia e o meio ambiente devem coexistir em equilíbrio (GEISSDOERFER *et al.*, 2016).

A compreensão contemporânea da Economia Circular e suas aplicações práticas para sistemas econômicos e processos industriais evoluíram para incorporar diferentes recursos e contribuições de uma variedade de conceitos que compartilham a ideia de ciclos (*loops*) fechados (EMF, 2016).

Algumas das influências teóricas mais relevantes para a formação do conceito de Economia Circular são o *cradle to cradle* (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2002)⁵, leis da ecologia (COMMONER, 1971)⁶, *loop* e economia de desempenho (STAHEL, 2010)⁷, projeto regenerativo (LYLE, 1994)⁸, ecologia industrial (GRAEDEL; ALLENBY, 1995)⁹, biomimética (BENYUS, 2002)¹⁰ e a economia azul (PAULI, 2010)¹¹.

A definição mais renomada foi formulada pela Fundação Ellen MacArthur, introduzindo a Economia Circular como “uma economia industrial que é restaurativa ou regenerativa por intenção e projeto” (EMF, 2013b). Da mesma forma, Geng e Doberstein (2008), com foco na implementação chinesa do conceito, descrevem a Economia Circular como a “realização de circuito fechado do fluxo de material em todo o sistema econômico”. Webster (2015) acrescenta que “uma economia circular é aquela que é restaurativa pelo projeto e que visa manter produtos, componentes e materiais em sua maior utilidade e valor, em todos os momentos”. Por conseguinte, Yuan e Moriguchi (2008) afirmam que “o núcleo da Economia Circular é o fluxo circular (fechado) de materiais através do uso de matérias-primas e energia através de múltiplas fases”. Bocken *et al.* (2016) categorizam as características da Economia Circular, definindo-a como “Estratégias de projeto e modelo de negócio que estão diminuindo, fechando e estreitando os *loops* de recursos”.

Geissdoerfer *et al.* (2017) define o termo Economia Circular como um sistema regenerativo em que a entrada de recursos e resíduos, emissões e perdas de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitamento dos

⁵ MCDONOUGH, W., BRAUNGART, M., 2002. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, first ed. North Point Press, New York.

⁶ COMMONER, B., 1971. *The Closing Circle: Nature, Man, and Technology*. Random House, New York.

⁷ STAHEL, W.R., 2010. *The Performance Economy*, second ed. Palgrave Macmillan, Basingstoke, New York.

⁸ LYLE, J.T., 1994. *Regenerative Design for Sustainable Development*. John Wiley & Sons, New York; Chichester.

⁹ GRAEDEL, T.E., ALLENBY, B.R., 1995. *Industrial Ecology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

¹⁰ BENYUS, J.M., 2002. *Biomimicry*. Harper Perennial, New York.

¹¹ PAULI, G.A., 2010. *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Paradigm publications.

ciclos de materiais e energia, reduzindo ou eliminando as saídas dos mesmos. Isto pode ser conseguido através de projeto duradouro, manutenção, reparação, reutilização, remanufatura, acondicionamento e reciclagem.

A Economia Circular sugere manter materiais disponíveis em vez de descartá-los, fechando assim o ciclo de materiais dentro do ciclo de vida do produto, a fim de reduzir o uso de recursos, a demanda de energia, reduzir perdas e eliminar o fim de vida de um recurso. Portanto, a EC permite a alteração de modelos de negócios tradicionais em modelos econômicos mais sustentáveis.

2.4 PENSAMENTO DE CICLO DE VIDA

Todos esses conceitos relacionados previamente, Economia Verde, Economia Verde Inclusiva e Economia Circular fornecem um “mapa mental” das formas de reduzir a complexidade da sustentabilidade, tentando organizar o pensamento e simplifica-lo, tornando o alcance da decisão mais viável.

Os principais objetivos do Pensamento de Ciclo de Vida são reduzir o uso de recursos de um produto e reduzir as emissões para o meio ambiente, bem como melhorar a sua condição de desempenho socioeconômico ao longo do seu ciclo de vida. Isto pode facilitar as ligações entre as dimensões econômica, social e ambiental dentro de uma organização e ao longo de toda a sua cadeia de valor (REMMEN *et al.*, 2007).

Apesar destes conceitos apontarem para aspectos específicos o importante é que a economia seja redesenhada sob o conceito da sustentabilidade. Diante destes fatos é importante enfatizar o conceito do Pensamento de Ciclo de Vida ou *Life Cycle Thinking* (LCT), apoiando e direcionando ao desenvolvimento sustentável, identificando prioridades de intervenções baseadas nas áreas de maiores oportunidades e na gestão de potenciais *trade-offs* (REMMEN *et al.*, 2007).

O pensamento sobre o ciclo de vida é essencial para o desenvolvimento sustentável incluindo os aspectos relacionados ao impacto ambiental, social e econômico de um produto durante todo o seu ciclo de vida. A responsabilidade ampliada do fabricante e as políticas integradas de produtos significam que os produtores podem ser responsabilizados por seus produtos do berço ao túmulo e,

portanto, devem desenvolver produtos que tenham melhor desempenho em todas as etapas do ciclo de vida do produto, conforme Figura 2 (REMMEN *et al.*, 2007).

FIGURA 2 – EXEMPLO DE MODELO DE PENSAMENTO DE CICLO DE VIDA.



FONTE: Remmen *et al.*, 2007, p.12.

As empresas devem desenvolver e realizar a entrega de proposições de valor para seus clientes, aumentando as receitas e diminuindo o consumo de recursos, modelos de negócios sustentáveis serão definidos como críticos e importantes para a sociedade pela ligação entre a entrega de sistemas de produtos e serviços que conduzam à redução do impacto ambiental (RITZÉN; SANDSTRÖM, 2017).

2.5 PECUÁRIA LEITEIRA

A Região Sul foi responsável por 37% de leite *in natura* do total produzido pelo país no ano de 2016 (SEAB, 2018). Este número expressivo se deve alguns fatores característicos da região tais como: clima ameno e favorável à produção leiteira, já que as raças maiores produtoras são de origem europeia; solos férteis e clima temperado, o que permite o cultivo de gramíneas e leguminosas altamente ricas em nutrientes e que propiciam altos ganhos na produtividade dos rebanhos,

genética diferenciada dos animais, uso de tecnologias de produção, reprodução e manejo diferenciado, cuidados com nutrição e sanidade, programas de incentivo à produção e assistência técnica da iniciativa pública e privada.

Segundo o Censo Agropecuário realizado pelo IBGE em 2018 foi estimado que o Brasil, em 2018, tinha em torno de 1,2 milhões de produtores de leite e a região Sul em torno de 350 mil. Na região Sul, a produção de leite é uma atividade típica da agricultura familiar (SEAB, 2018).

O estado do Paraná é o segundo maior produtor de leite do Brasil com 4,7 bilhões de litros por ano (IBGE, 2018), constituído de 110.000 produtores, dos quais 86% são pequenos produtores. O leite representa a cadeia produtiva mais importante para os agricultores familiares do estado (EMATER, 2018).

A atividade leiteira está presente em praticamente todos os municípios no estado do Paraná e gera forte impacto socioeconômico, pois é desenvolvida em grande parte por mão de obra familiar, favorece a fixação do homem no campo, promove a geração de grande número de empregos ao longo da cadeia produtiva, movimentando o fluxo de caixa das propriedades rurais, além de aquecer o comércio local (SILVA, A. *et al.*, 2016).

2.6 CARACTERÍSTICAS DOS DEJETOS BOVINOS

As vacas leiteiras pertencem ao grupo dos ruminantes, os quais são caracterizados por desenvolver fermentação pré-gástrica dos alimentos fibrosos na presença de microorganismos resultando deste processo ácidos graxos voláteis e biomassa bacteriana, com potencial de uso em energia e proteína (CABRAL, 2006).

Os resíduos finais da digestão destes animais são as fezes e urina, que contém quantidades significativas de nutrientes, restos de alimentos, cama dos animais, água de lavagem ou da chuva, solo, pêlos e outros elementos, que constituem os dejetos da produção. Para que os riscos de poluição e contaminação destes resíduos sejam mitigados é necessário o manejo e tratamento adequados (MACHADO, 2011).

Os fatores que influenciam a composição química e quantidade do esterco bovino são variáveis de acordo com a literatura, em razão de ser influenciada pela

espécie do animal, raça, idade, alimentação, tipo de tratamento aplicado ao esterco, entre outros fatores.

De acordo com Campos (1997), os principais parâmetros analisados para caracterização de dejetos são: pH, temperatura, nitrogênio total e amoniacal, potássio, fósforo total, cálcio, magnésio, sódio, óleos e graxas, demanda biológica de oxigênio (DBO) total e solúvel, demanda química de oxigênio (DQO) total e solúvel, sólidos totais fixos e voláteis, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos fixos e voláteis.

Em um sistema de produção animal a qualidade e quantidade das descargas e das águas residuárias dependem de fatores de manejo como o regime de confinamento e do tipo de instalação adotado para o confinamento do gado leiteiro (CAMPOS, 1997).

2.7 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E GASES DE EFEITO ESTUFA

As atividades agropecuárias ao mesmo tempo em que são potencialmente influenciadas pelas mudanças climáticas, também são consideradas contribuintes para a geração dos GEE, que por sua vez contribuirão para as mudanças climáticas. As emissões de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N_2O) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que contribuem para as mudanças climáticas e o aquecimento global têm sido geradas por diferentes práticas agropecuárias (LIMA, 2002).

No setor agropecuário, a produção de CH_4 ocorre em condições anaeróbicas associadas, principalmente, à fermentação entérica em ruminantes, lavouras de arroz inundado e tratamento anaeróbico de resíduos animais (AGOSTINETTO, 2002).

O CH_4 também é gerado durante o processo de incineração de biomassa (florestas, resíduos agrícolas etc.), onde CO e o CO_2 são resultados da queima de biomassa. A pirólise libera carbono da biomassa durante a combustão e acentua diretamente a liberação de carbono do solo, do qual a vegetação foi queimada. Efeitos indiretos do fogo podem levar a emissões de N_2O , NO_x e CH_4 (LIMA, 2002).

A fixação de carbono nos solos é uma função do balanço de carbono, cujas entradas ocorrem na forma de resíduos vegetais ou fertilizantes orgânicos. Por outro

lado, as liberações de carbono são decorrentes da mineralização de resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo e ocorrem na forma de CO_2 . Em condições anaeróbicas de solo, essas liberações de carbono ocorrem como CH_4 e podem ser medidas na forma de CO_2 equivalente. Todas as opções de manejo que aumentam as entradas de matéria orgânica nos solos e que diminuem a mineralização da matéria orgânica promovem a fixação de carbono nos solos (SADOWSKI *et al.*, 1996).

O N_2O é principalmente gerado das atividades relacionadas ao uso de fertilizantes nitrogenados, fixação biológica de nitrogênio, deposição de dejetos animais nos solos, mineralização da matéria orgânica adicionada, lixiviação de solos e da queimada de biomassa. As emissões de N_2O dos solos decorrem do processo microbiológico de desnitrificação a partir de nitrogênio mineral. O nível de concentração atmosférica desse gás tem aumentado ano a ano e nas últimas décadas sua taxa de crescimento é de 0,25% (KAISER *et al.*, 1998).

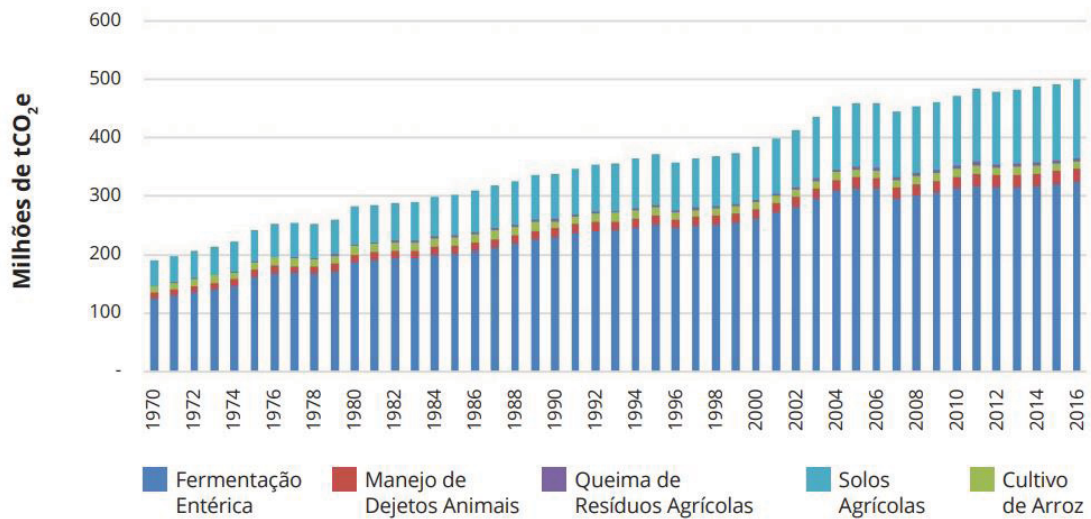
As emissões diretas da atividade agrícola e pecuária (uso de fertilizantes, manejo de dejetos animais etc.) representam a segunda maior fonte de emissões do Brasil, estimada em 499,3 milhões de toneladas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (22% do total) de acordo com SEEG (2018).

As emissões da agropecuária cresceram 163% desde 1970 e nos últimos quatro anos (2012-2016) estabilizou na faixa de 478 milhões a 490 milhões de t $\text{CO}_{2\text{eq}}$, GRÁFICO 5.

As emissões estimadas por uso de fertilizantes aumentaram em 15 vezes entre os anos de 1970 e 2016 apontado no Gráfico 5 (SEEG-BRASIL, 2018). Entre os anos de 2000 e 2016 o aumento no consumo de fertilizantes minerais determinou o crescimento proporcional das emissões de GEE em torno de 158%, seguindo o crescimento da produção de grãos resultado do aumento da produtividade.

Também foi possível, a partir do Gráfico 5, verificar que o consumo de adubos nitrogenados teve um aumento de 23% entre os anos de 2015 e 2016. Considerando as emissões divididas entre os subsetores da agricultura e da pecuária, verifica-se que 86% foram resultantes da produção animal (79% da bovinocultura de corte e leite), cerca de 6% da produção vegetal, 6% da aplicação de fertilizantes nitrogenados e os 7% restantes de outras fontes (SEEG-BRASIL, 2018).

GRÁFICO 5 – EMISSÕES ESTIMADAS DE CO₂ E POR SUBSETOR DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA DE 1970 A 2016.



FONTE: SEEG-BRASIL (2018).

No ano de 2010, como parte dos compromissos brasileiros estabelecidos no Acordo de Copenhague, e em consonância com a determinação da Política sobre Mudanças Climáticas, foi desenvolvido um programa de governo para ajudar na busca da sustentabilidade na área rural, o Programa ABC (Agricultura de Baixo Carbono). O programa financia para as atividades rurais, entre outras medidas, a implementação, a manutenção e o melhoramento de sistemas de tratamento de dejetos e resíduos oriundos de produção animal para geração de energia, o que inclui os biodigestores. (AMARAL *et al.*, 2012).

2.8 BIOGÁS

O biogás pode ser produzido a partir de diferentes fontes de biomassa, como resíduos vegetais, dejetos de animais, resíduos de alimentos, esgoto urbano, dentre outros. A produção do biogás ocorre a partir da decomposição de matéria orgânica por microrganismos em condições anaeróbias (ausência de oxigênio), processo biológico denominado de digestão anaeróbia (CASSINI, 2003).

O biogás resultante da digestão anaeróbia de resíduos sólidos ou líquidos constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui em muito na solução

dos problemas ambientais, pois, reduz potencialmente os impactos da fonte poluidora (BATISTA, 1981).

2.8.1 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é composto basicamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), em menor quantidade hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), ácido sulfídrico (H_2S) e outros de gases. A quantidade de biogás produzida e sua composição variam conforme a temperatura, o pH, a umidade, e a composição da matéria orgânica decomposta, denominado de substrato (CASSINI, 2003).

2.8.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS

O potencial energético do biogás está em função da quantidade de metano contida no gás que determina o seu poder calorífico. O teor de metano varia de 40 a 75% dependendo da fonte geradora (CASTANÓN, 2002).

Segundo Castanón (2002) a quantidade de biogás resultante da biodigestão corresponde a 2,0 a 4,0% do peso da matéria orgânica utilizada no processo.

A concentração de metano no biogás, que varia entre 50 e 75%, é o que determina sua capacidade energética, ou tecnicamente, seu poder calorífico.

O valor calórico do biogás, com um teor de metano entre 50 e 80%, permite que a energia produzida por um metro cúbico seja equivalente a um total de 4,95 a 7,92 kWh (COLDEBELLA, 2006).

2.9 BIOFERTILIZANTE

O processo resultante da biodigestão anaeróbia representa uma alternativa para o tratamento de resíduos, pela possibilidade de permitir a redução do potencial poluidor e de minimizar os riscos sanitários dos dejetos, além disso, promove a geração do biogás, utilizado como fonte de energia alternativa e permite a reciclagem do efluente, com o uso do biofertilizante. (AMARAL *et al.*, 2004).

O material resultante do biodigestor na fração líquida de cor escura rica em material orgânico é denominado de húmus, com grande poder fertilizante. Quando este material é aplicado no solo é possível melhorar as qualidades físicas, químicas e biológicas do solo e quando comparado aos fertilizantes sintéticos apresentam ganhos pois, não ressecam e não endurecem o solo, facilitando a penetração da água e do ar, reduzindo a susceptível à erosão. Já os fertilizantes minerais atuam de forma contrária e aumentam a susceptibilidade do solo à erosão (SGANZERLA, 1983).

Outro fator importante é a redução do fator C/N que promove benefícios à massa orgânica quando para fins agrícolas. A matéria orgânica após ser digerida sofre um incremento de nitrogênio e outros nutrientes devido à perda de carbono no processo sob a forma de metano e dióxido de carbono (LINDEMEYER, 2008).

2.10 INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE

A metodologia mais utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de GEEs é o *GHG Protocol*. Trata-se de uma iniciativa *multi-atores* envolvendo ONGs, governos e outras entidades que foram reunidas pelo *World Resources Institute* (WRI) e o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), em 1998.

2.10.1 PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL

A metodologia do *GHG Protocol* é compatível com as normas da *International Organization for Standardization* (ISO) e com as metodologias de quantificação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC). As diretrizes definidas pelo IPCC "*IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*" apresentam metodologias para estimativa de emissões e remoções de GEEs.

O CO₂ é o principal GEE, embora outros gases também contribuam para o efeito estufa, esses gases são regulados pelo Protocolo de Quioto e precisam ser equiparados ao CO₂ para se chegar a uma unidade comum (CO₂eq.). Isso ocorre

porque o CO₂ é o gás com maior concentração em relação aos demais GEEs e, para isso, usa-se o *Global Warming Potential* (GWP) num horizonte de 100 anos (SENAI, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Com base no levantamento realizado pelo IBGE (2014), Figura 3, os municípios que apresentam as maiores produções em escala nacional de leite são Castro e Carambeí. As principais bacias leiteiras do Estado do Paraná estão nas regiões Oeste, Sudoeste e Centro-Oriental, nos Núcleos de Cascavel, Toledo, Francisco Beltrão, Pato Branco e Ponta Grossa.

A atividade leiteira está presente em praticamente todos os municípios no estado do Paraná e gera forte impacto socioeconômico, pois é desenvolvida em grande parte por mão de obra familiar, favorece a fixação do homem no campo, promove a geração de grande número de empregos ao longo da cadeia produtiva, movimentam o fluxo de caixa das propriedades rurais, além de aquecer o comércio local. (SILVA *et al.*, 2016).

O escopo do estudo considerou a produção pecuária leiteira no estado do Paraná e Brasil no ano de 2015 de acordo com os dados do IBGE para efeito de cálculos e projeções de cenários desenvolvidos.

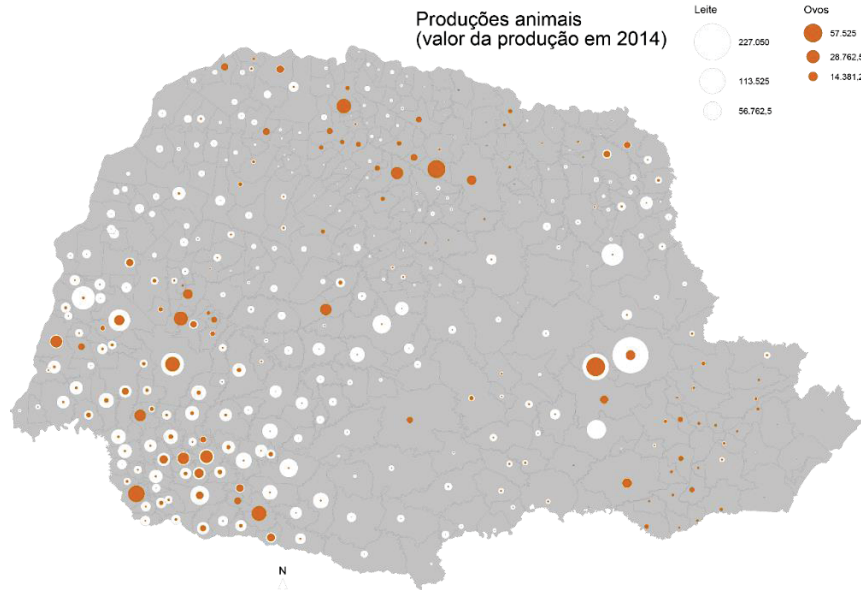
3.2 MÉTODOS

Para avaliar a viabilidade econômica, seus benefícios e bem como a consolidação da aplicação do conceito de Economia Circular no modelo de negócio da pecuária leiteira no estado do Paraná, foram calculados os seguintes fatores referentes a produção de dejetos do rebanho pecuário de gado leiteiro do Paraná, disponibilidade de macronutrientes diária e anual deste dejetos gerado anualmente e seu valor energético pela substituição do dejetos. A partir dos valores obtidos de quantidade de dejetos gerados foi calculado o valor energético do biogás e a estimativa de mitigação de GEE pelo manejo dos animais incluindo a Fermentação Entérica e Manejo de dejetos.

As emissões de GEE evitadas pelo uso do biofertilizante e geração do biogás foram calculadas pelos métodos da Ferramenta de Cálculo do *GHG Protocol*

Agrícola e guia do IPCC. Os dados coletados foram utilizados a partir de informações de relatórios setoriais nacionais e estaduais.

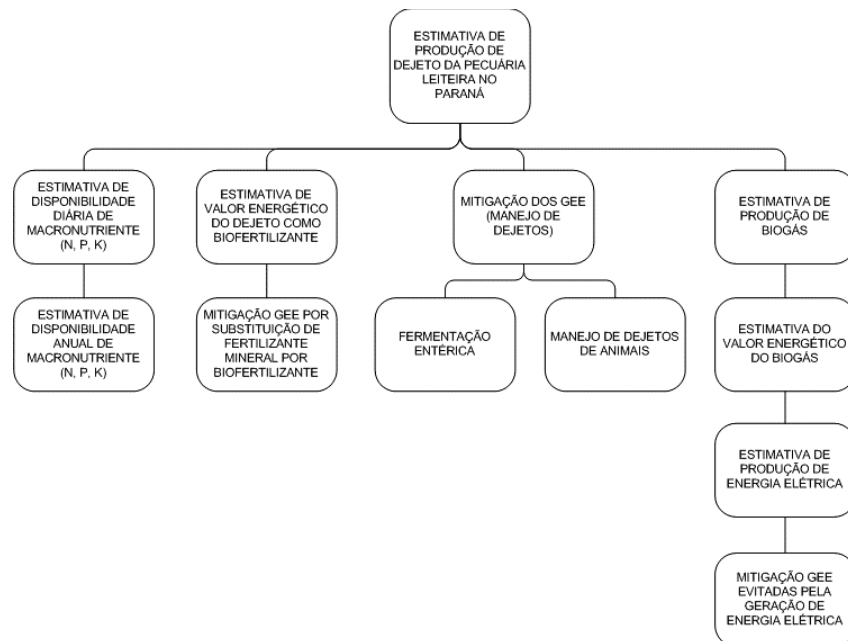
FIGURA 3 – MAIORES REGIÕES PRODUTORAS DE LEITE NO ESTADO DO PARANÁ.



FONTE: THÉRY; HAURESKO, (2017)

A Figura 4 apresenta o fluxograma das fases de cálculos realizados no estudo.

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DE METODOLOGIA.



FONTE: O autor (2018).

3.2.1 Estimativa da produção de esterco

Para a determinação de produção diária estimada de esterco foi considerado o peso vivo médio do bovino no estudo e o valor médio de produção do esterco (VM) de acordo com Santos e Nogueira (2012) representada na Equação 1.

$$P_{est} = PV \times VM \quad (1)$$

Onde:

P_{est} = Produção diária de esterco ($kg \text{ dia}^{-1}$);

PV= Peso vivo do animal (kg);

VM= Valor médio de produção de esterco (kg).

A quantidade de dejetos produzidos varia com o peso vivo dos animais. A água ingerida influencia a produção de urina, variando a quantidade de dejetos líquidos conforme Salomon (2007).

3.2.2 Estimativa de disponibilidade diária de macronutrientes

A quantidade de nutrientes retornados ao solo pelas fezes e urina dos animais confinados é influenciada pela qualidade e quantidade de forragem consumida e da necessidade do animal. Quantidade significativa destes nutrientes contidos nas fezes dos animais pode ser potencialmente reciclada no solo numa forma mais prontamente disponível conforme Siqueira (2005).

A disponibilidade diária de macronutrientes (N, P, K), presentes no esterco bovino foi calculada de acordo com as Equações 2, 3 e 4 estabelecidas por Siqueira (2005) e Santos e Nogueira (2012).

$$DN = PE \times PN \quad (2)$$

$$DP = PE \times PP \quad (3)$$

$$DK = PE \times PK \quad (4)$$

Onde:

DN = Disponibilidade de nitrogênio presente no esterco bovino ($kg \text{ dia}^{-1}$);

DP = Disponibilidade de fósforo presente no esterco bovino ($kg \text{ dia}^{-1}$);

DK = Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino ($kg \text{ dia}^{-1}$);

PN= Teores totais de nitrogênio presente no esterco bovino;

PP= Teores totais de fósforo presente no esterco bovino;

PK = Teores totais de potássio presente no esterco bovino;

PE= Produção de esterco ($kg \text{ dia}^{-1}$);

3.2.3 Estimativa do valor energético de substituição do esterco

O valor energético de substituição do esterco foi calculado considerando a disponibilidade diária de macronutrientes (N, P, K) contidos no esterco bovino e os coeficientes energéticos associados à produção de fertilizantes minerais.

O valor energético de substituição do esterco foi calculado de acordo com a Equação 5 referenciada por dos Santos e Nogueira (2012).

$$VEest(T) = DN(CEM N) \times a + DP \times (CEM P) \times a + DK \times (CEM K) \times a \quad (5)$$

Onde:

$VEest(T)$ = Valor energético total estimado do esterco ($MJ \text{ ano}^{-1}$);

DN = Disponibilidade de nitrogênio presente no esterco bovino ($kg \text{ dia}^{-1}$);

$CEM N$ = Coeficiente energético médio utilizado na produção de macronutriente nitrogênio ($MJ \text{ kg}^{-1}$);

DP = Disponibilidade de fósforo presente no esterco bovino ($kg \text{ dia}^{-1}$);

$CEM P$ = Coeficiente energético médio utilizado na produção de macronutriente fósforo ($MJ \text{ kg}^{-1}$);

DK = Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino ($kg \text{ dia}^{-1}$);

$CEM K$ = Coeficiente energético médio utilizado na produção de macronutriente potássio ($MJ \text{ kg}^{-1}$);

a = número de dias no ano (365).

3.2.4 Estimativa de disponibilidade anual de macronutrientes

A disponibilidade anual de macronutrientes (N, P, K) presentes no esterco bovino foi calculada de acordo com Santos (2012) através das Equações 6, 7 e 8.

$$DAN = DMN \times n \times a \quad (6)$$

$$DAP = DMP \times n \times a \quad (7)$$

$$DAK = DMK \times n \times a \quad (8)$$

Onde:

DAN = Disponibilidade anual de nitrogênio presente no esterco bovino ($kg \text{ ano}^{-1}$);

DMN = Disponibilidade média diária de nitrogênio presente no esterco bovino;

DAP = Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino ($kg \text{ ano}^{-1}$);

DMP = Disponibilidade média diária de fósforo presente no esterco bovino;

DAK = Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino ($kg \text{ ano}^{-1}$);

DMK = Disponibilidade média diária de potássio presente no esterco bovino;

n = quantitativo nacional de gado bovino;

a = número de dias no ano (365).

3.2.5 Biogás

3.2.5.1 Valor energético do biogás proveniente da biodigestão de dejetos bovinos

O conteúdo energético do biogás a partir do esterco bovino foi estimado tendo como parâmetros os valores do poder calorífico inferior (PCI) de 3.877,48 kcal kg⁻¹ ou 16.235 kJ kg⁻¹, conforme Avellar (2001 apud Costa, 2006). O conteúdo energético do biogás foi calculado segundo a Equação 9.

$$VEest = PCI \times Pbiogás \quad (9)$$

Onde:

VEest = Valor energético estimado do biogás (kJ kg⁻¹);

PCI = Poder calorífico inferior do biogás proveniente do esterco bovino (kJ kg⁻¹);

Pbiogás = Produção diária de biogás (kg dia⁻¹).

3.2.6 Estimativa da mitigação de gases de efeito estufa pelo manejo dos dejetos

Baseando-se nos estudos de Martins-Costa (2009) e da WRI (*World Resources Institute*) BRASIL e Universidade de Campinas - UNICAMP (2016) foi calculada a estimativa dos impactos ambientais na emissão de gases de efeito estufa (GEE) devido ao manejo dos dejetos, onde foram calculadas as emissões de GEE dos rebanhos leiteiros. O estudo quantifica de forma simplificada as emissões de metano e óxido nitroso decorrentes da fermentação entérica e manejo dos dejetos de bovinos nas propriedades rurais.

A Equação 10 foi utilizada para o cálculo das emissões de GEE do rebanho bovino leiteiro (MARTINS-COSTA, 2009; WRI BRASIL; UNICAMP, 2016).

$$M \text{ GEE Gado Leiteiro} = \sum \frac{(GEEca)}{n} \quad (10)$$

Onde:

M GEE Gado Leiteiro = Mitigação total de GEE (CO₂ eq);

$\sum(GEEca)$ = Mitigação de GEE do rebanho bovino leiteiro;

n = número de categorias animais do rebanho bovino leiteiro.

3.2.7 Fermentação entérica

O cálculo de emissões devido à fermentação entérica é realizado a partir da Equação 11, (MARTINS-COSTA, 2009; WRI BRASIL; UNICAMP, 2016).

$$CH_4 \text{ Fermentação} = NA \times FE \text{ } CH_4 \text{ Fermentação} \quad (11)$$

Onde:

$CH_4 \text{ Fermentação}$ = emissão de metano associada à fermentação entérica (kg de CH_4 ano⁻¹);

NA = número de animais;

$FE \text{ } CH_4 \text{ Fermentação}$ = fator de emissão de CH_4 para fermentação entérica (kg de CH_4 cabeça⁻¹ ano⁻¹).

3.2.8 Manejo de dejetos de animais (exceto animais em pastagem)

As equações utilizadas para calcular as emissões de metano e óxido nítrico do manejo de dejetos provenientes de animais, exceto pastagens, se encontram abaixo nas Equações 12 e 13 (MARTINS-COSTA, 2009; WRI BRASIL; UNICAMP, 2016).

$$CH_4 \text{ Dejetos} = NA \times EF \text{ } CH_4 \text{ Dejetos} \quad (12)$$

Onde:

$CH_4 \text{ Dejetos}$ = emissão do metano associada ao manejo de dejetos (kg CH_4 ano⁻¹);

NA = número de animais (por rebanho);

$EF \text{ } CH_4 \text{ Dejetos}$ = fator de emissão de CH_4 para manejo de dejetos (kg CH_4 cabeça⁻¹ ano⁻¹).

$$N_2O \text{ Dejetos} = NA \times N_{ex} \times (1 - FRAC_{PRP}) \times EF_3 \quad (13)$$

Onde:

$N_2O \text{ Dejetos}$ = emissão de óxido nítrico associada ao manejo de dejetos (Kg N_2O -N kg de dejetos depositado⁻¹);

N_{ex} = total de N excretado anualmente por animal de cada categoria (Kg N animal⁻¹ ano⁻¹);

$FRAC_{PRP}$ = fração do N total excretado pelos animais diretamente em pastagens (%);

EF_3 = fator de emissão (%);

NA = número de animais (por rebanho).

Para a obtenção do balanço geral dos GEE, foi realizada a conversão dos fluxos de CH_4 e N_2O em CO_{2eq} , conforme metodologia adaptada de Oliveira (2010). Os cálculos foram feitos considerando o Potencial de Aquecimento Global (PGA) ou GWP (*Global Warming Potential*). De acordo com MCT (2011), o GWP agrega as emissões relatadas em unidades de dióxido de carbono equivalentes em um período de tempo de 100 anos. Os fluxos de CH_4 e N_2O em CO_{2eq} foram estimados

utilizando as Equações 14 e 15, (MARTINS-COSTA, 2009; WRI BRASIL; UNICAMP,2016).

$$CO_{2\text{ eq}}(N_2O) = N_2O \times RPM_{N_2O} \times PAG_{N_2O} \quad (14)$$

$$CO_{2\text{ eq}}(CH_4) = CH_4 \times RPM_{CH_4} \times PAG_{CH_4} \quad (15)$$

Onde:

$CO_{2\text{ eq}}(N_2O)$ = quantidade de N_2O em $CO_{2\text{ eq}}$;

$CO_{2\text{ eq}}(CH_4)$ = quantidade de CH_4 em $CO_{2\text{ eq}}$ (21);

N_2O = fluxo de N_2O na situação;

CH_4 = fluxo de CH_4 na situação;

RPM_{N_2O} = relação entre o peso molecular do N_2O e do nitrogênio (44/28);

RPM_{CH_4} = relação entre o peso molecular do CH_4 e do carbono (16/12);

PAG_{N_2O} = potencial de aquecimento global do N_2O em relação ao CO_2 (310);

PAG_{CH_4} = potencial de aquecimento global do CH_4 em relação ao CO_2 (21).

3.2.9 Estimativa da mitigação de GEE decorrente da substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante

As Equações 16, 17 e 18 foram utilizadas para calcular o potencial de mitigação de GEE decorrentes da substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante, considerando o quantitativo do rebanho bovino paranaense, de acordo com os dados do inventário do IBGE para o ano de 2015.

$$M_{GEE\ FQ} = FE_{GEE\ N} \times DMN \times n \times a \quad (16)$$

$$M_{GEE\ FQ} = FE_{GEE\ P} \times DMP \times n \times a \quad (17)$$

$$M_{GEE\ FQ} = FE_{GEE\ K} \times DMK \times n \times a \quad (18)$$

Onde:

$M_{GEE\ FQ}$ = Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante ($Gg\ CO_{2\text{ eq}}\ \text{ano}^{-1}$);

$FE_{GEE\ N}$ = Fator de emissão de GEE na produção de nitrogênio ($kg\ CO_{2\text{ eq}}\ kg^{-1}$);

DMN = Disponibilidade média diária de nitrogênio presente no esterco bovino;

$FE_{GEE\ P}$ = Fator de emissão de GEE na produção de fósforo ($kg\ CO_{2\text{ eq}}\ kg^{-1}$);

DMP = Disponibilidade média diária de fósforo presente no esterco bovino;

$FE_{GEE\ K}$ = Fator de emissão de GEE na produção de potássio ($kg\ CO_{2\text{ eq}}\ kg^{-1}$);

DMK = Disponibilidade média diária de potássio presente no esterco bovino;

n = quantitativo nacional de gado bovino;

a = número de dias no ano (365).

3.2.10 Estimativa de produção de energia elétrica

A energia elétrica gerada através do biogás foi determinada utilizando a metodologia proposta pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (2002), conforme Equação 19, que considera um rendimento de 30% para o grupo gerador.

$$E_{elétrica} = E \times \eta_{gerador} \times PCI_{Biogás} \quad (19)$$

Onde:

$E_{elétrica}$ = Energia elétrica gerada através do biogás em biodigestores;

E = Potencial energético do biogás;

$\eta_{gerador}$ = Rendimento do grupo gerador;

$PCI_{Biogás}$ = Poder calorífico inferior: 16.235 kJ m^{-3} .

3.2.11 Estimativa das emissões de GEE evitadas pela geração de energia elétrica através do biogás

A quantificação das emissões de GEE evitadas pela geração de energia elétrica utilizando o biogás foi estimada considerando o fator de emissão de CO_2 para a produção de energia elétrica. Para se determinar o fator de emissão de GEE na geração de energia elétrica foi consultado o site do MCT (2011), onde foram encontrados os fatores médios de emissão de CO_2 ($\text{tCO}_2 \text{ MWh}^{-1}$), da margem de operação, que reflete a intensidade das emissões de CO_2 da energia despachada na margem, para geração de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional, dos meses de janeiro a agosto de 2011.

A Equação 20, adaptada de Salomon (2007), demonstra como foi realizado o cálculo do quantitativo de emissões de GEE evitadas pela geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo dos dejetos do gado bovino leiteiro.

$$CO_{2eq} = EE \times FEM \quad (20)$$

Onde:

CO_{2eq} = Total de CO_2 eq. Evitado ($\text{tCO}_{2eq} \text{ ano}^{-1}$);

EE = Total de Energia Elétrica Gerada ($\text{MWh} \text{ ano}^{-1}$);

FEM = Fator de Emissão Médio ($\text{tCO}_{2eq} \text{ MWh}^{-1}$).

Neste estudo foram aplicados os métodos considerados na Ferramenta de Cálculo do GHG *Protocol* Agrícola, os quais seguem as diretrizes utilizadas pelo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, Relatório de Referência da Coordenação Geral de Mudanças Globais, Ministério da Ciência e Tecnologia, publicado no ano de 2010 e que segue o relatório do IPCC *Guidelines* 2006.

Para adequação à realidade brasileira foram utilizados os fatores de emissão *Tier 2* e, nos casos em que as métricas *Tier 2* não estavam disponíveis, foram utilizados fatores de emissão *Tier 1*, baseados principalmente no IPCC *Guidelines* 2006.

Apesar de desenvolvido para uso em inventários nacionais, o conceito dos *tiers* também pode ser aplicado a estimativas regionais ou no nível do produtor rural. No estudo buscou-se adotar sempre que possível o *Tier 2*, ou seja, dados específicos a nível dos estados brasileiros. Somente na ausência de informações específicas, adotou-se os valores *default* do IPCC (*Tier 1*).

A Tabela 3 representa as variáveis, equações, dados calculados, dados citados e referências utilizados no trabalho.

TABELA 3 – EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA CÁLCULO DE BIOMASSA RESIDUAL.

Esterco bovino					
Parâmetro	Equação	Nº	Variáveis	Dado	Referência
Estimativa da produção de esterco	$Pest = PV \times VM$	1	$Pest$	Calculado	Santos e Nogueira (2012)
			PV	Coletado	
			VM	Coletado	
Estimativa de disponibilidade diária de macronutrientes					
Disponibilidade de nitrogênio no esterco bovino	$DN = PE \times PN$	2	DN	Calculado	Siqueira (2005) e Santos e Nogueira (2012).
			PE	Coletado	
			PN	Coletado	
Disponibilidade de fósforo no esterco bovino	$DP = PE \times PP$	3	DP	Calculado	Siqueira (2005) e Santos e Nogueira (2012).
			PE	Coletado	
			PP	Coletado	
Disponibilidade de potássio no esterco bovino	$DK = PE \times PK$	4	DK	Calculado	Siqueira (2005) e Santos e Nogueira (2012).
			PE	Coletado	
			PK	Coletado	
Estimativa do valor energético de substituição do esterco	$VEest(T) = DN \times (CEM N) \times a + DP \times (CEM P) \times a + DK \times (CEM K) \times a$	5	$VEest(T)$	Calculado	Santos e Nogueira (2012)
			a	Coletado	
			DN	Coletado	
			$CEM N$	Coletado	
			DP	Coletado	
			$CEM P$	Coletado	
			DK	Coletado	
$CEM K$	Coletado				
Estimativa de disponibilidade anual de macronutrientes	$DAN = DMN \times n \times a$	6	DAN	Calculado	Santos (2012)
			DMN	Coletado	
			n	Coletado	
			a	Coletado	
Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino	$DAP = DMP \times n \times a$	7	DAP	Calculado	Santos (2012)
			DMP	Coletado	
			n	Coletado	
			a	Coletado	
Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino	$DAK = DMK \times n \times a$	8	DAK	Calculado	Santos (2012)
			DMK	Coletado	
			n	Coletado	
			a	Coletado	
Valor energético estimado do biogás	$VEest = PCI \times Pbiogás$	9	$VEest$	Calculado	Avellar (2001 apud Costa, 2006)
			PCI	Coletado	
			$P_{biogás}$	Coletado	
Mitigação total de GEE	$M GEE Gado Leiteiro = \sum \frac{(GEEca)}{n}$	10	$MGEE_{Gado Leiteiro}$	Calculado	Martins-Costa (2009) WRI BRASIL e UNICAMP (2016)
			$GEEca$	Coletado	
			n	Coletado	

Parâmetro	Equação	Nº	Variáveis	Dado	Referência
Fermentação entérica	$CH_4 \text{ Fermentação} = NA \times FE \text{ } CH_4 \text{ Fermentação}$	11	$CH_4 \text{ Fermentação}$	Calculado	Martins-Costa (2009) e WRI BRASIL e UNICAMP (2016)
			NA	Coletado	
			$FE \text{ } CH_4 \text{ Ferm}$	Coletado	
Manejo de dejetos de animais					
Emissão do metano associada ao manejo de dejetos	$CH_4 \text{ Dejetos} = NA \times EF \text{ } CH_4 \text{ Dejetos}$	12	$CH_4 \text{ Dejetos}$	Calculado	Martins-Costa (2009) e WRI BRASIL e UNICAMP (2016)
			NA	Coletado	
			$EF \text{ } CH_4 \text{ Dej}$	Coletado	
Emissão de óxido nitroso associada ao manejo de dejetos	$N_2O \text{ Dejetos} = NA \times N_{ex} \times (1 - FRAC_{PRP}) \times EF_3$	13	$N_2O \text{ Dejetos}$	Calculado	Martins-Costa (2009) e WRI BRASIL e UNICAMP (2016)
			NA	Coletado	
			N_{ex}	Coletado	
			$FRAC_{PRP}$	Coletado	
			EF_3	Coletado	
Quantidade de N ₂ O em CO ₂ eq	$CO_{2eq}(N_2O) = N_2O \times RPM \text{ } N_2O \times PAG \text{ } N_2O$	14	$CO_{2eq}(N_2O)$	Calculado	Martins-Costa (2009) e WRI BRASIL e UNICAMP (2016)
			N_2O	Coletado	
			$RPM \text{ } N_2O$	Coletado	
			$PAG \text{ } N_2O$	Coletado	
Quantidade de CH ₄ em CO ₂ eq	$CO_{2eq}(CH_4) = CH_4 \times RPM \text{ } CH_4 \times PAG \text{ } CH_4$	15	$CO_{2eq}(CH_4)$	Calculado	Martins-Costa (2009) e WRI BRASIL e UNICAMP (2016)
			CH_4	Coletado	
			$RPM \text{ } CH_4$	Coletado	
			$PAG \text{ } CH_4$	Coletado	
Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante - (N)	$M \text{ } GEE \text{ } FQ = FE \text{ } GEE \text{ } N \times DMN \times n \times a$	16	$M \text{ } GEE \text{ } FQ$	Calculado	Oliveira (2010)
			$FE \text{ } GEE \text{ } N$	Coletado	
			DMN	Coletado	
			n	Coletado	
			a	Coletado	
Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante - (P)	$M \text{ } GEE \text{ } FQ = FE \text{ } GEE \text{ } P \times DMP \times n \times a$	17	$M \text{ } GEE \text{ } FQ$	Calculado	Oliveira (2010)
			$FE \text{ } GEE \text{ } P$	Coletado	
			DMP	Coletado	
			n	Coletado	
			a	Coletado	
Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante - (K)	$M \text{ } GEE \text{ } FQ = FE \text{ } GEE \text{ } K \times DMK \times n \times a$	18	$M \text{ } GEE \text{ } FQ$	Calculado	Oliveira (2010)
			$FE \text{ } GEE \text{ } K$	Coletado	
			DMK	Coletado	
			n	Coletado	
			a	Coletado	
Energia elétrica gerada através do biogás em biodigestores	$E_{elétrica} = E \times \eta_{gerador} \times PCI_{Biogás}$	19	$E_{elétrica}$	Calculado	CETESB (2002)
			E	Coletado	
			$\eta_{gerador}$	Coletado	
			$PCI_{Biogás}$	Coletado	

Parâmetro	Equação	Nº	Variáveis	Dado	Referência
Total de CO ₂ eq. Evitado	$CO_{2eq} = EE \times FEM$	20	CO_{2eq}	Calculado	Salomon (2007)
			EE	Coletado	
			FEM	Coletado	

FONTE: O autor (2018).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ESTERCO

A Tabela 4 apresenta a produção de dejetos em relação ao peso vivo (PV) de diversos animais e principalmente do objeto de estudo a quantificação da biomassa residual (fezes e urina) dos bovinos leiteiro conforme apresentado por Oliveira (1993).

TABELA 4 – ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DIÁRIA DE DEJETOS DE DIVERSOS ANIMAIS.

Resíduo	Unidade	Gado (leite)	Gado (corte)	Frango (corte)	Suínos	Ovinos
Líquidos	% dia (PV*)	9,4	4,6	6,6	5,1	3,6
Sólidos	kg animal ⁻¹ dia ⁻¹	10 - 15	10 - 15	0,12 – 0,18	2,3-2,5	0,5 – 0,9

* Refere-se ao peso vivo do animal

FONTE: OLIVEIRA (1993) apud SALOMON (2007).

O peso médio do gado bovino leiteiro foi considerado de 600 kg animal⁻¹, considerando o estudo de Diaz (2006) e aplicado a equação 1, tendo como referência que 1 kg de animal gera 0,07 kg de dejetos (Santos e Nogueira, 2012), a produção média diária de esterco foi de 42 kg animal⁻¹ dia⁻¹, o que estabelece a produção de 15.330 kg animal⁻¹ ano⁻¹. O número de animais produzidos no ano de 2015 foi coletado a partir do inventário do IBGE para o ano de 2015. A quantidade anual de esterco produzido no Brasil e Paraná está representada na Tabela 5.

TABELA 5 – PRODUÇÃO ANUAL DE ESTERCO BOVINO DA PECUÁRIA LEITEIRA CONFINADA.

	Nº de animais (gado leiteiro)	Produção de esterco (t ano ⁻¹)
Paraná	1.641.009	2,52 x 10 ⁷
Brasil	21.751.073	33,3 x 10 ⁷

FONTE: Adaptado de IBGE (2015).

4.2 ESTIMATIVA DE VALOR ENERGÉTICO DE SUBSTITUIÇÃO DO ESTERCO

Para o cálculo do valor energético de substituição do esterco, foram considerados os valores médios dos coeficientes energéticos para a produção de

fertilizantes minerais, sendo considerados diversos estudos de análises energéticas, conforme estudo de Santos e Nogueira (2012) apresentado na Tabela 6.

TABELA 6 – COEFICIENTES ENERGÉTICOS (CE) MÉDIOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES MINERAIS.

Fertilizantes	CE médio (MJ kg ⁻¹)
Nitrogênio (N)	62,58
Fósforo (P ₂ O ₅)	12,33
Potássio (K ₂ O)	9,18

FONTE: Santos e Nogueira (2012).

A Tabela 7 apresenta os valores energéticos estimados para os macronutrientes do esterco bovino. Foram utilizados os seguintes parâmetros: peso vivo (PV) dos bovinos leiteiros; produção de esterco; conteúdo em macronutrientes; e, valor médio dos coeficientes energéticos utilizados para a produção de fertilizantes minerais, considerando a substituição pelo biofertilizante.

Os percentuais de nitrogênio, fósforo e potássio presentes no esterco bovino foram considerados respectivamente 0,53%, 0,21% e 0,43% de acordo com Santos e Nogueira (2012). Os cálculos foram realizados utilizando as equações 2, 3, 4 e 5.

TABELA 7 – VALOR ENERGÉTICO ESTIMADO PARA OS MACRONUTRIENTES DO ESTERCO BOVINO, CONSIDERANDO A SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL POR BIOFERTILIZANTE.

Peso do animal (kg)	Produção de esterco ^a (kg animal ⁻¹ dia ⁻¹)	Disponibilidade em nutrientes (kg dia ⁻¹)			VE Total ^e (MJ ano ⁻¹)
		N ^b	P ^c	K ^d	
600	42	0,223	0,088	0,181	6.086,64

^a Valor obtido pela equação 1

^b Valor obtido pela equação 2

^c Valor obtido pela equação 3

^d Valor obtido pela equação 4

^e Valor obtido pela equação 5

FONTE: O autor (2018).

4.3 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A Tabela 8, a seguir, apresenta valores médios de produtividade de biogás obtidos a partir de diferentes resíduos de dejetos animais conforme estudo de Oliveira (2001).

TABELA 8 – POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DIFERENTES RESÍDUOS ORGÂNICOS DE ANIMAIS.

Material	Produtividade de Biogás (m ³ kg ⁻¹)
Esterco bovino	0,04
Esterco suíno	0,08
Esterco de aves	0,05

FONTE: Oliveira (2001).

A Tabela 9 demonstra a economia de energia fóssil pela substituição do esterco bovino da pecuária leiteira no estado do Paraná. Valores calculados pelas equações 6, 7, 8.

TABELA 9 – ECONOMIA DE ENERGIA FÓSSIL PELA USO DO ESTERCO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA, NO PARANÁ.

Fertilizantes	Valor médio dos macronutrientes ^a	Produção de macronutrientes ^b (kg ano ⁻¹)	CE médio (MJ kg ⁻¹)	Economia de energia fóssil ^c (GJ ano ⁻¹)
Nitrogênio (N)	0,223	1,33x10 ⁸	62,58	8,3x10 ⁶
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,088	5,28x10 ⁷	12,33	6,5x10 ⁵
Potássio (K ₂ O)	0,181	1,08x10 ⁸	9,18	9,9x10 ⁵
Total				1,0x10⁷

^a Valores obtidos pelas equações 2,3 e 4.

^b Valores obtidos pelas equações 6,7 e 8.

^c Calculado pela multiplicação de Produção de macronutrientes pelo CE médio respectivo de cada macronutriente.

FONTE: O autor (2018).

4.4 VALOR ENERGÉTICO DO BIOGÁS PROVENIENTE DA BIODIGESTÃO DE DEJETOS DE BOVINOS

A Tabela 10 apresenta o valor energético estimado do biogás para o rebanho bovino paranaense, considerando a densidade do biogás de 0,784 kg m⁻³. A composição média do biogás em 55% CH₄ e 45% CO₂ e o poder calorífico inferior (PCI) foi definido como 3.877,48 kcal kg⁻¹ ou 16.235 kJ kg⁻¹, conforme Avellar (2001 apud Costa, 2006). Os cálculos foram efetuados de acordo com a equação 9.

TABELA 10 – VALOR ENERGÉTICO (VE) DO BIOGÁS DE ACORDO COM A PRODUÇÃO DIÁRIA DE ESTERCO BOVINO.

Peso do animal (kg)	Produção total de esterco ^a (kg.dia ⁻¹)	Produção de biogás* (m ³ .dia ⁻¹)	Produção de biogás (kg.dia ⁻¹)	Valor Energético estimado ^b (MJ.ano ⁻¹)
600	42	1,68	1,32	7.804,96

^a Valor obtido pela equação 1

^b Valor obtido pela equação 9

* Considerando volume de biogás produzido por kg de dejetos como 0,04 m³ para bovinos de leite. (WINROCK INTERNATIONAL BRASIL, 2008)

FONTE: O autor (2018).

4.5 ESTIMATIVA DA MITIGAÇÃO DE GEE DECORRENTE DA SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL

O fator de emissão de GEE na produção de fertilizantes minerais, foi coletado a partir dos dados da Seabra (2008), conforme a Tabela 11.

TABELA 11 – EMISSÃO DE GEE NA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES MINERAIS.

Fertilizante	Fator de emissão (kg CO _{2eq} kg ⁻¹)
Nitrogênio (N)	3,97
Fósforo (P ₂ O ₅)	130
Potássio (K ₂ O)	0,71

FONTE: Adaptado de EBAMM (2005) apud Seabra (2008).

A Tabela 12 demonstra a estimativa anual das emissões de GEE evitadas; o fator de emissão de GEE na produção de fertilizantes minerais; e, a disponibilidade anual de N, P, K do esterco referente ao rebanho bovino leiteiro no estado do Paraná. As emissões anuais evitadas na substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante foram obtidas a partir das equações 14,15, 16, 17 e 18, sendo considerado 365 dias para efeito de cálculo.

A substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante evitaria, anualmente, a emissão de aproximadamente 7,474 Gg CO_{2eq} ano⁻¹.

O uso da tecnologia de biodigestores anaeróbios possibilita o suprimento energético de propriedades agrícolas, os quais utilizam como matéria-prima os

resíduos originados de cultivos agrícolas e, principalmente, esterco de animais confinados. Esta alternativa tecnológica possibilita, além da produção de biogás, produção de um resíduo líquido contendo alguns nutrientes essenciais às plantas e saneamento do meio ambiente, evitando a contaminação das águas por dejetos da pecuária.

TABELA 12 – SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES ANUAIS EVITADAS PELA SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL PELO BIOFERTILIZANTE, NO PARANÁ.

Fertilizantes	Produção Macronutrientes ^a (kg.ano ⁻¹)	Fator de Emissão (kg CO ₂ eq. .kg ⁻¹)	Emissões anuais evitadas ^b (Gg CO ₂ eq. ano ⁻¹)
Nitrogênio (N)	1,33x10 ⁸	3,97	0,53
Fósforo (P ₂ O ₅)	5,28x10 ⁷	130	6,87
Potássio (K ₂ O)	1,08x10 ⁸	0,71	0,08
Total			7,474

^a Valores obtidos pelas equações 6,7 e 8.
^b Valores obtidos pela multiplicação de Produção de Macronutrientes por Fator de Emissão.

FONTE: O autor (2018).

Nesse contexto, órgãos internacionais procuram incentivar o estudo de viabilidade do uso de sistemas integrados de produção de energia e agropecuária. Esses sistemas permitem, da melhor forma possível, utilizar os recursos específicos de cada agrossistema e criar, sempre que possível, circuitos de retroalimentação (*closed loop*) entre diversas atividades da produção agropecuária. A adoção desses sistemas integrados promove a transformação de resíduos em coprodutos, portanto, transformando os modelos econômicos lineares em modelos de Economia Circular no campo.

A aplicação do biofertilizante permite ao produtor rural uma redução expressiva em seus custos de produção, e também apresenta benefício ambiental por meio de compostagem, ou seja, pela reciclagem de matéria orgânica e nutrientes que o produtor efetua e que de outro modo seriam desperdiçados.

4.6 BENEFÍCIOS DECORRENTES DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO

Os fatores de emissão de metano (CH₄) para fermentação entérica da pecuária (FECH₄-FERMENTAÇÃO) são apresentados na Tabela 13 e Tabela 14. Esses fatores de emissão são *Tier 2* e *Tier 1* respectivamente.

TABELA 13 – FATORES DE EMISSÃO DE METANO PARA FERMENTAÇÃO ENTÉRICA DE GADO DE CORTE, MACHOS E JOVENS, FÊMEAS E VACAS LEITEIRAS.

Estado	Fator de emissão (kg CH ₄ cabeça ⁻¹ ano ⁻¹)			
	Gado de Corte			Vaca leiteira
	Macho	Jovem	Fêmea	
Paraná	58	45	82	69

FONTE: MARTINS-COSTA, 2009; WRI BRASIL; UNICAMP, 2016.

TABELA 14 – FATORES DE EMISSÃO DE METANO POR FERMENTAÇÃO ENTÉRICA POR OUTRAS CATEGORIAS DE ANIMAIS.

Categoria	Fator de emissão (kg CH ₄ cabeça ⁻¹ ano ⁻¹)
Suínos	1
Asininos	10
Muare	10
Bubalinos	55
Caprinos	5
Equinos	18
Ovinos	5

FONTE: MARTINS-COSTA, 2009; WRI BRASIL; UNICAMP, 2016.

A Tabela 15 demonstra a mitigação de GEE pela biodigestão anaeróbica do esterco bovino. As emissões totalizadas das atividades de manejo dos dejetos, produção de energia elétrica e substituição do fertilizante mineral.

Os resultados para as atividades descritas na Tabela 15 foram obtidas através das equações 19 e 20.

Neste estudo foi considerada a eficiência do gerador em 30%, sendo que para um 1 m³ de biogás obteve-se a produção de 1,12 kWh diários, (SANTOS, I.A., MORAIS, M.A., 2009). Com a utilização dos biodigestores no setor de bovinocultura será possível a produção anual de 1,87 TWh ano⁻¹ para o estado do Paraná.

TABELA 15 – TOTAL DAS EMISSÕES EVITADAS PELA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO NO ESTADO DO PARANÁ POR ANO.

Atividades	Gg CO _{2eq} Evitadas	%
Manejo dos Dejetos	3,51	0,67
Produção de Energia Elétrica	510,35	97,89
Substituição do Fertilizante Mineral	7,47	1,43
Total	521,33	100,00

FONTE: O autor (2018).

A substituição do fertilizante mineral, pelo biofertilizante oriundo do coproduto da biodigestão anaeróbica do rebanho bovino leiteiro do estado do Paraná, foi responsável pelo volume de emissões de GEE evitadas, representando cerca de 1,43% do total mitigado, o manejo dos dejetos corresponderia por cerca de 0,67% do total das emissões evitadas e a produção de energia elétrica seria responsável por 97,89% do total da mitigação de GEE.

O valor totalizado de emissões evitadas pela biodigestão anaeróbica dos dejetos bovinos de 521,33 Gg de CO₂ eq ano⁻¹, o que corresponde as emissões totais de CH₄ e N₂O.

O conhecimento do valor energético do esterco, da pecuária leiteira no estado do Paraná contribui para a compreensão do seu valor econômico, social e ambiental (valor em sustentabilidade). Para que esta matéria-prima deixe de ser vista como resíduo e passe a ser entendida como coproduto da pecuária de alto valor em sustentabilidade, com cadeia de produtiva e de valor sustentável viável técnica e economicamente. A Tabela 16 apresenta os principais resultados encontrados nesse estudo.

TABELA 16 – BENEFÍCIOS POTENCIAIS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO CONSIDERANDO O REBANHO LEITEIRO DO ESTADO DO PARANÁ E BRASIL.

Parâmetros analisados	Paraná	Brasil
Economia de energia de origem fóssil (GJ ano ⁻¹)	1,0 x10 ⁷	1,3 x10 ⁸
Disponibilidade de N, P, K (t ano ⁻¹)	2,95x10 ⁵	3,90x10 ⁶
Produção de biogás (m ³ ano ⁻¹)	1,01x10 ⁹	13,33x10 ⁹
Produção de energia elétrica (TWh ano ⁻¹)	1,87	24,89
Total de emissões evitadas (Gg de CO ₂ eq ano ⁻¹)	521,33	7.821,19
Energia contida no biogás (GJ ano ⁻¹)	1,0x10 ⁷	1,70 x 10 ⁸

FONTE: O autor (2018).

4.7 BENEFÍCIOS DA TRANSFORMAÇÃO DOS DEJETOS BOVINOS EM COPRODUTOS

4.7.1 ASPECTOS AMBIENTAIS

Os dejetos gerados na pecuária correspondem as fezes e urina dos animais, água desperdiçada dos bebedouros e de higienização, resíduos de ração caracterizados como uma fonte rica de matéria orgânica, nutrientes e também por alguns agentes patógenos (vetor de doenças infecciosas aos seus hospedeiros) que, quando não tratados adequadamente podem contaminar o solo e as águas superficiais e subterrâneas e se tornarem vetores para doenças socioambientais.

O acúmulo dos dejetos de maneira inadequada pode criar um ambiente favorável para proliferação de vetores transmissores de doenças, como por exemplo, as moscas que estão entre os principais agentes transmissores de mastite entre as novilhas, o que pode comprometer a saúde destes animais e causar danos socioeconômicos. Para prevenir esta situação indesejada aconselha-se a manutenção do conforto dos animais e higiene nos locais de estabulação, por meio do manejo adequado dos dejetos, principalmente no verão quando ocorre uma maior proliferação destes vetores.

Outro problema está relacionado aos odores provenientes da disposição não adequada dos dejetos bovinos. Em sistemas de confinamento de bovinos, gases nocivos podem provocar danos à comunidade através da emissão de odores indesejáveis e problemas de saúde animal e humana. O problema se potencializa na medida em que as áreas urbanas estão em constante crescimento se aproximando da zona rural.

Problemas relacionados às questões de Legislação Ambiental, também, são aplicados às propriedades rurais, principalmente quando ocorrem lançamentos de água residuárias em um corpo receptor. Dentre as diversas leis de proteção ambiental existem as que poderiam ser aplicadas às propriedades rurais que aplicam sistemas de lançamento de seus efluentes em um curso d'água, destaque para: Resolução CONAMA n° 020 de 18 de junho de 1986, Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938/81) e Lei de Crimes Ambientais (Lei no 9.605).

O produtor rural que percebe valor nos dejetos bovinos como um coproduto da sua atividade produtiva, pode obter retorno mensurável dos investimentos

realizados com a biodigestão anaeróbica. Ao introduzir o conceito de reciclagem de nutrientes através do uso de biofertilizantes pode se constatar as melhoras promovidas nas características do solo e na produtividade de culturas na propriedade rural.

Investimento em tecnologias e processos mais limpos e na geração de energia renovável determinam um custo ambiental ao produtor, que representa os gastos realizados para evitar problemas ambientais. Importante salientar que serão considerados custos os dejetos tratados como resíduos e descartados. Entretanto, quando os dejetos são utilizados como matéria-prima, coprodutos, representam um ativo no modelo baseado na Economia Circular.

O custo ambiental é um fator que deve ser considerado cada vez mais em toda a cadeia do setor produtivo do agronegócio, principalmente na pecuária leiteira. Fatores de produção na pecuária leiteira podem provocar impactos sobre o ambiente gerados, por exemplo, por situações de desmatamento e queimadas em pastagens e florestas, utilização de agrotóxicos, erosão, degradação e compactação do solo, poluição por dejetos animais e contaminação das águas. E as consequências resultantes destes impactos podem ocasionar a extinções de espécies nativas, diminuição da biodiversidade, entre outros.

O aproveitamento dos dejetos produzidos pela bovinocultura leiteira em processos como a biodigestão anaeróbia é eficiente para o manejo sanitário e para atender as exigências do licenciamento ambiental necessário. Para que as propriedades rurais permaneçam nas suas atividades sem problemas referentes a legislação e multas de infrações ambientais, elas devem atender as legislações vigentes, inclusive as ambientais referentes aos resíduos sólidos da produção do gado bovino leiteiro.

Portanto, a alternativa de uso da tecnologia de biodigestão anaeróbica nas propriedades rurais de pecuária leiteira permite impedir que os resíduos sejam despejados *in natura*, sem tratamento adequado e com alto impacto ao meio ambiente. Dessa forma, solos e rios serão preservados e ainda haverá redução de emissão de GEE e contribuições para a mitigação dos problemas climáticos associados à produção de gado bovino leiteiro e da agricultura, bem como contribuir para os compromissos brasileiros ao Acordo do Clima de Paris.

A gestão dos dejetos sob as premissas da obrigação legal permite evitar custos de contaminação e multas, possibilitando o produtor adotar o modelo de EC

por meio de métodos inovadores, tecnológicos e economicamente mais eficazes a sustentabilidade da produção rural e seu desenvolvimento sustentável.

4.7.2 ASPECTOS ECONÔMICOS

O líquido obtido no processo de biodigestão anaeróbica pode ser aplicado como fertilizante orgânico, ou seja, biofertilizante, pois possui muitos nutrientes que podem ser utilizados para a adubação da pastagem, resultando em um ganho financeiro para o agricultor devido à redução na compra de fertilizantes minerais.

O biogás gerado por sua vez deve ser drenado para ser queimado (o que o transforma em CO₂, gás com menor potencial de aquecimento global (GWP) que o CH₄) e utilizado para geração de energia.

Portanto, os biofertilizantes e o biogás definidos como coprodutos evitam emissões oriundas de combustíveis fósseis para geração de energia e emissões oriundas dos produtos químicos utilizados para o preparo do solo para a pastagem e outras culturas agrícolas.

Tanto a redução de fertilizantes minerais quanto a geração de energia elétrica (EE) por meio da biodigestão dos coprodutos da produção de gados bovinos leiteiros, atendem aos critérios do programa mundial MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) e poderão gerar créditos de carbono ao proprietário rural, melhorando seus resultados econômicos e contribuindo para as minimizações de emissões de GEE.

4.7.3 ASPECTOS SOCIAIS

Os custos de operação dizem respeito ao trabalho necessário para manter o biodigestor em operação, ou seja, coleta, transporte e abastecimento do biodigestor. Este trabalho de gestão é diário e exige geralmente duas pessoas para realizarem a operação.

A implementação de tecnologia de biodigestão nas propriedades rurais pode ser considerado como custo de oportunidade de trabalho e potencial capacidade de geração direta de empregos no setor agropecuário. É preciso estimular a

empregabilidade mediante incentivos e ainda assegurar a manutenção e geração de novas oportunidades de emprego, implementando medidas geradoras de renda e de liquidez no setor primário.

A agricultura familiar poderá ser beneficiada pela conversão de dejetos de animais em coprodutos de novas cadeias produtivas e cadeias de valor. O incremento da renda a partir da venda de energia elétrica, gerada pelo biogás e pela compostagem do material residual; a capacitação de técnicos e agricultores familiares; o incremento na organização produtiva de agricultores por meio de cooperativas e associações; e, no aumento do número de biodigestores implantados podem ser considerados benefícios sociais do modelo de economia circular.

Os benefícios alcançados à saúde humana, devido a manutenção ou melhora da qualidade ambiental, tanto sob os critérios de melhoria da qualidade do ar, redução de contaminantes do solo e da água, e por consequência diminuição de vetores de doenças sociais e endêmicas, melhorando o bem-estar e disponibilidade do homem. Como consequência tem-se maior produtividade e maior resultado econômico e lucro, atendendo aos princípios do *triple bottom line*¹² e dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS).

4.8 PRINCIPAIS IMPACTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DA APLICAÇÃO DO CONCEITO DE EC NA PECUÁRIA LEITEIRA

Para este trabalho foram identificados os principais impactos positivos e negativos para os aspectos ambientais, econômicos e sociais da aplicação do conceito de Economia Circular em propriedades rurais com atividade de pecuária leiteira.

¹² O conceito do *Triple Bottom Line*, surgido do estudo realizado por Elkington (1994), no inglês, é conhecido por 3P (People, Planet e Profit); no português, seria PPL (Pessoas, Planeta e Lucro). Segundo esse conceito, para ser sustentável uma organização ou negócio deve ser financeiramente viável, socialmente justo e ambientalmente responsável.

4.8.1 ASPECTOS AMBIENTAIS

A Tabela 17 apresenta os valores para o Paraná e Brasil das emissões evitadas pelo uso dos dejetos como biofertilizantes e economia de energia fóssil por adoção desta prática.

TABELA 17 – CÁLCULO DE BENEFÍCIO AMBIENTAL DO USO DOS DEJETOS COMO BIOFERTILIZANTES, EMISSÕES ANUAIS EVITADAS.

	Paraná			Brasil		
	N	P	K	N	P	K
Macronutrientes						
Valor Médio Macronutrientes	0,223	0,088	0,181	0,223	0,088	0,181
Produção de Macronutrientes (kg.ano⁻¹)	1,33x10 ⁸	5,28x10 ⁷	1,08x10 ⁸	1,75x10 ¹⁰	6,93x10 ⁹	1,42x10 ¹⁰
CE (MJ.kg⁻¹)	62,58	12,33	9,18	62,58	12,33	9,18
Economia de Energia Fóssil (GJ.ano⁻¹)	8,3x10 ⁶	6,5x10 ⁵	9,9x10 ⁵	1,1x10 ⁹	8,5x10 ⁷	1,3 x 10 ⁸
Total (GJ.ano⁻¹)	1,0x10⁷			1,3 x10⁹		
Fator de Emissão	3,97	130	0,71	3,97	130	0,71
Emissões Anuais Evitadas (Gg CO₂eq)	0,53	6,87	0,08	69,414	900,62	10,072
Total (Gg CO₂eq)	7,474			980,116		

FONTE: O autor (2018).

Na Tabela 18 são apresentadas as emissões evitadas pelo uso da biodigestão anaeróbica de biomassa residual nas atividades de manejo dos dejetos, produção de energia elétrica e substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante para o Paraná e Brasil.

TABELA 18 –TOTAL DAS EMISSÕES EVITADAS PELA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO ESTERCO BOVINO NO ESTADO DO PARANÁ E NO BRASIL POR ANO.

Atividades	Paraná		Brasil	
	Gg CO ₂ eq Evitadas	%	Gg CO ₂ eq Evitadas	%
Manejo dos Dejetos	3,51	0,67	46,53	0,58
Produção de Energia Elétrica	510,35	97,89	6.764,55	86,87
Substituição do Fertilizante Mineral	7,47	1,43	980,11	12,53
Total	521,33	100,00	7.821,19	100,00

FONTE: O autor (2018).

Segue matriz com os aspectos ambientais e respectivos impactos positivos e negativos, conforme Quadro 1.

QUADRO 1 – ASPECTOS AMBIENTAIS.

ASPECTOS AMBIENTAIS	IMPACTO POSITIVO	IMPACTO NEGATIVO
Disposição adequada de dejetos	Evita a contaminação dos recursos edáficos e hídricos (superficiais e profundos)	Gestão incorreta de quantificação pode gerar vazamentos do sistema e contaminações ambientais; Podem determinar área insalubre de trabalho.
Geração de biofertilizante a partir de dejetos para substituição de fertilizantes químicos e utilização de biofertilizante nas lavouras	Evita custos de aquisição de fertilizantes, Aplicação do conceito de reciclagem de nutrientes através do uso de biofertilizantes pode se constatar as melhoras promovidas nas características do solo e na produtividade de culturas na propriedade rural. Evita o processo de erosão de solo promovido pelo fertilizante mineral.	Variações climáticas podem determinar baixos rendimentos nas produções de Biogás e biofertilizante Sistemas de produção de baixa eficiência podem permitir a reintrodução dos elementos químicos poluentes e degradantes da capacidade de produtiva dos recursos naturais.
Evitar a geração de passivos ambientais	Atender a Resolução do CONAMA com relação aos resíduos gerados na propriedade para evitar multas e infrações.	De acordo com BURTON (1997) em vários países ocorrem danos ambientais pelo armazenamento e o uso inadequado de dejetos, o que motivou a implantação de medidas reguladoras. Medidas estas destinadas a preservação e recuperação do solo e das águas de superfícies e subterrâneas.
Aproveitamento dos dejetos produzidos pela bovinocultura	Eficiente para o manejo sanitário e para atender as exigências do licenciamento ambiental necessário no estado do Paraná para bovinocultura.	A falta de licenciamento impede a liberação de crédito bancário.

FONTE: O autor, 2018.

4.8.2 ASPECTOS ECONÔMICOS

O fertilizante mineral escolhido como fonte de nitrogênio foi o sulfato de amônio (20% N), como fonte de fósforo foi escolhido o superfosfato simples (16% de P_2O_5) e como fonte de potássio utilizou-se o cloreto de potássio (58% K_2O) para o estudo.

Como ferramenta para obtenção do valor fertilizante do biofertilizante produzido pela biodigestão anaeróbia considerou-se com base no volume de biofertilizante gerado, e sua concentração média dos teores dos três principais macronutrientes presentes em sua composição (N, P e K), sem considerar seu valor biológico e seu valor como condicionador da estrutura do solo.

Os valores considerados das fontes de fertilizantes minerais foram de R\$ 775,00 a tonelada de sulfato de amônio, R\$ 750,00 a tonelada de superfosfato simples e de R\$ 1.250,00 a tonelada de cloreto de potássio de acordo com valores praticados no estado do Paraná, em janeiro de 2019 conforme a fonte: <http://informaecon-fnp.com/insumos/8>).

A geração de biofertilizante convertido a partir de dejetos para o Paraná e Brasil e respectivo custo evitado na aquisição parcial de fertilizante mineral encontra-se na Tabela 19.

TABELA 19 – SIMULAÇÃO DE CUSTO EVITADO PELA SUBSTITUIÇÃO DO FERTILIZANTE MINERAL PELO BIOFERTILIZANTE NO PARANÁ E BRASIL.

Paraná			
	Nitrogênio (N)	Fósforo (P_2O_5)	Potássio (K_2O)
Produção macronutrientes ($kg.ano^{-1}$)	$1,33 \times 10^8$	$5,28 \times 10^7$	$1,08 \times 10^8$
Produção macronutrientes ($ton.ano^{-1}$)	$1,33 \times 10^5$	$5,28 \times 10^4$	$1,08 \times 10^5$
Custo Evitado (R\$.tonelada ⁻¹) ^a	775,00	750,00	1.250,00
Custo Evitado Total (R\$)	103.331.013,69	39.621.752,05	135.217.090,34
Custo Evitado Total Anual (R\$)	≈ 278 milhões		
Brasil			
	Nitrogênio (N)	Fósforo (P_2O_5)	Potássio (K_2O)
Produção macronutrientes ($kg.ano^{-1}$)	$1,75 \times 10^{10}$	$6,93 \times 10^9$	$1,42 \times 10^{10}$
Produção macronutrientes ($ton.ano^{-1}$)	$1,75 \times 10^7$	$6,93 \times 10^6$	$1,42 \times 10^7$
Custo Evitado (R\$.tonelada ⁻¹) ^a	775,00	750,00	1.250,00
Custo Evitado Total (R\$)	13.550.675.980,40	5.195.937.837,89	17.732.168.811,84
Custo Evitado Total Anual (R\$)	≈ 36 trilhões		

^a Custo da tonelada dos fertilizantes minerais praticado no estado do Paraná conforme referência em <http://informaecon-fnp.com/insumos/8>

FONTE: O autor (2018).

Importante destacar a necessidade de cuidados específicos na avaliação do solo com a aplicação do biofertilizante por apresentar grande variabilidade de resposta do solo, em consequência de complexas interações dos fatores e processos das práticas de manejo da fertilidade e das culturas e dos sistemas de cultivo (SILVA, 2009).

Considerando o cenário de uso dos dejetos da produção bovina leiteira no estado do Paraná, os custos evitados em biofertilizantes (≈ 278 milhões) e custo de aquisição de energia elétrica como ganho econômico para as 110.000 propriedades rurais do estado, é possível estimar um ganho econômico na ordem de R\$ 2.528,82 de reais por propriedade ao ano.

A Tabela 20 apresenta os resultados referentes a energia elétrica gerada pela conversão de dejetos no Paraná e Brasil e custos evitados com adoção do modelo de economia circular no sistema. Também é apresentado a conversão em óleo diesel que seria necessário para produzir a mesma quantidade de energia elétrica gerada pelo reaproveitamento do dejetos.

TABELA 20 – CÁLCULO DE BENEFÍCIO ECONÔMICO DO USO DOS DEJETOS COMO BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA.

	Paraná	Brasil
Rebanho (número de animais)	1.641.009	21.751.073
Produção de dejetos (kg.ano⁻¹)	$2,52 \times 10^7$	$3,33 \times 10^8$
Produção de dejetos (m³.ano⁻¹)	$1,01 \times 10^9$	$1,33 \times 10^{10}$
Produção de biogás (m³ ano⁻¹)	$1,01 \times 10^9$	$13,33 \times 10^9$
Conversão de biogás em bioóleo (l ano⁻¹)	$0,55 \times 10^9$	$7,33 \times 10^9$
Produção de energia elétrica (TWh ano⁻¹)	1,87	24,89
Custo de aquisição de energia elétrica *(R\$)	$0,63 \times 10^{12}$	$8,46 \times 10^{12}$

* Valor considerado de tarifa de energia elétrica na área rural de R\$ 0,34 kWh.

Referência: Energias renováveis na área rural da região sul do Brasil / Carlos Antônio Ferraro Biasi... [et al.]. – Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2018. 202 p. : il.

FONTE: O autor (2018).

Segue matriz com os aspectos econômicos e respectivos impactos positivos e negativos, Quadro 2.

QUADRO 2 – ASPECTOS ECONÔMICOS.

ASPECTOS ECONÔMICOS	IMPACTO POSITIVO	IMPACTO NEGATIVO
Agregar valor ao dejetos (coproduto)	Criação de cadeia de valor econômica e produtiva no setor da pecuária leiteira através da utilização dos dejetos como coprodutos.	Não identificado.
Geração de biofertilizantes	Redução de custos para aquisição de fertilizantes sintéticos e melhora na produtividade da lavoura.	A aplicação de biofertilizantes é necessário a implantação do manejo regionalizado do solo e das culturas resultando em alterações benéficas ou não ao sistema solo-planta. Complexidade do sistema pelas variáveis relacionadas ao solo, histórico da área, tipo de cultura, tecnologia implantada e condições climáticas da área (SILVA, 2009).
Geração de créditos de carbono	Desenvolvimento de projetos dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) para geração de receita.	Adequação do produtor rural aos trâmites legais para conversão em créditos de carbono.
Incremento de renda pela geração de bioenergia	Geração de energia renovável e excedente podendo ser comercializado.	Adequação a legislação vigente do setor elétrico.

FONTE: O autor (2018)

4.8.3 ASPECTOS SOCIAIS

Foram considerados como base os dados no modelo de biodigestor tubular ou canadense, confeccionado em manta de PVC flexível que apresenta o princípio de projeto simplificado e menor custo de instalação no meio rural e menor geração de lodo (SILVA, 2009). Este modelo permite que seja operado sem a necessidade de implantação de agitadores e aquecedores do substrato pelas medias de temperatura no Brasil.

Considerando propriedades com uma unidade de produção intensiva de bovinos destinados à produção de leite, com um plantel de 100 vacas alojadas.

Dimensionamento seguido foi a geração de um sistema de biodigestão, para cada propriedade, com capacidade de armazenamento de biomassa padrão com tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30 dias.

A adoção de TRH, em biodigestores tubulares de manta de PVC flexível, entre 20 e 30 dias contemplam a maioria dos projetos instalados no Brasil de acordo com Oliveira (1993).

Quando respeitado o TRH (tempo de retenção hidráulica) ideal, o biofertilizante encontra-se estabilizado e pronto para ser disposto no solo sem riscos ambientais.

Uma vez que com estes TRH espera-se um tratamento satisfatório, com diminuição superior a 70% de carga orgânica, quanto maior o TRH menor a margem de erro para redução da carga orgânica esperada e alterações nos volumes dos dejetos. Pode-se admitir aumentos no volume dos biodigestores entre 10 e 20% como uma margem de segurança nos projetos.

Para o cenário em estudo foi considerado o sistema de uma propriedade rural com 100 animais, o volume útil de biodigestor de 350 m³, TRH estabelecido em 30 dias.

Com relação a mão-de-obra para o processo de biodigestão da análise de cenário foi computado o consumo anual de dois operadores para o sistema dimensionado para um turno de trabalho. A operação do sistema usualmente consiste no manejo tradicional do dejetos, limpeza periódica das instalações, irrigação (drenagem do efluente tratado), retirada de areia e do lodo biológico dos tanques de aeração.

Na Tabela 21 é apresentado a estimativa dos valores do benefício da adoção dos biodigestores na recuperação e gestão adequados dos dejetos bovinos da pecuária leiteira no Paraná e Brasil na geração de oportunidades de emprego.

TABELA 21 – EMPREGOS GERADOS COM UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES PARA APROVEITAMENTO DE DEJETOS.

	Paraná	Brasil
Rebanho (número de animais)	1.641.009	21.751.073
Produção de dejetos (kg.ano⁻¹)	2,52 x 10 ⁷	3,33 x 10 ⁸
Produção de dejetos (m³.ano⁻¹)	1,01 x.10 ⁹	1,33 x.10 ¹⁰
Produção de dejetos (m³.mês⁻¹)	8,39 x.10 ⁷	1,11 x.10 ⁹
Quantidade de biodigestores para total de dejetos gerados (unidades)*	239.587	3.175.657
Total de empregos gerados**	119.794	1.587.828

* Considerando propriedade rural com biodigestor com capacidade de 350m³.

**Considerando 2 operadores por biodigestor de 350m³.

FONTE: O autor (2018).

Segue matriz com os aspectos sociais e respectivos impactos positivos e negativos, Quadro 3.

QUADRO 3 – ASPECTOS SOCIAIS.

ASPECTOS SOCIAIS	IMPACTO POSITIVO	IMPACTO NEGATIVO
Geração direta de emprego	Manutenção e geração de empregos no campo. A operação de biodigestores requer no mínimo 2 operadores.	Custo de oportunidade de trabalho, necessidade de qualificar a mão de obra.
Implementação de biodigestores nas propriedades rurais	Incentivo a agricultura familiar de novas fontes de renda, evita o êxodo rural	Avaliação técnico-econômica para implementação de sistema. Custo de investimento (Linhas de Crédito)
Adequação de tratamento dos dejetos bovinos	Sistemas de confinamento de bovinos, gases nocivos podem provocar danos à comunidade através da emissão de odores indesejáveis e problemas de saúde animal e humana. O problema se potencializa na medida que as áreas urbanas estão em constante crescimento se aproximando da zona rural. Evitar a	Gasto de água para limpeza de estábulos e movimentação de dejetos.

	proliferação de vetores transmissores de doenças, como por exemplo, as moscas que estão entre os principais agentes transmissores de mastite entre as novilhas, o que pode comprometer a saúde destes animais e causar danos socioeconômicos.	
Adoção do modelo de Economia Circular na pecuária leiteira	Incremento na organização produtiva de agricultores por meio de cooperativas e associações; e, no aumento do número de biodigestores implantados podem ser considerados benefícios sociais do modelo de EC.	Avaliar capacidade mínima para implementação de biodigestor na propriedade rural, em determinadas situações necessidade de criação de cluster para uso coletivo de biodigestor.

FONTE: O autor (2018).

Os benefícios sociais alcançados com a implementação de biodigestores para reaproveitamento dos dejetos refletem na saúde humana, devido a manutenção ou melhora da qualidade ambiental, tanto sob os critérios de melhoria da qualidade do ar, redução de contaminantes do solo e da água e por consequência diminuição de vetores de doenças sociais e endêmicas, melhorando o bem-estar e disponibilidade do homem.

Impactos ambientais positivos são atingidos pela implementação do conceito de reciclagem de nutrientes com o uso de biofertilizantes contribui para melhoras promovidas nas características do solo e na produtividade de culturas na propriedade rural.

A adoção do princípio da economia circular nas propriedades rurais evita que os dejetos sejam despejados *in natura*, sem tratamento adequado e com alto impacto ao meio ambiente. Dessa forma, solos e rios serão preservados e ainda haverá redução de emissão de GEE e contribuições para a mitigação dos problemas climáticos associados à produção de gado bovino leiteiro e da agricultura, bem como contribuir para os compromissos brasileiros ao Acordo do Clima de Paris.

E em termos econômicos permite a geração de empregos diretos, estimula a economia no campo através da comercialização de biofertilizante, geração de bioenergia e comercialização de créditos de carbono pelo programa mundial MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo).

O pensamento de ciclo de vida aplicado na prática das atividades da pecuária leiteira possibilita a ampliação da cadeia de valor e da cadeia produtiva com o uso do biogás e biofertilizantes. Com este modelo de negócio empregado possibilita a ampliação do ciclo de vida do dejetos animal e conseqüentemente a geração de novos produtos para as novas cadeias de valor e cadeia produtiva.

Como consequência tem-se maior produtividade e maior resultado econômico e lucro, devido aos custos evitados e possibilidade de comercialização de produções excedentes de biogás e biofertilizantes, bem como comercialização de créditos de carbono, atendendo aos princípios do *Triple Bottom Line* e dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS).

5. CONCLUSÃO

A adoção de modelos de Economia Circular por meio do emprego de sistemas de biodigestão dos dejetos da produção de bovinos leiteiros considerando o estado do Paraná com a estimativa de geração de $2,52 \times 10^7$ t.ano⁻¹ de dejetos bovinos que contribuiriam com a redução de energia de origem fóssil na ordem de $1,3 \times 10^8$ GJ ano⁻¹, geração de nutrientes na ordem de: $2,95 \times 10^5$ t ano⁻¹, produção de biogás na ordem de $1,01 \times 10^9$ m³ ano⁻¹ e o total de emissões evitadas na ordem de 521,33 Gg de CO_{2eq} ano⁻¹

A bovinocultura é responsável por grande parte das emissões de GEE, sendo necessária a adoção de medidas mitigadoras para essas emissões. Para a atividade de pecuária leiteira intensiva como estratégia destaca-se a construção de biodigestores para o tratamento adequado dos dejetos gerados nas propriedades rurais, que, além de evitarem a emissão de GEE, podem ser uma fonte de renda adicional para os produtores. Os resultados encontrados corroboram com as expectativas de redução da emissão de GEE no estado do Paraná com a adoção de biodigestores.

A utilização dos biodigestores anaeróbios em propriedades rurais possibilita tornar as atividades agropecuárias mais sustentáveis com a conversão dos dejetos em coprodutos nutricionais e energéticos. Em relação os aspectos ambientais, permite a redução de emissão de gases poluentes, manejo adequado de dejetos evitando a poluição de solos e águas. Nos aspectos sociais, gera empregos, oportunidades de novos negócios para a agricultura familiar, melhoria da qualidade de vida e bem-estar dos produtores rurais e contribui para a melhoria da saúde e bem-estar da população urbana; e entre aspectos econômicos, geração de energia na forma de biogás e produção de biofertilizante, com seu potencial para adubação orgânica em substituição a insumos químicos, custos evitados para aquisição de energia, distribuição de energia excedente, fertilizantes e potencial geração de créditos de carbono.

Este trabalho desenvolvido foi teórico e os resultados são oriundos do processo de simulação.

6. RECOMENDAÇÕES

Aplicar a metodologia de estudo de modelo de negócio da economia circular para o segmento da suinocultura.

Avaliar o estudo com outras raças de vacas leiteiras e realizar comparação com a raça holandesa.

Avaliar outras fontes de obtenção de energia limpa para implementação na agricultura familiar, como por exemplo, fotovoltaica e a eólica, e comparar com a biodigestão anaeróbica.

Projetar cenários futuros baseados em expectativas de crescimentos econômicos brasileiros para aplicar na metodologia de estudo desenvolvida.

Desenvolver estudos de análise custo benefício da introdução da Economia Circular como modelo de desenvolvimento econômico para propriedades rurais.

O presente estudo possui algumas limitações, pois analisa os resultados da biodigestão anaeróbia a partir de um único cenário. Neste sentido, sugere-se que sejam feitos estudos com diversos cenários, através da análise de sensibilidade, com as respectivas análises econômicas.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINETTO, D., FLECK, N.G., RIZZARDI, M.A. AND BALBINOT JÚNIOR, A.A., 2002. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. *Ciência rural*. Santa Maria. Vol. 32, n. 6 (nov./dez. 2002), p. 1073-1081.
- AMARAL, C. M. C.; AMARAL, L. A.; JÚNIOR, G. L.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S.; MACHADO, M. R. F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. *Ciência Rural*, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, 2004.
- AMARAL, D.D., CORDEIRO, L.A.M.; GALERANI, P.R., 2012. Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura–PLANO ABC (Sectoral Plan for Mitigation and Adaptation to Climate Change for a Consolidation Economy Low Carbon...). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 4(6), pp.1266-1274.
- ANDERSEN, M.S., 2007. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustain. Sci.* 2, 133e140.
- ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J. L.; GUWY, A. J.; KALYUZHNYI, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, v. 59, n. 05, p. 927–934, 2009.
- ANUALPEC 2004: anuário da pecuária brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 1999. 546 p.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DA PECUÁRIA. 2017. Kist, B. et al. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2017. 56 p.: il. Disponível em: www.bioenergy-world.com/americas/2008/IMG/ . Acesso em: 15 jul. 2018.
- ANUÁRIO LEITE 2018: INDICADORES, TENDÊNCIAS E OPORTUNIDADES PARA QUEM VIVE NO SETOR LEITEIRO – Rentero, N. (Editor). Disponível em: / <https://www.embrapa.br/gado-de-leite>. Acesso em: 15 dez. 2018.
- BATISTA, Laurentino Fernandes. Manual Técnico construção e operação de biodigestores. Brasília: EMBRAPA, 1981.
- BIASI, C. A. F. *et al.* Energias renováveis na área rural da região sul do Brasil / Carlos Antônio Ferraro Biasi... [et al.]. – Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2018. 202 p. : il.
- BOCKEN, N.M.P., DE PAUW, I., BAKKER, C., VAN DER GRINTEN, B., 2016. Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Ind. Prod. Eng.* 33, 308e320.

BURTON, C.H. Manure management: treatment and strategies for sustainable agriculture. West Park: Silsoe research Institute, 1997, p.181.

CABRAL, L., FILHO, S.D.C.V., DETMANN, E., MALAFAIA, P.A.M., ZERVOUDAKIS, J.T., DE SOUZA, A.L., VELOSO, R.G., NUNES, P.M.M., 2006. Consumo e digestibilidade dos nutrientes em bovinos alimentados com dietas à base de volumosos tropicais. R. Bras. Zootec, 35(6), pp.2406-2412.

CAMPOS, ALOÍSIO T. Análise da viabilidade da reciclagem de dejetos de bovinos com tratamento biológico, em sistema intensivo de produção de leite. 1997. 161p. Diss. Tese (doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

CASSINI, Sérgio Túlio. (coord.). Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás – PROSAB. Vitória: ABES; RIMA, 2003.

CASTANÓN, N.J.B., 2002. Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais. São Paulo.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos. Ministério de ciência e tecnologia. São Paulo. 2002.

COLDEBELLA, A. Viabilidade do uso de Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para a geração de Energia Elétrica e Irrigação em Propriedades Rurais. Dissertação (Mestrado) - UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, 2006.

COSTA, D. F. (2006) Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto. São Paulo. 194 p. Dissertação (Mestrado), PIPGE/USP.

DIAZ, G. O. "Análise de sistemas para o resfriamento de leite em fazendas leiteiras com o uso do biogás gerado em projetos MDL." Universidade de São Paulo– USP (2006).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF), 2013a. Towards the Circular Economy, vol. 2 (Isle of Wight).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF), 2013b. Towards the Circular Economy, vol. 1 (Isle of Wight).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF), 2014. Towards the Circular Economy, vol. 3 (Isle of Wight.).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015. Rumo à economia circular. Ellen Macarthur Foundation. Disponível em: www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economia-circular_Updated_08-12-15.pdf. Acesso em: dez. 2018.

EMATER - Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural, 2018. Projeto Bovinocultura de Leite. Disponível em:

<http://www.emater.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=68>. Acesso em: 15 dez. 2018.

ELKINGTON, J. Triple bottom line revolution: reporting for the third millennium. Australian CPA, v. 69, p. 75, 1994.

FAUSTINO, L. S. M.; TRAJANO, M. F.; MELLO, V. S.; JÚNIOR, I. B. M. TORRES, T. F. T. O. Produtores de gado trabalhando alternativa para produção de energia biológica. In: BIOCUM - SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOCUMBUSTÍVEIS, 2, 2009, Recife, PE. Anais... Recife, 2009.

GEISSDOERFER, M., BOCKEN, N.M.P., HULTINK, E.J., 2016a. Design thinking to enhance the sustainable business modelling process. J. Clean. Prod. 135, 1218e1232.

GEISSDOERFER, M., SAVAGET, P., EVANS, S., 2016b. The Cambridge business model innovation process. In: 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM, 3 e 5 October 2016 (Stellenbosch, South Africa).

GENG, Y., DOBERSTEIN, B., 2008. Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving “leapfrog development”. The International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 15(3), pp.231-239.

GHISELLINI, P., CIALANI, C., ULGIATI, S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. J. Clean. Prod. 114, 11e32.

GHG PROTOCOL DA AGRICULTURA. Metodologia GHG protocol para agricultura. São Paulo: Unicamp; WRI Brasil, 2016.

HARDOIM, P. C.; GONÇALVES, A. D. M. A. Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php>. Acesso em: 10 out. 2017.

HIGMAN, Christopher; BURGT, Maarten Van Der. Elsevier Science, Gasification, Gulf Professional Publishing: Feedstocks and Feedstock Characteristics. 1 ed., cap. 4, Burlington, MA, USA, 2003.

HORTA, L.A. Nogueira. Biodigestão A Alternativa Energética. São Paulo: Nobel, 1986.93 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Pecuária Municipal. Vol 37. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Números da Pecuária Paranaense Ano 2015.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Números da Pecuária Paranaense Ano 2017.

_____. Anuário Estatístico do Brasil. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>> Acesso em: 10/out. 2018.

KAISER, E.A., KOHRS, K., KÜCKE, M., SCHNUG, E., HEINEMEYER, O., MUNCH, J.C., 1998. Nitrous oxide release from arable soil: importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(12), pp.1553-1563.

LANGER, M., 2015. Uso de agregados reciclados da construção e demolição na pavimentação de estradas rurais – um modelo de gestão integrada. Curitiba, p.164. Monografia de especialização, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LIMA, M.A., 2002. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 19(3), pp.451-472.

LINDEMEYER, R. M. Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica. 2008. 105 p. Trabalho de conclusão de estágio supervisionado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MACHADO, C.R., 2011. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar.

MARTINS-COSTA, T. V. A (2009) Agripec: um modelo para estimar custos econômicos e emissões de gases efeito estufa para a pecuária bovina leiteira. Brasília/DF. 361 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília – Centro de Desenvolvimento Sustentável.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - MCT. Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal - Parte II da Segunda Comunicação Nacional do Brasil. 2010.

_____. 2011. Disponível em: <www.mct.gov.br> Acesso em: 20 set. 2018.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. MCTI. Brasília, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional sobre Mudança do Clima. Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. MMA, 2013.

MOARES, L. de M. Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de resíduos oriundos de atividades zootécnicas. 2000. 96f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas - SP, 2000.

MOURA, J.P. & PANNIR SELVAM, P.V.P., Sistema integrado de energia usando fundamentos de engenharia ambiental. *Bioenergy World Américas*(2006) UFRN.

OLIVEIRA, A. P. Potencial de produção e utilização de biogás na avicultura comercial. In: Encontro de avicultores do estado de São Paulo, 27. Jornada Técnica, 24. Anais do Sindicato Rural de Bastos, Bastos, 2001. p. 16-28.

OLIVEIRA, B. G. de (2010) Vinhaça da cana-de açúcar: fluxos de gases de efeito estufa e comunidades de archaea presente no sedimento do canal de distribuição. Piracicaba/SP. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

OLIVEIRA, P. A. V. (Coord.), (1993), Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos. Concórdia: EMBRAPA-CNPSEA, 188p. (EMBRAPA-CNPSEA. Documentos, 27).

PEDREIRA, M., PRIMAVESI, O.. "Impacto da produção animal sobre o ambiente." Embrapa Pecuária Sudeste-Capítulo em livro científico (ALICE) (2006).

PITK, P.; KAPARAJU, P.; PALATSI, J; AFFES, R.; VILU, R. Co-digestion of sewage sludge and sterilized solid slaughterhouse waste: Methane production efficiency and process limitations. Bioresource Technology. v. 134, p. 227-232, 2013.

REMMEN, A., ASTRUP-JENSEN, A. AND FRYDENDAL, J., 2007. Life cycle management. A business guide to sustainability. UNEP.

RITZÉN, S., SANDSTRÖM, G. Ö.L.. "Barriers to the Circular Economy–integration of perspectives and domains." Procedia CIRP 64 (2017): 7-12.

ROBINSON, J., BRADLEY, M., BUSBY, P., CONNOR, D., MURRAY, A., SAMPSON, B. AND SOPER, W., 2006. Climate change and sustainable development: realizing the opportunity. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 35(1), pp.2-8.

SACHS, I., 2010. Barricadas de ontem, campos de futuro. Estudos avançados, 24(68), pp.25-38.

SADOWSKI, M., MEYERS, S., MULLINS, F., SATHAYE, J. AND WISNIEWSKI, J., 1996. Methods for assessing greenhouse gas mitigation for countries with economies in transition: Summary of workshop presentations and discussions. Environmental Management, 20, pp.S3-S13.

SALOMON, K. R. (2007), Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade. Itajubá.219 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

SANTOS, I.A.D., 2012. Emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à bovinocultura: o valor fertilizante do esterco e o impacto da biodigestão anaeróbia.

SANTOS, J. F. Fertilização orgânica de batata-doce com esterco bovino e biofertilizante. Areia: UFPB/CCA, 2008. 110p. Diss. Tese Doutorado.

SANTOS, I.A., NOGUEIRA, L.A.H., 2012. Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia. *Revista Agrogeoambiental*, 4(1).

SANTOS, I.A., MORAIS, M.A., 2009. Aproveitamento de biogás para a geração de energia elétrica a partir de dejetos de bovinos leiteiros: Um estudo de caso na EAFMUZ. I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO – SEAB. DERAL - Departamento de Economia Rural LEITE - Análise da Conjuntura Agropecuária - Ano 2015/16. Disponível: http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/2016/bovinocultura_de_leite_2016.pdf. Acesso em: 16 set. 2018.

SEABRA, J. E. A (2008) Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil. CAMPINAS/SP. 298 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA – SEEG – BRASIL, 2017. "Análise das emissões de GEE Brasil (1970-2014) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o acordo de Paris (Documento síntese). 44p." Observatório do clima: sistema de estimativa de gases de efeito estufa-SEEG. Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/WIP-16-09-02-RelatoriosSEEG-Sintese.pdf>. Acesso em: 16 set. 2017.

_____. 2018. Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris – Documento de Análise 2018. 51p. Observatório do clima: sistema de estimativa de gases de efeito estufa-SEEG. Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/08/Relatorios-SEEG-2018-Sintese-FINAL-v1.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2018.

SENAI. Departamento Regional do Estado do Rio de Janeiro Cartilha inventário de emissões de gases de efeito estufa / [SENAI. Departamento Regional do Estado do Rio de Janeiro]. – Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 64 p.: il., color. (Guia Empresarial do SENAI)

SGANZERLA, E. Biodigestor: uma solução. Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SILVA, L.H.A., GABARDO DA CAMARA, M.R., TELLES, T.S., 2016. Evolução e distribuição espacial da produção de leite no estado do Paraná, Brasil. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, 38(1).

SILVA, A. D. A. (2009). Viabilidade técnica e econômica da implantação da biodigestão anaeróbia e aplicação de biofertilizante nos atributos de solo e plantas.

SILVA, CESAR. Sistema de gestão ambiental/Cesar Silva. Leane Chamma Barbar Przybysz. Curitiba. InterSaberes, 2014. 179p.

SIQUEIRA JÚNIOR, L. A. Alterações de características do solo na implantação de um sistema de integração agricultura-pecuária leiteira. 2005. 93f. Diss. Dissertação (Mestrado)—Universidade federal do Paraná, 2005.

STAHEL, W., REDAY, G., 1976. The Potential for Substituting Manpower for Energy, Report to the Commission of the European Communities.

STAHEL, W., 1982. The product life factor. In: Orr, G.S. (Ed.), An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies. The Role of the Private Sector. Houston Area Research Centre, Houston, pp. 72e105.

SU, B.; HESHMATI, A.; GENG, Y.; YU, X. 2013. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. J. Clean. Prod. 42, 215 e 227.

TESTON, D. C. A produção de energia a partir de esterco bovino como solução ambiental para impactos gerados por sistemas intensivos de produção animal. 2010. 45f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental e Negócios) - Setor Energético do Instituto de Eletrotécnica e Energia, USP, São Paulo, 2010.

THÉRY, H.; HAURESKO, C., 2017. Espacialização e dinâmicas contemporâneas da agropecuária paranaense. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia, (33).

UNITED NATION ENVIRONMENTAL PROGRAM - UNEP, 2015. Green Economy. Disponível em: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/green-economy>. Acesso em: 16 de setembro de 2018.

_____. 2015. Uncovering Pathways towards an inclusive green economy. A summary for leaders. Disponível em: <https://bit.ly/2PGrzx9>. Acesso em: 18 de outubro de 2018.

_____. 2016. Inclusive Green Economy Building Bridges to a Sustainable Future. Disponível em: www.unep.org/ourplanet. Acesso em: 16 set. 2018.

_____. 2017. Setting Course for Inclusive Green Economies. A contribution to the 2030 Agenda for Sustainable Development. Disponível em: <https://bit.ly/2Ev2x2D>. Acesso em: 18 out. 2018.

WEBSTER, K., 2015. The Circular Economy: a Wealth of Flows. Ellen MacArthur Foundation, Isle of Wight.

WORLD RESOURCES INSTITUTE – WRI BRASIL; UNIVERSIDADE DE CAMPINAS – UNICAMP. Metodologia do GHG Protocol da agricultura. 2014.

YUAN, Z., BI, J., MORIGUICHI, Y., 2008. The circular economy: a new development Strategy in China. J. Ind. Ecol. 10, 4e8.

APÊNDICE 1 – EQUAÇÕES UTILIZADAS NO ESTUDO

nº	Equação	Referência
	Esterco bovino	
	Estimativa da produção de esterco	Santos e
1	$P_{est} = PV \times VM$	Nogueira (2012)
	Estimativa de disponibilidade diária de macronutrientes	
	Disponibilidade de nitrogênio presente no esterco bovino	
2	$DN = PE \times PN$	Siqueira (2005) e
	Disponibilidade de fósforo presente no esterco bovino	Santos e
3	$DP = PE \times PP$	Nogueira (2012).
	Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino	
4	$DK = PE \times PK$	
	Estimativa do valor energético de substituição do esterco	Santos e
5	$VE_{est}(T) = DN \times (CEM N) \times a + DP \times (CEM P) \times a + DK \times (CEM K) \times a$	Nogueira (2012)
	Estimativa de disponibilidade anual de macronutrientes	
	Disponibilidade anual de nitrogênio presente no esterco bovino	
6	$DAN = DMN \times n \times a$	
	Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino	
7	$DAP = DMP \times n \times a$	Santos (2012)
	Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino	
8	$DAK = DMK \times n \times a$	
	Valor energético estimado do biogás	Avellar (2001
9	$VE_{est} = PCI \times P_{biogás}$	apud Costa, 2006)
	Mitigação total de GEE	
10	$M_{GEE \text{ Gado Leiteiro}} = \sum \frac{(GEEca)}{n}$	
	Fermentação entérica	
11	$CH_4 \text{ Fermentação} = NA \times FE_{CH_4 \text{ Fermentação}}$	
	Manejo de dejetos de animais	Martins-Costa
	Emissão do metano associada ao manejo de dejetos	(2009)
12	$CH_4 \text{ Dejetos} = NA \times EF_{CH_4 \text{ Dejetos}}$	WRI BRASIL e
	Emissão de óxido nitroso associada ao manejo de dejetos	UNICAMP (2016)
13	$N_2O \text{ Dejetos} = NA \times N_{ex} \times (1 - FRAC_{PRP}) \times EF_3$	
	Quantidade de N₂O em CO₂ eq	
14	$CO_{2 \text{ eq}}(N_2O) = N_2O \times RPM_{N_2O} \times PAG_{N_2O}$	
	Quantidade de CH₄ em CO₂ eq	
15	$CO_{2 \text{ eq}}(CH_4) = CH_4 \times RPM_{CH_4} \times PAG_{CH_4}$	

n°	Equação	Referência
	Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante mineral pelo biofertilizante	
16	$M_{GEE\ FQ} = FE_{GEE\ N} \times DMN \times n \times a$	Oliveira (2010)
17	$M_{GEE\ FQ} = FE_{GEE\ P} \times DMP \times n \times a$	
18	$M_{GEE\ FQ} = FE_{GEE\ K} \times DMK \times n \times a$	
	Energia elétrica gerada através do biogás em biodigestores	
19	$E_{elétrica} = E \times \eta_{gerador} \times PCI_{Biogás}$	CETESB (2002)
	Total de CO₂ eq. Evitado	
20	$CO_{2eq} = EE \times FEM$	Salomon (2007)