

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia**

**IZABEL APARECIDA DOS SANTOS**

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) ASSOCIADAS À  
BOVINOCULTURA: O VALOR FERTILIZANTE DO ESTERCO E O  
IMPACTO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA**

**Itajubá**  
**2012**



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

**A N E X O II**  
**FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA**

Título da Dissertação: "Emissão de gases de efeito estufa (GEE) associadas à bovinocultura: o valor fertilizante do esterco e o impacto da biodigestão anaeróbia"

Autor: Izabel Aparecida dos Santos

**JULGAMENTO**

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
1º	A		
2º	A		
3º	A		

**Observações:**

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- 4) Esse documento terá validade de **60 dias a contar da data da defesa.**

Resultado Final:   A   Ou seja,   Aprovada  

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 14 de maio de 2012.

Prof. Dr. Marcelo Simão da Rosa  
1º Examinador - IF Sul de Minas

Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha  
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira  
3º Examinador (Orientador) - UNIFEI

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia**

**IZABEL APARECIDA DOS SANTOS**

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) ASSOCIADAS À  
BOVINOCULTURA: O VALOR FERTILIZANTE DO ESTERCO E O  
IMPACTO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título **Mestre em Engenharia de Energia**.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira

**Itajubá**  
**2012**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Cristiane N. C. Carpinteiro- CRB\_6/1702

S237e

Santos, Izabel Aparecida dos

Emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à bovinocultura:  
o valor fertilizante do esterco e o impacto da biodigestão anaeróbia . / por  
Izabel Aparecida dos Santos. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2012.

73 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Biofertilizante. 2. Biomassa. 3. Energia. 4. Recursos naturais. 5.  
Sustentabilidade. I. Nogueira, Luiz Augusto Horta, orient. II. Univer-  
sidade Federal de Itajubá. III. Título.

A toda minha família, especialmente aos meus pais Wilson  
e Maria, aos meus irmãos e meu noivo Antônio Carlos  
Lomonte.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida e a coragem de recomeçar sempre.

Ao professor Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira, pela orientação dada, mostrando os caminhos para alcançar meus objetivos.

À minha irmã Cyntia pela paciência e ajuda com as formatações.

Ao meu irmão Wellington pela colaboração neste trabalho.

Ao meu noivo Antônio, pelo carinho e por ser meu maior incentivador.

Aos amigos José Mauro e Rafael pela ajuda com as figuras.

Ao professor Dr. Erick Menezes de Azevedo, por acreditar que eu seria capaz de realizar este trabalho.

Ao IF Sul de Minas – Campus Muzambinho, representado pelo Diretor Geral, professor Luiz Carlos Machado Rodrigues, pelo apoio e incentivo durante todo este trajeto.

Ao professor Fernando, o gênio dos números.

À Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, pela oportunidade oferecida.

Aos amigos do curso de especialização CEURE/UNIFEI, que foram muito importantes nesta caminhada, especialmente a Priscila.

A todos os amigos que sempre me apoiaram e torceram para que eu obtivesse sucesso.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

*“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo”*  
Peter Drucker

## RESUMO

SANTOS, I. A. dos (2012) **Emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à bovinocultura: o valor fertilizante do esterco e o impacto da biodigestão anaeróbia.** Itajubá/MG. 73 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Energia). UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

A bovinocultura brasileira tem se desenvolvido de forma notável nas últimas décadas. O rebanho nacional de  $205 \times 10^6$  cabeças atende à produção de carne e leite para o mercado interno e exportações, gerando em 2010 cerca de R\$ 67 bilhões. Um subproduto importante da criação de gado bovino é o esterco, cuja utilização como fertilizante em diversas culturas, permite reciclar nutrientes e manter a produtividade do solo em níveis adequados. No presente trabalho, se avalia a produção de esterco bovino, desde o ponto de vista energético, considerando seu valor fertilizante (em termos de macronutrientes disponíveis) e a substituição de adubo químico com igual valor fertilizante. Também se avalia o potencial de produção de biogás a partir de esterco, assumindo dados de operação de biodigestores rurais. Considerando o rebanho brasileiro em 2009, foi estimado um potencial de geração de biogás através do esterco bovino em  $62,9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/ano, com valor energético estimado em  $7,9 \times 10^8$  GJ/ano, a possível geração de 117,1 TWh/ano de energia elétrica e a disponibilidade anual de  $17,9 \times 10^6$  t de macronutrientes (N,P,K). Ao considerar a substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante, obtém-se uma economia de energia fóssil na ordem de  $6,1 \times 10^8$  GJ/ano. Em relação às emissões de gases de efeito estufa evitadas, o manejo adequado do esterco bovino proporciona, aproximadamente, a mitigação de  $564,2 \times 10^9$  kg de CO<sub>2</sub> eq/ano, o que corresponde a cerca de 73% das emissões totais brasileiras de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O no ano de 2005. A quantificação do valor energético do esterco bovino indica que mais que um resíduo, ele se trata efetivamente de um subproduto da atividade pecuária em condições de promover a sustentabilidade nessa atividade.

Palavras-chave: **Biofertilizante. Biomassa. Energia. Recursos naturais. Sustentabilidade.**

## Abstract

SANTOS, I. A. dos (2012) **Emissions of greenhouse gases (GHG) associated with bovine: the value of manure fertilizer and impact of anaerobic biodigestion.** Itajubá/MG. 73 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Energia). UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá.

The Brazilian cattle industry has developed dramatically in recent decades. The national herd of  $205 \times 10^6$  head meets the production of meat and milk for the domestic market and exports, in 2010 generated about \$ 67 billion. An important byproduct of raising cattle is the manure for use as fertilizer in different cultures, allows recycle nutrients and maintain soil productivity at adequate levels. In this study, to evaluate the production of manure from the energy point of view, considering its fertilizer value (in terms of nutrients available) and the replacement of chemical fertilizer with the same fertilizer value. It also evaluates the potential of biogas production from manure, assuming the operating data of rural digesters. Considering the amount of the Brazilian herd of cattle in 2009, was an estimated the potential for biogas generation through cattle manure in  $62.9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/year, with energy value estimated at  $7.9 \times 10^8$  GJ/year, the possible generation of 117.1 TWh/year of electricity and the yearly availability of  $17.9 \times 10^9$  tons of macronutrients (N,P,K). When considering the replacement of chemical fertilizers by biofertilizers, we obtained a saving of fossil energy in order  $6.1 \times 10^8$  GJ/year. In relation to emissions of greenhouse gases avoided, the proper management of manure provides approximately  $564.2 \times 10^9$  kg of mitigating CO<sub>2</sub> eq/year, which corresponds to about 73% of Brazil's total emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in 2005. The quantification of the energy value of the manure, indicates that more than one residue, it is actually a byproduct of the livestock industry, able to promote sustainability in this activity.

Keywords: **Biofertilizer. Biomass. Energy. Natural resources. Sustainability.**

## SUMÁRIO

Dedicatória.....	v
Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	viii
Abstract.....	ix
Sumário.....	x
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Abreviaturas e Símbolos.....	xvi
Lista de Variáveis.....	xviii
1 Introdução .....	1
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Justificativa .....	3
1.3 Estrutura do Trabalho .....	4
1.4 Objetivos .....	5
2 Revisão Bibliográfica .....	6
2.1 Desenvolvimento da bovinocultura no Brasil.....	6
2.2 Panorama atual da bovinocultura brasileira .....	7
2.2.1 Pecuária de corte.....	9
2.2.2 Pecuária leiteira .....	10
2.3 Impactos ambientais causados pela atividade pecuária.....	11
2.4 Biodigestão anaeróbia .....	13
2.4.1 Fases da biodigestão anaeróbia .....	15
2.4.2 Fatores que interferem na fermentação metanogênica .....	18
2.5 Biogás .....	21
2.5.1 Produção do biogás.....	24
2.5.2 Composição do biogás .....	25
2.5.3 Utilização do biogás.....	26
2.6 Biofertilizante .....	27
2.6.1 Produção, características e utilização do biofertilizante .....	29
2.7 Análise do ciclo de vida (ACV).....	30
2.7.1 Aplicações da ACV .....	31
2.7.2 Filosofia da ACV .....	31
2.7.3 A ACV relacionada à atividade pecuária .....	32

2.8	Coeficientes energéticos.....	36
2.9	Caracterização do esterco bovino.....	37
3	Materiais e Métodos .....	43
3.1	Caracterização do esterco bovino.....	43
3.2	Estimativa da produção de esterco.....	44
3.3	Estimativa de disponibilidade diária de macronutrientes .....	44
3.4	Estimativa do valor energético de substituição do esterco .....	45
3.5	Estimativa de disponibilidade anual de macronutrientes.....	46
3.6	Estimativa de produção de biogás .....	48
3.7	Valor energético do biogás proveniente da biodigestão de dejetos de bovinos.....	48
3.8	Estimativa da mitigação de gases de efeito estufa pelo manejo dos dejetos .....	49
3.9	Estimativa da mitigação de GEE decorrentes da substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante.....	51
3.10	Estimativa de produção de energia elétrica .....	52
3.11	Estimativa das emissões de GEE evitadas pela geração de energia elétrica através do biogás .....	53
4	Resultados .....	54
4.1	Estimativa de valor energético de substituição do esterco .....	54
4.2	Valor energético do biogás proveniente da biodigestão de dejetos de bovinos.....	56
4.3	Estimativa de mitigação de GEE pelo manejo de dejetos .....	57
4.4	Estimativa de mitigação de GEE decorrente da substituição do fertilizante químico .....	61
4.5	Total das emissões de GEE evitadas pela biodigestão anaeróbia do esterco.....	62
5	Discussão.....	64
6	Conclusões.....	71
7	Sugestões para trabalhos futuros .....	73

Referências Bibliográficas.....	74
Anexos.....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Variação do efetivo de bovinos – Brasil – 1997-2009.....	07
Figura 2.2 - Distribuição do efetivo de bovinos, por Grandes Regiões 2009.....	08
Figura 2.3 – Biodigestão anaeróbia da matéria orgânica.....	15
Figura 2.4 - Estágios do ciclo de vida de um produto ou serviço.....	32
Figura 2.5 - Ciclo de vida da produção de leite de fazendas convencionais e orgânicas na Suécia.....	34
Figura 3.1 – Fluxograma metodológico.....	43
Figura 4.1 - Valor energético dos macronutrientes do esterco bovino (animal/ano).....	55
Figura 4.2 - Valor energético do biogás de acordo com as diversas categorias animais (animal/ano).....	57
Figura 4.3 - Total das emissões de GEE evitadas pela biodigestão anaeróbia do esterco bovino.....	62
Figura 5.1 - Total de emissões de CO <sub>2</sub> no ano de 2005.....	66
Figura 5.2 - Emissões de CH <sub>4</sub> por setor 2005.....	67
Figura 5.3 - Emissões de N <sub>2</sub> O por setor 2005.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Potenciais de aquecimento global de GEE.....	12
Tabela 2.2 – Características de vários combustíveis.....	22
Tabela 2.3 – Equivalência energética do biogás comparada a outras fontes de energia.....	23
Tabela 2.4 – Composição do biogás.....	25
Tabela 2.5 – Consumo de biogás em diversas utilizações.....	26
Tabela 2.6 – Teores de componentes do biofertilizante.....	27
Tabela 2.7 – Análise química do esterco fresco e biodigerido anaerobiamente.....	28
Tabela 2.8 - Principais fontes de emissão de metano na agropecuária e quantidades emitidas no Brasil, em 2005.....	33
Tabela 2.9 - Categorias de impacto e indicadores selecionados na aplicação de ACV na região de Allgäu, Alemanha.....	35
Tabela 2.10 - Coeficientes energéticos para a produção de fertilizantes químicos considerados em análises energéticas.....	36
Tabela 2.11 - Demanda de energia e emissões de GEE na produção de defensivos e fertilizantes.....	37
Tabela 2.12– Produção e características dos dejetos de bovinos leiteiros.....	39
Tabela 2.13 - Quantidade média de macronutrientes presentes no esterco de bovinos leiteiros, em porcentagem da MS.....	40
Tabela 2.14 - Teores médios de nutrientes dos substratos.....	41
Tabela 2.15 - Umidade e conteúdo de macronutrientes (N,P,K) presentes nos dejetos de bovinos.....	41
Tabela 2.16 - Quantidade média de macronutrientes e matéria orgânica presentes no esterco bovino.....	42
Tabela 3.1 - Produção diária de esterco (fezes + urina), por animais de raças leiteiras, com 87,3% de umidade, 933,0 kg/m <sup>3</sup> de densidade e conteúdo em nutrientes.....	44
Tabela 3.2 - Coeficientes energéticos (CE) médios utilizados na produção de fertilizantes químicos.....	46
Tabela 3.3 - Produtividade de biogás.....	48

Tabela 3.4 - Emissão de GEE na produção de fertilizantes químicos.....	51
Tabela 4.1 - Valor energético dos macronutrientes do esterco bovino, considerando a substituição do adubo químico pelo biofertilizante.....	54
Tabela 4.2 - Economia de energia fóssil pela substituição do esterco.....	55
Tabela 4.3 - Valor energético (VE) do biogás de acordo com a produção diária de esterco bovino.....	56
Tabela 4.4 - Emissões anuais de CH <sub>4</sub> da pecuária leiteira, em CO <sub>2</sub> eq.....	58
Tabela 4.5 - Emissões anuais de N <sub>2</sub> O da pecuária leiteira, em CO <sub>2</sub> eq.....	58
Tabela 4.6 - Emissões anuais de CH <sub>4</sub> da pecuária de corte, em CO <sub>2</sub> eq.....	59
Tabela 4.7 - Emissões anuais de N <sub>2</sub> O da pecuária de corte, em CO <sub>2</sub> eq.....	59
Tabela 4.8 - Potencial de aquecimento global pelo manejo dos dejetos da pecuária leiteira.....	60
Tabela 4.9 - Potencial de aquecimento global pelo manejo dos dejetos da pecuária de corte.....	60
Tabela 4.10 – Emissões de GEE em CO <sub>2</sub> eq por tonelada de fertilizante químico produzido.....	61
Tabela 4.11 – Emissões anuais evitadas pela substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante.....	61
Tabela 4.12 – Benefícios potenciais da biodigestão anaeróbia do esterco.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCZ	Associação Brasileira de Criadores de Zebu
ACV	Análise Ciclo de Vida
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
BEN	Balanco Energético Nacional
CE	Coeficiente Energético
CETESB	Companhia da Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de carbono equivalente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EBAMM	Biofuel Analysis Meta-Model
EPA	Environmental Protection Agency
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE	Gases de Efeito Estufa
GJ	gigajoules
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNC	Gás Natural Combustível
GREET	Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation
GWP	Global Warming Potential
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Standardization Organization
kcal	quilocaloria
kg	quilograma
kW	quilowatts
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MIP	Matriz Insumo Produto
MJ	megajoules

MMA	Ministério do Meio Ambiente
MO	Matéria Orgânica
MS	Matéria Seca
Nm <sup>3</sup>	Normal Metro Cúbico
ppbv	Partes por Bilhão de Volume
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIB	Produto Interno Bruto
PPM	Pesquisa da Pecuária Municipal
PV	Peso Vivo
RGD	Registro Genealógico Definitivo
SECEX	Secretaria de Comércio Exterior
SETAC	Sociedade para Toxicologia e Química Ambiental
SPOLD	Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development

## LISTA DE VARIÁVEIS

$a$	número de dias no ano (365)
$CEM_K$	Coeficiente energético médio utilizado na produção de potássio químico (MJ/kg)
$CEM_N$	Coeficiente energético médio utilizado na produção de nitrogênio químico (MJ/kg)
$CEM_P$	Coeficiente energético médio utilizado na produção de fósforo químico (MJ/kg)
$CH_4$	fluxo de $CH_4$ na situação
$CO_{2eq}$	Total de $CO_{2eq}$ . Evitado ( $tCO_{2eq}/ano$ )
$CO_{2eq}(CH_4)$	Quantidade de $CH_4$ em $CO_2 eq$
$CO_{2eq}(N_2O)$	Quantidade de $N_2O$ em $CO_2 eq$
$DAK$	Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino (kg/ano)
$DAN$	Disponibilidade anual de nitrogênio presente no esterco bovino (kg/ano)
$DAP$	Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino (kg/ano)
$DK$	Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino (kg/dia)
$DMK$	Disponibilidade média de potássio presente no esterco bovino
$DMN$	Disponibilidade média de nitrogênio presente no esterco bovino
$DMP$	Disponibilidade média de fósforo presente no esterco bovino
$DN$	Disponibilidade de nitrogênio presente no esterco bovino (kg/dia)
$DP$	Disponibilidade de fósforo presente no esterco bovino (kg/dia)
$E$	Potencial energético do biogás
$EE$	Total de Energia Elétrica Gerada (MWh/ano)
$E_{elétrica}$	Energia elétrica gerada através do biogás em biodigestores
$FE_{GEE_K}$	Fator de emissão de GEE na produção de potássio (kg $CO_2 eq/kg$ )

$FE_{GEE_N}$	Fator de emissão de GEE na produção de nitrogênio (kg CO <sub>2</sub> eq/kg)
$FE_{GEE_P}$	Fator de emissão de GEE na produção de fósforo (kg CO <sub>2</sub> eq/kg)
$FEM$	Fator de Emissão Médio (tCO <sub>2</sub> eq./MWh)
$M_{GEEFQ}$	Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante (10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> eq/ano)
$M_{GEE \text{ Gado Corte}}$	Estimativa da mitigação de GEE pelo manejo dos dejetos do rebanho bovino de corte (CO <sub>2</sub> eq)
$M_{GEE \text{ Gado Leiteiro}}$	Estimativa da mitigação de GEE pelo manejo dos dejetos do rebanho bovino leiteiro (CO <sub>2</sub> eq)
$M_{GEE (T)}$	Mitigação total de GEE (CO <sub>2</sub> eq)
$n$	número de categorias animais do rebanho bovino de corte
$n$	número de categorias animais do rebanho bovino leiteiro
$n$	quantitativo nacional de gado bovino
$N_2O$	fluxo de N <sub>2</sub> O na situação
$PAG_{CH_4}$	potencial de aquecimento global do CH <sub>4</sub> em relação ao CO <sub>2</sub> (21)
$PAG_{N_2O}$	potencial de aquecimento global do N <sub>2</sub> O em relação ao CO <sub>2</sub> (310)
$P_{biogás}$	Produção diária de biogás (kg)
$PCI$	Poder calorífico inferior do biogás proveniente do esterco bovino (kJ/kg)
$PCI_{Biogás}$	Poder calorífico inferior: 22.320 kJ/m <sup>3</sup>
$PE$	Produção de esterco (kg/dia)
$P_{est}$	Produção diária de esterco (kg/dia)
$P_K$	Percentual de potássio presente no esterco bovino (0,43%)
$P_N$	Percentual de nitrogênio presente no esterco bovino (0,53%)
$P_P$	Percentual de fósforo presente no esterco bovino (0,21%)
$PV$	Peso vivo do animal (kg)
$RPM_{CH_4}$	relação entre o peso molecular do CH <sub>4</sub> e do carbono (16/12)

$RPM_{N_2O}$	relação entre o peso molecular do $N_2O$ e do nitrogênio (44/28)
$VE_{Est}$	Valor energético estimado do biogás (kJ/kg)
$VE_{Est}(T)$	Valor energético total estimado do esterco (MJ/ano)
$VM$	Valor médio de produção de esterco (0,07 kg)
$\sum(GEE_{ca})$	Total das emissões de GEE das categorias animais do rebanho bovino de corte ( $CO_2$ eq)
$\sum(GEE_{ca})$	Total das emissões de GEE das categorias animais do rebanho bovino leiteiro ( $CO_2$ eq)
$\eta_{gerador}$	Rendimento do grupo gerador

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O Brasil possui o segundo maior rebanho de bovinos do mundo, sendo superado apenas pela Índia, segundo os dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2010). Também é o segundo maior produtor de carne bovina, com um consumo *per capita* em torno de 34,7 kg por habitante/ano, ficando atrás dos Estados Unidos, sendo considerado o maior exportador mundial deste produto. A Pesquisa da Pecuária Municipal – PPM registrou para o ano de 2009 um efetivo de bovinos de  $205 \times 10^6$  cabeças, considerando nesta contagem os animais existentes no final do mês de dezembro, tanto destinados à produção de carne quanto à de leite. Dentre os efetivos dos rebanhos de animais de grande porte, o de bovinos foi o único que apresentou crescimento (IBGE, 2009).

A atividade pecuária tem importância global, com o quantitativo do rebanho bovino mundial no ano de 2008 totalizando  $988,6 \times 10^6$  cabeças de gado, apresentando uma pequena redução em relação ao ano de 2007. Para 2009 esperava-se a redução deste quantitativo, podendo alcançar cerca de  $978,8 \times 10^6$  cabeças (SCHLESINGER, 2010).

Além da grande representatividade no cenário nacional, a pecuária brasileira de corte também apresenta destaque internacional. No ano de 2007, a exportação da carne bovina concedeu ao Brasil o título de maior exportador mundial, com um volume de 2,1 milhões de toneladas de equivalente-carcaça (ARAÚJO, 2009).

A atividade leiteira é um segmento relevante para a economia brasileira, estando presente em diversas regiões do país. Tradicionalmente a atividade leiteira possui a característica de se desenvolver, na maioria das vezes, em propriedades administradas pela mão de obra familiar, sendo a gerência passada de pai para filho. Esta situação contribui para a fixação do homem no campo, reduzindo assim a migração para os centros urbanos e minimizando problemas sociais como o desemprego e a exclusão social (MEZZADRI, 2005).

O gado bovino sempre esteve presente no Brasil, tendo importante presença histórica, contribuindo para a sua própria formação territorial. No entanto, durante séculos, a criação de gado bovino no Brasil representava uma atividade secundária. Todas as

atividades da pecuária bovina, como a tração animal, a produção de carnes, leite, couros e outros produtos destinavam-se a apoiar as atividades centrais, vinculadas à produção de *commodities* de exportação, como no início da cultura da cana-de-açúcar na região Nordeste. Atualmente, as regiões que apresentam a maior taxa de expansão do gado bovino são as regiões Norte e Centro-Oeste, especialmente na Floresta Amazônica e no Cerrado.

A pecuária é uma das atividades econômicas mais importantes do mundo, trazendo inúmeros benefícios. No entanto, utiliza grande quantidade de recursos naturais e contribui para o aquecimento global. A pecuária bovina é a que mais contribui para a degradação do meio ambiente, devido ao grande número de animais e conseqüente geração de resíduos. As emissões atribuídas à pecuária são provenientes dos processos produtivos que envolvem o segmento de insumos e da atividade em si. Na atividade pecuária, destaca-se as emissões de metano (CH<sub>4</sub>) através da fermentação entérica, das fezes e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), emitido pelas fezes e urina e no eventual uso de fertilizantes nitrogenados em pastagens. Dentre os gases citados, o mais importante para a pecuária de corte é o CH<sub>4</sub>. Segundo o MCT (2010), o setor de agropecuária é o maior responsável pelas emissões de CH<sub>4</sub>, representando 71% das emissões desse gás no ano de 2005.

A mitigação desses gases pode ser feita através de tecnologias ou técnicas de produção já existentes. Uma das alternativas seria a intensificação da atividade através da melhora do manejo das pastagens, da qualidade do alimento fornecido aos animais e do manejo dos dejetos de animais confinados, utilizando tecnologias como a biodigestão anaeróbia para o tratamento destes dejetos (ALMEIDA, 2010).

A expansão populacional aumenta o consumo de produtos de origem animal como o leite e a carne. A demanda por altas produtividades tem causado a elevação dos custos de produção e a contaminação do meio ambiente, em decorrência do uso excessivo de defensivos e adubos químicos. Devido a isso, torna-se imperativa a busca de alternativas para propor soluções para os problemas da agricultura brasileira (SANTOS, 2008).

O consumo brasileiro de fertilizantes passou de 958 x 10<sup>3</sup> t em 1970 para 7,7 x 10<sup>6</sup> t em 2002 (Associação Nacional para Difusão de Adubos – ANDA). Em áreas agrícolas, o consumo médio de fertilizantes por hectare passou de 18,5 kg em 1970 para 146 kg em 2002. Esse expressivo aumento no consumo doméstico de fertilizantes fez o

Brasil ser o 4º maior mercado mundial de fertilizantes, precedido pela China, EUA e Índia (NEVES *et al.*, 2002).

Na bovinocultura leiteira VAN HORN *et al.* (1994) observaram que do total da energia ingerida pelas vacas, 33% é eliminada através dos dejetos. Esta energia pode se tornar uma fonte poluidora, quando não existe o manejo correto dos dejetos. Porém, o emprego da tecnologia anaeróbia, com a utilização dos biodigestores, além de proporcionar benefícios ambientais, viabiliza os modernos sistemas de produção pecuária, gerando ganhos econômicos.

Os biofertilizantes estão surgindo como alternativas de produção para os pequenos produtores rurais, pois representam redução de custos com fertilizantes químicos, sendo mais acessíveis por serem um dos resultados da biodigestão anaeróbia, como também atendem a preocupação com a sustentabilidade na atividade pecuária (SANTOS, 2008).

Atualmente, a prioridade é produzir de forma sustentável, sem a contaminação do meio ambiente. Para o pai da química moderna, Antonie Laurent Lavoisier, “na natureza, nada se cria, nada se perde e tudo se transforma”. O conhecimento traz a conscientização de que é necessário o uso racional da energia e dos recursos naturais, tornando-os inesgotáveis (HARDOIM e GONÇALVES, 2000).

## **1.2 Justificativa**

Diante do predomínio da oferta de energia de origem fóssil e a demanda cada vez maior de energia, devido ao crescimento populacional, às necessidades do sistema produtivo e ao desenvolvimento econômico, torna-se imperativa a necessidade de conservação de energia.

A pecuária bovina é uma das principais atividades agropecuárias brasileiras. O Brasil possui o segundo maior rebanho bovino do mundo, sendo responsável pelas exportações de vários produtos agropecuários. No entanto, esta atividade é responsável por grande quantidade de emissões de Gases de Efeito Estufa - GEE, através da fermentação entérica e manejo dos dejetos. Uma grande quantidade de nutrientes ingerida pelos bovinos é excretada, através dos dejetos e não aproveitada apesar de possuir propriedades

potencialmente fertilizantes. A biodigestão anaeróbia é uma das alternativas que promove o tratamento dos dejetos, não reduzindo a capacidade fertilizante dos resíduos.

A produção de fertilizantes químicos é responsável pelo consumo de uma grande quantidade de energia proveniente de combustíveis fósseis, prejudicando a sustentabilidade dos processos produtivos. O biofertilizante, obtido através da biodigestão anaeróbia dos dejetos de bovinos, se apresenta como uma alternativa ao uso de fertilizantes químicos, pois além do ganho econômico, promove a sustentabilidade ambiental.

Além do biofertilizante, a biodigestão anaeróbia promove a produção do biogás, sendo este um importante biocombustível, que pode ser transformado em energia elétrica para o abastecimento da propriedade local, como também pode ser comercializado com a concessionária de energia elétrica. O aproveitamento do biogás e do biofertilizante apresenta novas oportunidades para geração de emprego e renda no meio rural, promovendo o desenvolvimento com sustentabilidade.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

No capítulo 1, foi feita uma introdução geral sobre o tema abordado na dissertação, a justificativa da relevância do trabalho, como também os objetivos gerais e específicos. Já o capítulo 2, apresenta a revisão bibliográfica dos diversos assuntos que embasaram o estudo, tais como: desenvolvimento da bovinocultura no Brasil, panorama da bovinocultura brasileira, biodigestão anaeróbia, biogás, biofertilizantes, análise do ciclo de vida (ACV), coeficientes energéticos utilizados na produção do fertilizante químico e a caracterização do esterco bovino. No capítulo 3, foram definidos os aspectos metodológicos utilizados. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no presente estudo. No capítulo 5 se discute os resultados obtidos, com a comparação do quantitativo das emissões mitigadas pelo manejo correto do esterco com o quantitativo de emissões de GEE no Brasil, no ano de 2005, segundo o “Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal”, (parte 2), do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT, 2010) como também um comparativo com os dados apresentados no Balanço Energético Nacional (BEN, 2010). No capítulo 6, foram

feitas as conclusões gerais e comentários. Finalmente no capítulo 7, foram feitas as recomendações para trabalhos futuros.

## **1.4 Objetivos**

### *1.4.1 Objetivo Geral*

Diante do contexto apresentado anteriormente, o objetivo é determinar, em valor energético a contribuição do esterco bovino, considerando seu valor fertilizante, no contexto da produção pecuária brasileira.

### *1.4.2 Objetivos Específicos*

- 1) Definir um animal equivalente (bovino), através de pesquisas bibliográficas, para representar a média de peso do rebanho bovino brasileiro e ser utilizado como parâmetro para os cálculos da produtividade diária de esterco, biogás, energia elétrica e disponibilidade de macronutrientes do esterco;
- 2) Estimar o valor energético dos macronutrientes do esterco, considerando a substituição dos fertilizantes químicos, a fim de avaliar o benefício energético da utilização do biofertilizante;
- 3) Determinar o valor energético do biogás, a partir do quantitativo de esterco bovino, para avaliar o benefício decorrente da sua produção;
- 4) Estimar a produção de energia elétrica através do biogás obtido através do esterco bovino, a fim de quantificar os benefícios energéticos e ambientais de sua utilização;
- 5) Estimar os impactos ambientais na emissão de GEE, decorrentes do manejo adequado do esterco bovino, da substituição do fertilizante químico e da geração de energia elétrica através do biogás, pela comparação do quantitativo de emissões de GEE do esterco não manejado adequadamente, da produção de fertilizantes químicos e a produção de energia elétrica através de usinas hidrelétricas, para determinar os benefícios ambientais da biodigestão anaeróbia do esterco.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Desenvolvimento da bovinocultura no Brasil**

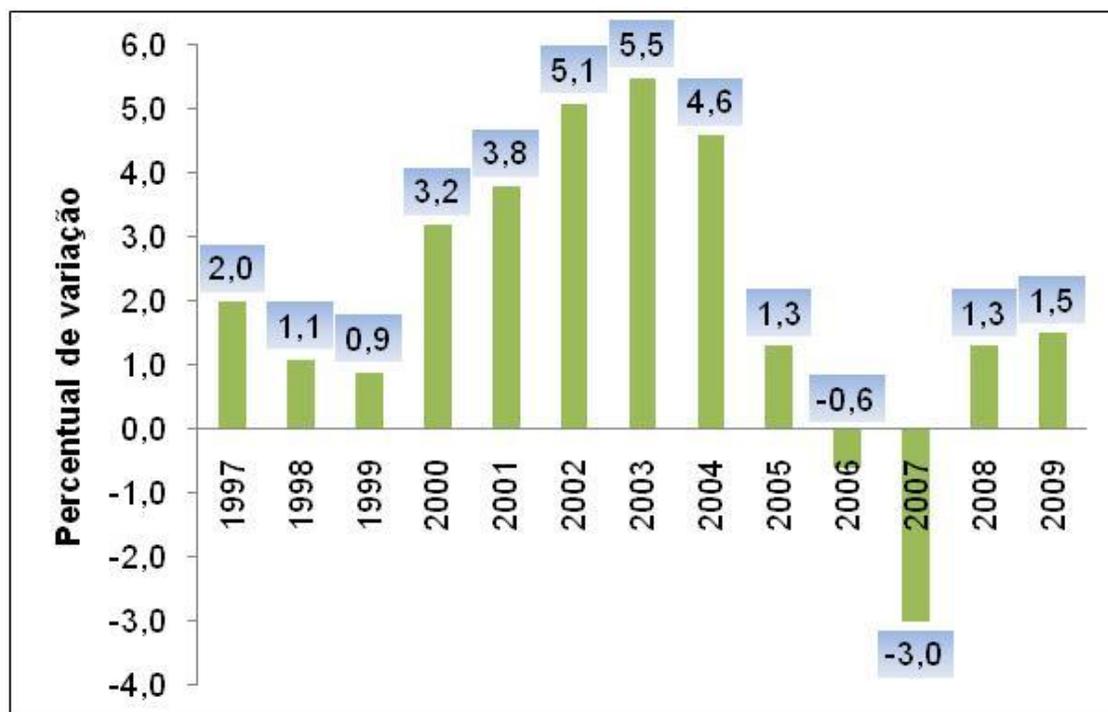
O gado bovino sempre esteve presente no Brasil desde a sua formação territorial. Atualmente, as regiões Norte e Centro-Oeste são as que apresentam as maiores taxas de expansão do rebanho bovino. A atividade pecuária teve seu início, ainda na época colonial, com a chegada dos primeiros bovinos no país em 1534, na capitania de São Vicente, e posteriormente, em 1535 e 1539 outros lotes de bovinos chegaram a Pernambuco e à Bahia. A principal função era subsidiar os engenhos de cana, com a utilização dos animais para o trabalho. Porém, em meados do século XVII, a pecuária continuou sua expansão, indo desde o São Francisco, até o interior de Minas Gerais, onde se desenvolveu, contribuindo com a produção de carne e couro (CARRER, 2000). Partindo dessas regiões, a criação de bovinos expandiu-se por todo o país, concentrando-se no eixo centro-sul e deslocando-se progressivamente para o eixo centro-norte do país, onde havia maiores ofertas de terras, com preços inferiores a outras regiões.

Em meados dos anos 70, o rebanho bovino brasileiro era estimado em 92,4 milhões de cabeças, sendo 2,4% na região Norte, 17,6% Nordeste, 32,9% Sudeste, 22,4% Sul e 24,7% região Centro-Oeste. No ano de 2007, o número de bovinos do rebanho brasileiro aumentou para 199,7 milhões de cabeças e a concentração desses animais pelo território nacional também foi alterada para 19% na região Norte (onde houve maior crescimento), 14,4% no Nordeste, 19,3% Sudeste, 13,3% no Sul e 34,1% na região Centro-oeste, onde ocorreu a maior concentração do rebanho bovino (ARAÚJO, 2009).

Além da mudança na distribuição do rebanho bovino pelo país nas últimas décadas, ocorreram também outras alterações na atividade pecuária. As tecnologias utilizadas na atividade foram modificadas, incorporando inovações em função do crescimento de sua importância econômica. A produção, que era basicamente feita de modo extensivo, passou a ser feita através de sistemas de confinamento, que reduz o tempo necessário para os animais chegarem ao abate, aumentando a eficiência da produtividade pecuária (MIELITZ NETTO, 1994).

## 2.2 Panorama atual da bovinocultura brasileira

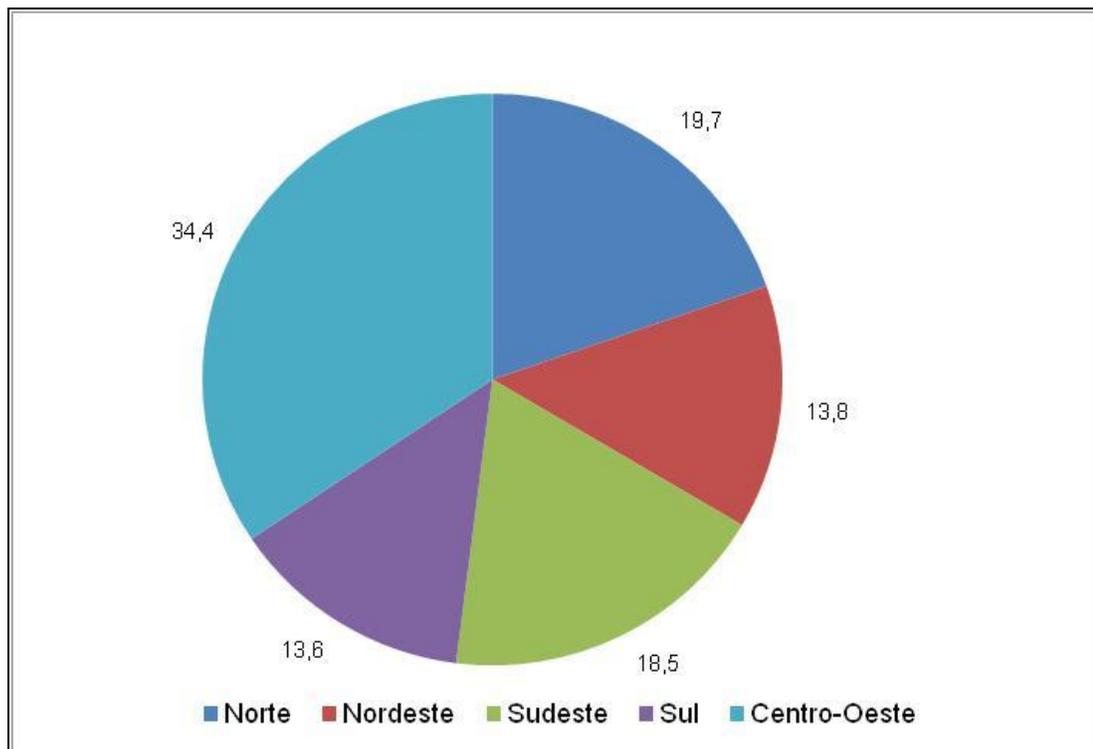
A Figura 2.1 apresenta a variação do quantitativo do rebanho bovino nacional, de 1997 até 2009. Neste período, o rebanho bovino apresentou crescimento, enquanto que os demais animais de grande porte apresentaram redução de seu quantitativo, por exemplo, o rebanho de bovinos decresceu 8,9% (IBGE, 2009).



**Figura 2.1** - Variação do efetivo de bovinos – Brasil – 1997-2009.

Fonte: Adaptado de (IBGE, 2009).

Dentre as regiões brasileiras, o Centro-Oeste apresenta a maior concentração de rebanho bovino, tendo 34,4% do efetivo nacional. A seguir destaca-se a Região Norte, com 19,7% (Figura 2.2). O estado do Mato Grosso ocupa a liderança em relação ao número de animais, com 13,3% do total do rebanho brasileiro, seguido por Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, que possuem participações de 10,9% em cada estado. Os dez principais estados brasileiros produtores de bovinos concentram 81,3% do quantitativo do rebanho nacional (IBGE, 2009).



**Figura 2.2** - Distribuição percentual do efetivo de bovinos por Grandes Regiões – 2009.

Fonte: (IBGE, 2009).

Corumbá (MS) é o município brasileiro com maior produção de bovinos, com cerca de 1,973 milhões de cabeças, com a representatividade nacional de 1%. É seguido por São Félix do Xingu (PA), com 0,9%, e Ribas do Rio Pardo (MS), com 0,6% de participação no quantitativo nacional. O município de Porto Murtinho (MS) também se destaca, em 2008 ocupava a 12ª posição no *ranking* dos principais municípios, e em 2009 passou a ocupar a 5ª posição, registrando um aumento de 25,3% no efetivo do rebanho. O município de Novo Progresso (PA) que em 2008 não obteve destaque, em 2009 assume a 10ª posição. O rebanho bovino encontra-se bem distribuído pelo território nacional, com os 20 principais municípios produtores concentrando cerca de 8,4% do total de animais (IBGE, 2009).

Em relação ao abate e produção de carne bovina para o ano de 2009, verificou-se, pela Pesquisa Trimestral do Abate de Animais, o abate de  $28 \times 10^3$  cabeças e a produção de  $6,6 \times 10^3$  t do produto. É importante destacar que esta pesquisa investiga apenas os estabelecimentos que realizam o abate e que o fazem sob algum tipo de inspeção sanitária. Do total de carne produzida, 13,9% foram exportados para outros países, com a redução de

cerca de 9,9% da exportação de carne bovina em relação ao ano de 2008, segundo os dados da Secretaria de Comércio Exterior - SECEX, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (IBGE, 2009). O Brasil exportou a carne bovina principalmente para a Rússia, Hong Kong e Irã. Os Estados Unidos lideraram o consumo de carne bovina, seguido pela União Europeia e Brasil.

O rebanho bovino brasileiro participa do desenvolvimento de dois importantes segmentos econômicos da atividade pecuária: as cadeias produtivas da carne e do leite. Esta questão é demonstrada pelo valor bruto da produção desses segmentos que, no ano de 2010, foi estimado em R\$ 67 bilhões. A importância econômica e social da bovinocultura em nosso país é evidenciada pela sua presença cada vez maior em todos os estados brasileiros e pela movimentação econômica (MAPA, 2011).

### *2.2.1 Pecuária de corte*

Na atividade pecuária existem as raças específicas para as produções de carne, de leite e os de raças mistas, para ambas as produções. Gados de corte são os bovinos destinadas ao abate, à produção de carne e seus derivados e também de alguns subprodutos. Existem muitas raças destinadas ao corte, dentre elas, as européias, como as inglesas Hereford, Hereford môcho, Duhan, Duhan môcho, Aberdeen Angus, Galloway e Sussex e as francesas, Charolesa e Limousine. No Brasil existem excelentes raças produtoras de carne, como as zebuínas, originárias da Índia, Nelore, Guzerá e Gir. Dentre as características dessa raça, além de elevada produção de carne, apresentam grande rusticidade, podendo ser criadas soltas, em regime extensivo de pastagens, em todo o território brasileiro, desde os Estados do Norte até o Rio Grande do Sul (ARRUDA, 2004).

O quantitativo do rebanho brasileiro de bovinos de corte apresenta aproximadamente 137 milhões de cabeças, composto principalmente por animais de raças zebuínas. Na composição do rebanho destaca-se os animais da raça Nelore, puros e mestiços ou anelados. Segundo dados da Associação Brasileira de Criadores de Zebu (ABCZ), entre 1939 e 2009, cerca de 81% dos animais que receberam registro genealógico definitivo (RGD) são da raça Nelore, que participaram de forma importante como matrizes e reprodutores na formação dos rebanhos brasileiros (FERNANDES, 2011).

De acordo com MEDEIROS (2006), “a pecuária de corte brasileira desenvolveu-se por expansão da fronteira agrícola e extrativista, incorporando ao sistema extensivo de produção novas áreas de terras, até então consideradas improdutivas, em regiões desprovidas de infra estrutura e pela utilização de terras esgotadas pela produção de grãos, contribuindo também para a ocupação do território brasileiro. Atualmente, a bovinocultura de corte está incorporando novas tecnologias, em áreas produtoras de maior importância, refletindo positivamente sobre a qualidade e a produtividade do rebanho. Nessas áreas, há uma mudança de atitude dos pecuaristas, promovida pela necessidade da busca de maior eficiência e eficácia do processo produtivo. Hoje, esta atividade possui importante participação na economia nacional”.

### 2.2.2 Pecuária leiteira

O leite é um dos principais produtos da bovinocultura leiteira, investigado pela Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), com a produção de  $29,1 \times 10^9$  litros no ano de 2009, com um aumento de produção de 5,6% em volume em relação ao ano de 2008. Em valor de produção, tem-se o percentual de 9,2%. O preço médio do produto no ano de 2009 foi R\$ 0,64, contra R\$ 0,62 em 2008. O consumo *per capita* brasileiro para o ano de 2009 ficou em torno de 152 litros por habitante. Os principais produtores de leite foram Minas Gerais (27,2%), Rio Grande do Sul (11,7%) e Paraná (11,5%). O município com maior produção de leite é Castro (PR), seguido por Patos de Minas (MG) e Piracanjuba (GO). A produção leiteira no Brasil encontra-se bem distribuída, com os 20 principais municípios produtores concentrando apenas 7,0% da produtividade nacional (IBGE, 2009).

A Pesquisa Trimestral do Leite informou que, no ano de 2009, foram adquiridos  $19,6 \times 10^9$  litros de leite. Verificou-se um aumento de produção de 1,6% em 2009 em relação ao volume obtido no ano de 2008. No início de 2009 a aquisição de leite esteve baixa, só se recuperando no segundo semestre, apresentando um aumento crescente ao final do ano. O consumo interno brasileiro *per capita* foi de 102 litros de leite por habitante/ano, sendo estes valores inferiores aos apresentados pela Pesquisa da Pecuária Municipal, pois a investigação ocorre somente em estabelecimentos industriais, cuja produção está sujeita à fiscalização sanitária. Os principais estados em aquisição de leite no ano de 2009 foram: na liderança ficou o estado de Minas Gerais, com participação de 26,8%, seguido pelo Rio Grande do Sul (14,1%) e Goiás (12,3%) (IBGE, 2009).

### 2.3 Impactos ambientais causados pela atividade pecuária

O efeito estufa é o problema mais importante em relação ao uso da energia e pode ser definido como o acréscimo constante e gradual da temperatura média da terra, sendo consequência do aumento da concentração atmosférica de alguns gases, tais como o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) os clorofluorcarbonos (CFCs), o metano (CH<sub>4</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), entre outros. Estes gases capturam parte da radiação infravermelha que a terra devolve para o espaço, provocando o aumento da temperatura atmosférica e diversas alterações climáticas. Dentre os gases de efeito estufa causadores do aquecimento global, observa-se que a maior contribuição corresponde ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), seguido dos clorofluorcarbonos (CFCs) e do metano (CH<sub>4</sub>). Cada t de (CH<sub>4</sub>) equivale a aproximadamente 21 t de (CO<sub>2</sub>) sob o ponto de vista do efeito causado, indicador este que se denomina potencial de aquecimento global (Global Warming Potential – GWP) (LORA *et al.*, 2006).

De acordo com LORA *et al.* (2006), “o metano (CH<sub>4</sub>) é proveniente de fontes biogênicas como os pântanos, resíduos de animais, plantações de arroz, aterros sanitários, etc. Das emissões totais, 2/3 tem caráter antropogênico, ou seja, provocadas pela ação do homem. Desde 1978, a taxa observada do aumento da concentração de metano na atmosfera tem variado na faixa de 14-17 ppbv (partes por bilhão de volume), ou aproximadamente 0,9% ao ano”.

A Tabela 2.1, a seguir, apresenta os potenciais de aquecimento global dos GEE.

**Tabela 2.1** – Potenciais de aquecimento global de GEE.

<b>Gases de Efeito Estufa</b>	<b>Origem mais comum</b>	<b>GWP (tCO<sub>2</sub>eq.)</b>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	Queima de combustíveis fósseis	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	Mineração, aterros, gado, degradação de matéria orgânica	21
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	Fertilizantes, queima de combustíveis fósseis (ex: transporte)	310
Hidrofluor Carbono (HFCs)	Processos Industriais (refrigeração/ar condicionado)	11.700 a 140
Perfluor Carbono (PFCs)	Processos Industriais (em subst. Aos HFCs)	9.200 a 6.500
Hexafluoreto de Enxofre (SF <sub>6</sub> )	Fluido Dielétrico, longo tempo de vida, 3.200 anos	23.900

Fonte: (LORA et al., 2006).

SCHLESINGER (2010) afirma que especialistas apontam o sistema de confinamento como uma alternativa para a redução das emissões de GEE. Porém, relatórios demonstram que uma dieta à base de grãos de soja para o animal confinado, rica em proteína, aumenta a liberação de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Por este motivo, a adoção deste tipo de sistema produtivo deve ser feita com cautela, sendo mais apropriado para pequenas regiões produtivas, onde não existam outras opções para a produção pecuária.

As emissões de metano produzidas durante o processo digestivo dos animais ruminantes derivam da energia contida na alimentação do gado. Estudos estão sendo feitos para encontrar alternativas para a redução destas emissões. Uma das opções seria o melhoramento da produtividade e da eficácia na produção. Isso permitiria a redução das emissões não por animal, mas por unidade de produto final (kg de leite ou de carne). A criação bovina leiteira americana intensificada se destaca pela contribuição da redução das emissões antrópicas dos GEE como também por apresentar uma produção mais competitiva. Como benefícios adicionais, têm-se a melhora da saúde animal, a estabilidade da produção e a redução das importações de produtos animais. Outras soluções para a redução das emissões de GEE na atividade pecuária seria uma melhor gestão das pastagens, melhores práticas de suplementação alimentar, a substituição das forragens por

alimentos contendo menos fibra, controle sanitário adequado, como também melhorias genéticas do rebanho. Na Amazônia, trabalhos suplementares estão buscando desenvolver sistemas silvo pastoris, no qual as árvores são introduzidas nas pastagens, a fim de aumentar a produtividade da exploração. Outros estudos estão sendo feitos sobre as biotecnologias que permitem modificar o funcionamento do rúmen dos animais, entretanto, os resultados desses trabalhos poderão ter problemas de aceitação pública (MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES, 2001 apud MARTINS-COSTA, 2009).

A análise da contribuição da pecuária para as emissões de GEE no Brasil se apresenta como um problema complexo, necessitando da interação de diversas ciências na busca de soluções para a sustentabilidade da atividade. Tal complexidade deriva do fato de que a pecuária bovina brasileira de corte é predominantemente extensiva, fato que demanda grandes extensões de terra necessárias ao processo produtivo, enquanto que a pecuária de leite ocorre, na sua maioria, nas pequenas propriedades rurais. A expansão da criação bovina extensiva na Amazônia causa diversos problemas sócio-ambientais, entre eles o desmatamento e o aumento das emissões de metano pelo incremento do rebanho. Cada região brasileira tem suas próprias características, com sistemas de produção animal distintos, de acordo com suas particularidades. Devido a isso, uma análise correta dos efeitos ambientais da criação pecuária deve ser feita baseando-se nas particularidades regionais dos diferentes sistemas produtivos no Brasil. Sendo necessário identificar, para cada área estudada, os aspectos tecnológicos, socioeconômicos e ambientais. Portanto, para a comparação dos diversos sistemas produtivos, torna-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia que permita quantificar as emissões de metano da fermentação entérica, como também do manejo dos resíduos nas propriedades rurais (MARTINS-COSTA, 2009).

## **2.4 Biodigestão anaeróbia**

Biodigestão anaeróbia dos resíduos orgânicos é um processo bioquímico que utiliza ação bacteriana para fracionar compostos complexos e produzir um gás combustível, denominado biogás, composto principalmente de metano e dióxido de carbono.

Atualmente, a digestão anaeróbia da matéria orgânica é uma das tecnologias disponíveis capazes de contribuir para a redução da poluição ambiental. Neste processo

existe a conversão microbiológica da matéria orgânica que tem como resultado o biogás, que pode ser utilizado como combustível. Em um cenário onde todos os resíduos orgânicos mundiais fossem convertidos em metano, a uma eficiência de 50%, estima-se que seria possível uma economia de cerca de 5% na energia fóssil mundial (OLIVA *et al.*, 2002).

Segundo LETTINGA *et al.* (1997), o tratamento anaeróbio de resíduos pode ser considerado como um importante instrumento de proteção ambiental, preservando os recursos fósseis e se tornando fonte de energia e de biofertilizantes. LUCAS JÚNIOR (1987) afirma que o desenvolvimento da tecnologia de utilização da digestão anaeróbia é fundamental para promover, com grande eficiência, a degradação de resíduos orgânicos, que, em função do crescimento econômico e populacional, tem sua quantidade cada vez mais aumentada nas atividades rurais e industriais. A modernização e a intensificação da produção animal aumentam as necessidades energéticas e de tratamento dos resíduos.

A importância da biodigestão anaeróbia se traduz na redução da poluição causada pelos resíduos dos processos produtivos, eliminação das ervas daninhas e das bactérias causadoras de doenças e no aproveitamento do biofertilizante com a consequente diminuição dos custos com fertilizantes químicos. Proporciona também a eliminação dos maus odores e moscas das tradicionais esterqueiras, além da produção de biogás (CASTRO e CORTEZ , 1998).

O alto custo da energia aumentou o interesse por sistemas de tratamento com baixa demanda energética, como os sistemas anaeróbios. No entanto, um dos fatores que mais dificulta ainda hoje, no Brasil, a utilização desta fonte energética nas pequenas propriedades rurais é o custo de construção dos biodigestores. Uma alternativa para viabilizar a utilização desta tecnologia é a otimização do processo, acelerando ou reduzindo o tempo de retenção do substrato dentro do biodigestor. Dessa maneira, pode-se combinar maior eficiência e custos baixos de construção e operação dos biodigestores, tornando o preço de implantação mais acessível aos pequenos produtores (CASTRO e CORTEZ , 1998).

### 2.4.1 Fases da biodigestão anaeróbia

O biodigestor pode ser considerado como um ecossistema que reúne diversos grupos de microorganismos que trabalham conjuntamente na transformação da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. Neste processo de transformação, existe o envolvimento de diversas espécies de bactérias que atuam em etapas ou fases de forma simbiótica. As principais reações bioquímicas que ocorrem no processo podem ser divididas em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese, e metanogênese, conforme descreve (SALOMON, 2007). A Figura 2.3 a seguir apresenta o balanço da biodigestão anaeróbia da matéria orgânica.

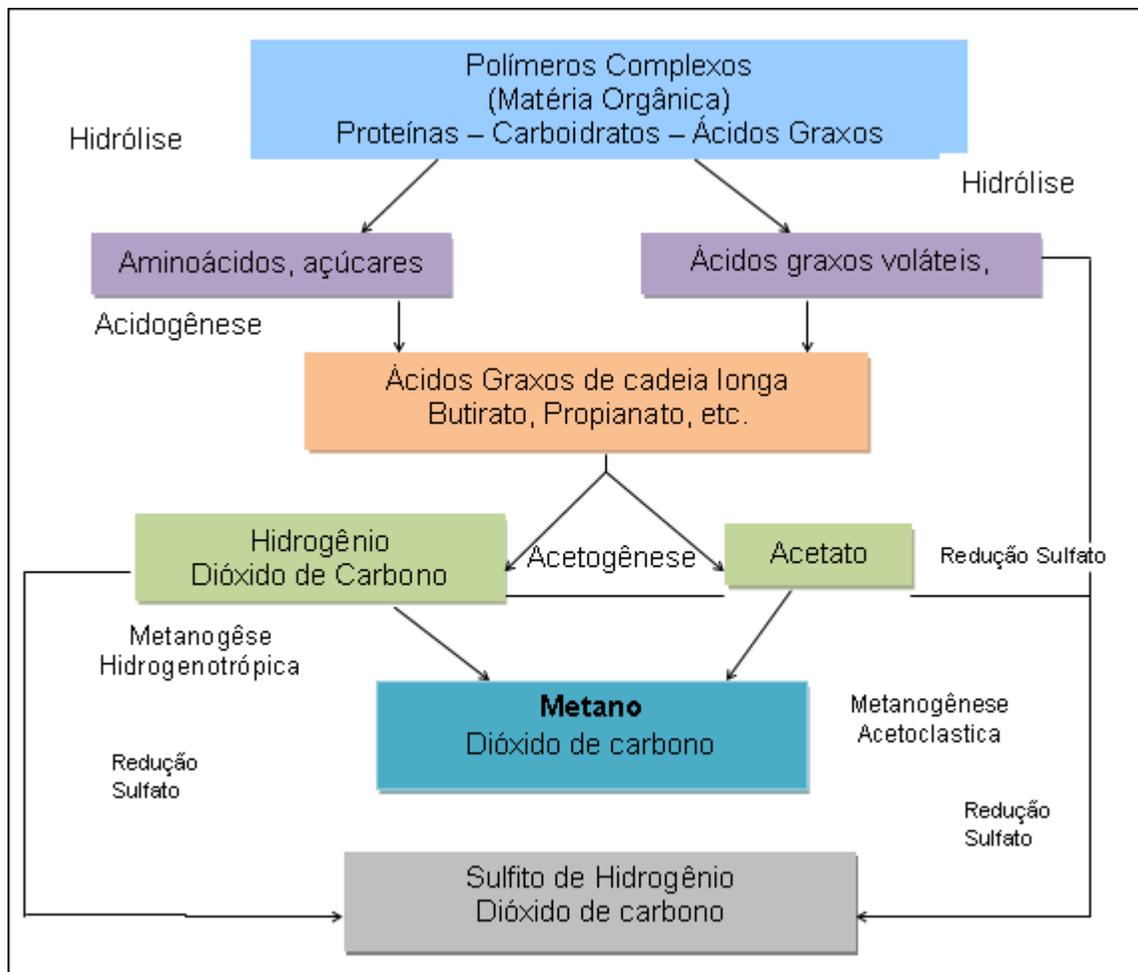


Figura 2.3 – Biodigestão anaeróbia da matéria orgânica. Fonte: (SALOMON, 2007).

a) Hidrólise:

Esta é a primeira fase do processo de degradação anaeróbia, que consiste na hidrólise de materiais orgânicos complexos (polímeros), em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Esta conversão de materiais orgânicos complexos em materiais dissolvidos é conseguida por meio da ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas (CANELA, 2006). Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são os principais produtos dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas.

b) Acidogênese:

Nesta fase, as bactérias produtoras de ácidos degradam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos orgânicos (como ácido láctico e butílico), álcool, como o etanol, e gases, como amônia, hidrogênio e dióxido de carbono, entre outros. A acidogênese é efetuada por um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, como as das espécies *Clostridium* e *Bacteroids*. As primeiras constituem uma espécie anaeróbia que forma esporos, podendo, dessa forma, sobreviver em ambientes totalmente adversos. As *Bacteroids* encontram-se geralmente presentes nos tratos digestivos, participando da degradação de açúcares e aminoácidos. A maioria das bactérias acidogênicas é anaeróbia estrita, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias anaeróbias estritas devem ser protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

c) Acetogênese:

As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário, que produz

substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (CHERNICHARO, 1997).

d) Metanogênese:

Logo após a fase da acetogênese, começa o trabalho das bactérias metanogênicas, como as *Metanobactérias* e *Metanococcus*. De todos os produtos finais da fase de formação do ácido, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas. Pelo menos 50% da DQO biodegradável é convertida em propionato e butirato, os quais posteriormente são decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas (NOGUEIRA, 1986); (CHERNICHARO, 1997).

Nove espécies de bactérias formadoras de metano são conhecidas, dentre elas, os bastonetes, cocos e micrococos, tendo como principais características serem imóveis, não esporulantes, de desenvolvimento lento e anaeróbico obrigatórios. Estas bactérias são microrganismos extremamente sensíveis às variações bruscas de temperatura, que devem ser corrigidas imediatamente logo que forem verificadas estas variações. Quando ocorre a queda brusca de temperatura, ocorre uma progressiva redução na produção de biogás até a sua parada total. Em função da temperatura requerida para seu desenvolvimento são conhecidos três grupos de bactérias metanogênicas: as psicrófilas, que se desenvolvem em temperaturas menores que 20° C; as mesófilas, que se desenvolvem na faixa de temperatura de 20 a 45 ° C, tendo como ótimo rendimento a temperatura de 35° C; e as termófilas, que se desenvolvem em temperaturas acima de 45° C, tendo como seu ponto ótimo a temperatura de 54° C (CANELA, 2006).

A metanogênese pode ocorrer de duas formas, sendo a primeira, o processo oxidativo da metanogênese hidrogenotrófica, em que ocorre a produção do metano a partir do hidrogênio e o dióxido de carbono atua como aceptor de elétrons, sendo reduzido a metano. Esta maneira é menos eficiente em termos de conversão global, mas pode ser realizada por praticamente todas as bactérias metanogênicas. A segunda é a metanogênese acetotrófica, em que ocorre a produção de metano a partir do acetato, em que o carbono orgânico, na forma de acetato, é convertido em metano (CANELA, 2006).

Segundo NOGUEIRA (1986), “a digestão anaeróbia requer interação das bactérias fermentativas e metanogênicas, o sucesso do processo depende de um balanço delicado do sistema ecológico. A população de bactérias no biodigestor são interdependentes quase simbióticas. As bactérias formadoras de ácido asseguram que o meio do digestor esteja livre de oxigênio e produzem o alimento básico para as bactérias metanogênicas, além de suas enzimas agirem sobre substâncias complexas (proteínas, lipídeos e carboidratos), liberando sais de amônia, as únicas fontes de nitrogênio que as bactérias metanogênicas aceitam. Estas, por sua vez, embora não possam viver sem formadoras de ácido, removem os produtos finais de metabolismo das primeiras e convertem em gases. Se essa conversão não ocorresse, as condições no biodigestor se tornariam tão ácidas que matariam as bactérias formadoras de ácidos. O resultado é tal que, em um digestor em operação, a população bacteriana estabelece um relacionamento interdependente, sinérgico, ocorrendo qualquer tipo de alteração nas condições de operação, como variações rápidas de temperatura ou mudanças bruscas no teor de material orgânico, a primeira coisa que acontece é uma redução na produção de metano, associada a um aumento da acidez”.

#### *2.4.2 Fatores que interferem na fermentação metanogênica*

Segundo NOGUEIRA (1986), a princípio, as bactérias formadoras de ácidos fracionam a matéria orgânica e produzem ácidos voláteis, resultando em um aumento da acidez do meio e uma redução do pH. Depois disso, as bactérias metanogênicas começarão a agir transformando os ácidos em metano, neutralizando o meio e elevando o pH. A elevação do pH também pode ocorrer pelo teor de amônia, que aumenta quando as proteínas começam a ser digeridas. A amônia dissolvida em água se torna bastante alcalina. Outro fator atuante sobre o pH, agindo de modo a estabilizá-lo, é o bicarbonato, que torna o meio alcalino. A concentração do íon bicarbonato é diretamente proporcional ao teor de dióxido de carbono e ao pH do meio. Devido a isso, se as bactérias do primeiro grupo produzirem mais alimentos do que as metanogênicas conseguirem digerir, o dióxido de carbono liberado aumentará a concentração de bicarbonato. Isso previne uma queda acentuada do pH, o que causaria a morte das bactérias metanogênicas. O pH ideal no processo de biodigestão anaeróbia situa-se entre 7 e 8, em torno de 7,2, ou seja, levemente alcalino.

Entre os fatores físicos que afetam o crescimento microbiano, a temperatura é um dos mais importantes. Os microrganismos não possuem meios de controlar sua temperatura interna, e dessa forma, a temperatura no interior do digestor é determinada pela temperatura do ambiente externo (CHERNICHARO, 1997). Para que não ocorram mudanças bruscas na temperatura, é aconselhável que a escolha do terreno para a instalação do biodigestor e os processos de impermeabilização das paredes do aparelho, sejam cuidadosamente executados, a fim de assegurar uma temperatura relativamente estável. Quando há acréscimos na temperatura, as reações biológicas no interior do biodigestor se processam muito mais rapidamente, resultando em uma operação mais eficiente e tempo de retenção menor. Dois níveis de temperatura ótimos para a digestão anaeróbia foram estabelecidos. Para a mesofílica, a faixa de temperatura situa-se entre 30 a 37°C e, para a faixa termofílica, a temperatura ideal é de cerca de 50°C.

Para o desenvolvimento das atividades biológicas dos microrganismos anaeróbicos, seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo, é indispensável a vedação do biodigestor, para que não entre oxigênio. Sabe-se que a decomposição de biomassa em contato com o oxigênio produz dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), enquanto que, na ausência de ar, é produzido o gás metano. Qualquer falha na vedação do biodigestor inibe ou inviabiliza a produção de biogás (GASPAR, 2003).

NOGUEIRA (1986), afirma que “o efeito da temperatura sobre a biodigestão anaeróbia é significativo, a temperatura não deve variar mais que 2° C por dia, variações de 1° C já afetam a produção, quando em regime normal. Conseguem-se produtividades bem maiores pela operação em faixas adequadas de temperaturas, o que justifica a preocupação em aquecer os biodigestores, sendo importante em lugares onde existem longos períodos de baixas temperaturas, nas regiões serranas e zonas temperadas do Brasil, porém, quando se emprega o próprio biogás para aquecimento do biodigestor, usualmente se consome um terço da energia total produzida. As principais formas de se aquecer um biodigestor são: recircular a biomassa através de um trocador de calor externo, passar água aquecida em serpentinas dentro do biodigestor, aquecer as paredes do biodigestor e injetar diretamente vapor. Pela simplicidade, os biodigestores rurais devem evitar o aquecimento externo. Mesmo quando for disponível na propriedade uma fonte gratuita de calor, como por exemplo o escapamento do motor de um grupo gerador, deve-se questionar se não é mais oportuno usá-la para outros fins”.

Um dos aspectos mais importantes para a biodigestão é o teor de carbono. Geralmente, se a concentração de sólidos orgânicos é alta, por volta de 5% esta condição estará no nível ideal. Outro componente também importante na matéria orgânica é o teor de nitrogênio. A presença do nitrogênio é importante porque todos os organismos vivos necessitam dele para sintetizar proteínas, devendo existir uma correta proporção entre carbono e nitrogênio, senão as bactérias não são capazes de consumir todo o carbono presente, e então o desempenho do processo será baixo. Entretanto, no caso do excesso de nitrogênio, ele não será consumido e se acumulará, usualmente com a amônia, cujos altos teores podem matar ou inibir o crescimento das bactérias, especialmente as metanogênicas. O índice C/N, Carbono/Nitrogênio ideal situa-se entre 20 e 30. É preferível ter-se nitrogênio a mais do que a menos, podendo digerir satisfatoriamente matéria orgânica com relação C/N até 3, e recomenda-se não ultrapassar o valor de 35 para esta relação.

Em relação à carga orgânica, já foram testadas diferentes cargas para diferentes tipos de biodigestores e substratos. Em comparação com outros tipos de tratamentos, o processo anaeróbio responde satisfatoriamente bem às flutuações de carga, principalmente quando os biodigestores já se encontram operando em estado de equilíbrio dinâmico (LEITE et al., 2004).

A diminuição da velocidade da cadeia de reações é comum e as bactérias ficam isoladas do meio em digestão devido à presença de pequenas bolhas. Para evitar a formação de bolhas de metano e/ou dióxido de carbono, que faz com que as bactérias fiquem isoladas do meio em digestão, recomenda-se que o biodigestor possua um mecanismo de agitação. Este procedimento provoca o desprendimento das bolhas em direção à câmara de gás, liberando as bactérias para a continuidade de seu trabalho de degradação da matéria orgânica (GASPAR, 2003).

O teor de água deve normalmente situar-se em torno de 90% do peso do conteúdo total. O excesso ou a falta de água prejudicam a produção de biogás. As características específicas de cada matéria-prima a ser fermentada é que determina o teor de água a ser adicionado na mistura. A produção de biogás só ocorre satisfatoriamente com o correto volume de água, o excesso ou a falta de água prejudicam a produtividade (GASPAR, 2003).

Chega-se ao tempo de retenção necessário para a mistura ser totalmente digerida no biodigestor quando ocorre a máxima produção de gás. O tempo de retenção necessário varia de acordo com o substrato, o tipo de biodigestor, além de outros fatores, podendo chegar a 50 dias, em alguns tipos de biodigestores rurais e em apenas algumas horas, em certos biodigestores industriais. O tempo de retenção é definido pela relação entre o volume do biodigestor e o volume da carga diária, podendo variar em função do acréscimo de aditivos, pela agitação ou variação da temperatura ambiente externa (SALOMON, 2007).

## 2.5 Biogás

Biogás é o gás obtido a partir do tratamento anaeróbio de efluentes durante o processo de degradação da matéria orgânica em ausência de oxigênio, como ocorre em biodigestores, compondo-se basicamente de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A proporção de cada gás na mistura depende de vários parâmetros, como o tipo de biodigestor e o substrato a digerir. O poder calorífico está relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa, sendo este um dos principais responsáveis pelo aquecimento global da terra e extremamente prejudicial à camada de ozônio. “Em vez de liberá-lo na atmosfera é armazenado e transformado em combustível” (NOGUEIRA, 1986).

Para DEGANUTTI *et al.* (2002), o metano é um gás incolor, altamente combustível, queimado com chama azul lilás, sem deixar fuligem e com um mínimo de poluição. O seu poder calorífico pode variar de 20930 a 29302  $\text{kJ/m}^3$ , de acordo com a porcentagem de metano presente na sua composição, podendo chegar a 50.232  $\text{kJ/m}^3$ , se todo o gás carbônico for eliminado da mistura. Enquanto JORDAN (2005) afirma que normalmente o poder calorífico inferior se situa na faixa de 20938 a 25126  $\text{kJ/m}^3$ , de acordo com sua pureza. Quanto mais puro, maior é o seu poder calorífico, podendo atingir cerca de 50251  $\text{kJ/m}^3$ , com a retirada de  $\text{CO}_2$ .

A Tabela 2.2, compara as características de vários combustíveis e contempla os valores de massa específica e poder calorífico, tanto o inferior (água em forma de vapor) quanto o superior (água na forma líquida).

**Tabela 2.2** - Características de vários combustíveis.

Combustível	Densidade	Poder Calorífico	
	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	Inferior (kcal/kg)	Superior (kcal/kg)
Petróleo	870	10.200	10.800
Carvão vapor	n.d.	2.850	3.000
Carvão metalúrgico nacional	n.d.	6.420	6.800
Lenha comercial	390	3.100	3.300
Bagaço de cana <sup>3</sup>	n.d.	2.130	2.257
Óleo Diesel	840	10.100	10.750
Óleo Combustível	1000	9.590	10.085
Gasolina automotiva	740	10.400	11.220
Gasolina de aviação	720	10.600	11.290
GLP	550	11.100	11.750
Nafta	720	10.630	11.320
Querosene iluminante	790	10.400	11.090
Gás canalizado Rio de Janeiro <sup>2</sup>	n.d.	3.800	3.900
Gás canalizado São Paulo <sup>2</sup>	n.d.	4.500	4.700
Gás de coqueria <sup>2</sup>	n.d.	4.300	4.500
Coque de carvão mineral	n.d.	6.900	7.300
Lixívia	n.d.	2.860	3.030
Carvão vegetal	250	6.460	6.800
Álcool etílico anidro	791	6.750	7.090
Álcool etílico hidratado	809	6.300	6.650
Gás de refinaria	780	8.400	8.800
Gás natural úmido <sup>2</sup>	n.d.	9.930	10.454
Gás natural seco <sup>2</sup>	n.d.	8.800	9.256

n.d. = não disponível

<sup>1</sup> À temperatura de 20°C, para derivados de petróleo e de gás natural

<sup>2</sup> kcal/m<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Bagaço com 50% de umidade

Fonte: Adaptado de (BEN, 2010).

O estudo da viabilidade de emprego do biogás normalmente se inicia pela avaliação de equivalência energética entre o biogás e o combustível a ser substituído. Além do poder

calorífico, é necessário que se observem outras propriedades como presença de contaminantes, acidez e pressão. Estas considerações contribuem para uma previsão adequada das adaptações necessárias à utilização do biogás, como único recurso energético ou como combustível complementar.

A tabela 2.3 mostra a equivalência energética do biogás de acordo com alguns autores.

**Tabela 2.3** – Equivalência energética do biogás comparado a outras fontes de energia.

Energético	Ferraz e Mariel (1980)	Sganzerla (1983)	Nogueira (1986)	Coldebella <i>et al</i> (2006)
Gasolina (L)	0,61	0,613	0,61	0,6
Querosene (L)	0,58	0,579	0,62	-
Diesel (L)	0,55	0,553	0,55	0,6
GLP (kg)	0,45	0,454	1,43	-
Álcool (L)	-	0,79	0,80	-
Carvão M. (kg)	-	0,735	0,74	-
Lenha (kg)	-	1,538	3,5	1,6
Eletricidade (kWh)	1,43	1,428	-	6,5

Fonte: (FERRAZ e MARIEL, 1980), (SGANZERLA, 1983), (NOGUEIRA, 1986), (COLDEBELLA *et al.*, 2006).

A utilização do biogás terá como resultado uma das seguintes formas de energia: elétrica, térmica ou mecânica, como também poderá ocorrer a geração combinada de mais de um tipo de energia. A utilização destas fontes energéticas alternativas proporcionam a conservação de recursos fósseis e agregam importante valor econômico.

O biogás é uma forma energética cuja produção, ao contrário do álcool da cana-de-açúcar e de óleo extraídos de outras culturas, não compete com outros usos que podem ser dados às terras disponíveis. E pode ser inteiramente obtido de resíduos agrícolas, ou mesmo de excrementos de animais e dos homens. Assim, ao contrário de ser um fator de poluição, transforma-se em um auxiliar do saneamento ambiental. O biogás também pode ser produzido a partir do lixo urbano, nos chamados “aterros sanitários” de quase todos os

países desenvolvidos do mundo e cuja experiência começa a ser implementada em algumas cidades brasileiras.

### *2.5.1 Produção do biogás*

O processo de produção do biogás depende de vários fatores, dentre eles, a temperatura e o pH do substrato, a concentração de nutrientes e sólidos da solução, sendo que as dimensões dos biodigestores devem levar em conta, também, a produção de resíduos que se tem disponível para abastecê-los. Segundo TURDERA e YURA (2006), a produção do biogás tem seu melhor desempenho com pHs entre 7 e 8, e temperatura ao redor de 35°. Em pHs menores que 7, a geração do gás é paralisada, e em temperaturas abaixo de 15° a produção é muito pequena. A concentração de sólidos indicada é a de 7 a 9 partes de sólidos em 100 partes de líquidos (para fezes bovinas, isso equivaleria a 4 partes de fezes bovinas misturadas a 5 partes de água). Quando a concentração de nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, fatores de crescimento, micronutrientes), é insuficiente, a atividade microbiana é retardada, diminuindo a produção de biogás. Para suprir esta deficiência, recomenda-se adicionar uréia (presente na urina animal) ou fertilizantes químicos. Estes fatores influenciam no período ideal de retenção do material no biodigestor.

Em biodigestores contínuos, o período de retenção é determinado pela frequência e pelo volume do material com o qual o biodigestor é diariamente abastecido (a cada entrada de material, existe uma saída). Se o material ficar retido mais tempo do que o ideal, a produção do gás sofrerá diminuição, e provavelmente, o biodigestor foi hiper-dimensionado. Se o material ficar retido menos tempo do que o necessário, a pasta nutritiva que sairá terá mau cheiro e poderá se tornar foco de microorganismos e insetos nocivos à saúde do homem (TURDERA e YURA, 2006).

Embora o processo de produção de biogás seja conhecido há muito tempo, este e outras fontes renováveis de energia só passaram a ter importância, após a crise energética e o aumento dos problemas ambientais na esfera global. Atualmente, já existem programas governamentais de incentivo ao crédito para a instalação de biodigestores rurais, a fim de promover o saneamento ambiental, incentivar a produção de energias alternativas e melhorar a qualidade de vida no meio rural (BEZERRA, 2002).

### 2.5.2 Composição do biogás

A composição do biogás é variável e ele se caracteriza como um gás ácido. A maioria dos digestores anaeróbios produz um biogás que contém entre 0,3 e 2% de H<sub>2</sub>S e significantes quantidades de mercaptanas, observando-se também alguns traços de nitrogênio e hidrogênio (COSTA, 2006). A Tabela 2.4, a seguir, demonstra os principais componentes do biogás.

**Tabela 2.4** - Composição do biogás.

Gás	Volume
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 90%
Gás Carbônico (CO <sub>2</sub> )	10 a 50%
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0 a 1%
Gás Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0 a 3%
Oxigênio (O <sub>2</sub> ) + Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0 a 1%

Fonte: (ALVES, 2000).

As características do biogás dependem da pressão, temperatura, umidade, concentração de metano e concentração de gases inertes e/ou ácidos. O biogás pode ser usado nas condições em que é gerado e, dependendo da aplicação, pode ser necessária a redução da concentração de H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, umidade ou mesmo à elevação da pressão.

A densidade do CH<sub>4</sub> puro é de 0,6 kg/Nm<sup>3</sup>. Energeticamente o biogás purificado corresponde aproximadamente ao GNC (Gás Natural Combustível), sendo que seu poder calorífico é menor se houver grande quantidade de contaminantes na mistura que o compõe.

SALOMON (2007), em estudo sobre a biodigestão anaeróbia da vinhaça, considera a densidade do biogás em 0,784 kg/m<sup>3</sup>.

Entre as características do biogás, pode-se ressaltar que: o biogás não apresenta toxicidade, mas não deve ser inalado, pois no organismo humano dilui o oxigênio, o que pode provocar a morte por asfixia. É um gás muito estável e solúvel em água, sua combustão não libera resíduos. Sob uma pressão de 140 atm, o metano se liquefaz a 0° C, enquanto que outros hidrocarbonetos mais pesados (como os gases componentes do GLP – propano,

isobutano e butano), se liquefazem a baixas pressões (o propano se liquefaz a 8,7 atm; o isobutano a 3,2 atm e o butano a 2,2 atm). O biogás é mais denso que o ar (a densidade do biogás em relação ao ar é de 0,55).

HARDOIM e GONÇALVES (2000) concluíram que em um confinamento de 100 vacas, um biodigestor pode produzir um volume de 118 m<sup>3</sup> de biogás diariamente, o que equivale a 1,18 m<sup>3</sup> de biogás por bovino, enquanto COLDEBELLA *et al.* (2006), afirma que uma vaca leiteira com 600 kg de peso, produz diariamente 0,98 m<sup>3</sup> de biogás.

### 2.5.3 Utilização do biogás

Nas propriedades rurais, a utilização do biogás reduz, quando não acaba, com a necessidade de busca de outras fontes energéticas. O uso de biodigestores estimula a agricultura, ao realizar a devolução de produtos vegetais ao solo e aumentar o volume e a qualidade de adubo orgânico (através do biofertilizante).

A utilização do biogás também traz como benefício a redução de custos de transporte de bujões de gás liquefeito de petróleo (GLP), como também produz economia de combustíveis fósseis utilizados para o abastecimento dos caminhões de transporte. Outra vantagem do biogás em relação ao GLP, é que ele é mais higiênico, reduzindo a fumaça e não deixando resíduos nas panelas e demais utensílios de cozinha (GASPAR, 2003).

**Tabela 2.5** – Consumo de biogás em diversas utilizações.

EQUIPAMENTOS	UNIDADE	CONSUMO
Lampião (cada)	m <sup>3</sup> /h	0,14
Cozimento (5 pessoas x 0,23 m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> /h	1,15
Fogão	m <sup>3</sup> /dia/pessoa	0,34
Motor	m <sup>3</sup> /hp/h	0,45
Chuveiro	m <sup>3</sup> /banho de 15 minutos	0,80
Campânula para aquecer pintos	m <sup>3</sup> /h para 1500 kcal	0,16
Geladeiras	m <sup>3</sup> /dia	2,0
Incubadora	m <sup>3</sup> /h/100 l de capacidade	0,05
Geração de Eletricidade	m <sup>3</sup> /kWh	0,62
Total de consumo/dia	m <sup>3</sup>	5.71

Fonte: (CETEC, 1982).

O biogás, além de sua utilização doméstica, também pode ser utilizado em processos produtivos animais, como a bovinocultura de leite, para funcionar os diversos equipamentos do setor, tornando-o auto-sustentável energeticamente. A demanda total de energia (elétrica ou mecânica) em uma propriedade rural determina a quantidade de biomassa e de animais necessários para se obter a produção necessária de biogás. Este cálculo deve ser levado em conta na hora de planejar as dimensões do biodigestor (GASPAR, 2003).

## 2.6 Biofertilizante

Segundo BEZERRA (2002), biofertilizante é o material sólido mineralizado resultante de processos de tratamento biológico. Este material, contém normalmente micro e macroelementos importantes nos processos de fertilização do solo. A Tabela 2.6, apresenta os teores de pH, macronutrientes e matéria orgânica do biofertilizante.

**Tabela 2.6** – Teores de componentes do biofertilizante.

COMPOSIÇÃO	QUANTIDADE %
pH	7,5
Matéria Orgânica	85 %
Nitrogênio	1,8
Fósforo	1,6
Potássio	1,0

Fonte: (SGANZERLA, 1983).

O biofertilizante é um adubo orgânico, isento de agentes causadores de doenças e pragas, contribuindo para o restabelecimento do teor de húmus do solo, melhorando suas propriedades químicas, físicas e a atividade microbiana, que tem importante papel na estruturação e fixação de nitrogênio atmosférico, função esta que não pode ser desempenhada por nenhum fertilizante químico (CANELA, 2006).

Segundo NOGUEIRA (1986), grande parte dos esterco de animais retornam ao solo, fertilizando as plantas. No entanto, em diversos sistemas de manejo, uma parcela desses nutrientes é perdida, sem chegar ao solo, ou chegando de forma impossível de ser utilizada.

Os resíduos orgânicos possuem grande capacidade fertilizante, devendo ser melhor explorada. O biofertilizante possui vantagens inerentes aos adubos orgânicos: devido ao seu pH, em torno de 7,5, funciona como corretor de acidez, eliminando o alumínio tóxico e liberando o fósforo dos sais insolúveis do alumínio e ferro; com a elevação do pH, dificulta-se a multiplicação dos fungos patogênicos.

A biodigestão anaeróbia não reduz a capacidade fertilizante dos resíduos. O teor de amônia pode ser mantido, caso todo o material digerido seja levado ao solo, sem a separação da parte líquida. O nitrogênio contido nos resíduos só pode ser utilizado após o processo de biodigestão, quando aproximadamente 50% deste nitrogênio se encontra na forma de amônia dissolvida, podendo ser facilmente assimilado pelas plantas. A biodigestão aumenta a disponibilidade do nitrogênio em materiais orgânicos acima da faixa usual de 30 a 60%. O teor de fosfato não se altera e sua disponibilidade de aproximadamente 50% também permanece igual. A disponibilidade de potássio é usualmente entre 75 a 100%. A Tabela 2.7 apresenta os resultados de uma análise química de um esterco fresco e de um esterco biodigerido anaerobiamente.

**Tabela 2.7** – Análise química do esterco fresco e biodigerido anaerobiamente.

<b>Especificação</b>	<b>Esterco fresco</b>	<b>Esterco biodigerido</b>
Umidade	81,8%	80,5%
Nitrogênio orgânico	0,34%	0,60%
Nitrogênio amoniacal	-	0,15%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	0,13%	0,35%
K <sub>2</sub> O total	0,40%	0,70%
Matéria orgânica	16,40%	15,80%

Fonte: (NOGUEIRA, 1986).

A elevação de teor percentual dos macronutrientes (N,P,K), se dá devido a redução de teor de carbono, na formação do metano e do dióxido de carbono. Segundo NOGUEIRA (1986), no estrume natural o teor de nitrogênio é de 0,75 %, enquanto o biodigerido possui cerca de 1,5 %. Em relação ao fósforo os percentuais alteram de 0,20% para 0,35 % e para o potássio, 0,40 % no esterco natural e 0,70% no esterco biodigerido. O biofertilizante é mais

rico em húmus e possui granulação mais fina em comparação com o fertilizante químico, o que facilita sua aplicação no solo.

### *2.6.1 Produção, características e utilização do biofertilizante*

Após a produção do biogás, o biofertilizante sai do biodigestor sob a forma líquida, sendo rico em material orgânico (húmus), com grande poder de fertilização. Este biofertilizante, quando aplicado ao solo, melhora suas qualidades físicas, químicas e biológicas. SGANZERLA (1983) lembra que uma das mais graves consequências da aplicação excessiva de fertilizantes químicos é a mineralização do solo, que causa o ressecamento, o endurecimento e dificulta a entrada da água e do ar, o que provoca e facilita a ocorrência de erosão. Além disso, os sais, muito solúveis, destroem as bactérias que vivificam o solo, deixando-o indefeso, propenso a invasões por insetos, fungos, nematóides e vírus, entre outros, que causarão, certamente, danos às plantas. Para solucionar este problema, o agricultor utiliza os defensivos agrícolas, que além de poluírem o solo, eliminam os predadores naturais das pragas, criando a necessidade de aplicação de novos defensivos, o que dá início a um ciclo vicioso, que só poderá ser quebrado com a aplicação de grande quantidade de matéria orgânica. O biofertilizante, ao contrário dos adubos químicos, melhora a estrutura do solo deixando-o mais fácil de ser trabalhado e facilitando a penetração das raízes, que conseguem absorver melhor a umidade do subsolo, resistindo melhor aos longos períodos de estiagem.

Para GASPAR (2003), outra vantagem advinda da aplicação de biofertilizantes é que estes deixam o solo mais poroso, facilitando a respiração dos vegetais e proporcionando melhores condições para se desenvolverem. O gás carbônico presente no ar, ao circular melhor pelo solo, forma ácido carboxílico, o qual irá solubilizar sais que se encontram em formas insolúveis, facilitando sua assimilação pelas plantas.

O biofertilizante favorece a multiplicação das bactérias, dando vida e saúde ao solo, fixando o nitrogênio atmosférico e transformando-o em sais aproveitáveis pelas plantas. Além destas vantagens, que aumentam muito a produtividade das lavouras, deve-se ressaltar que o biofertilizante já se encontra completamente "curado", não sendo passível de nova fermentação, não apresenta odor e nem é poluente e, com isso, não atrai moscas ou outros insetos. Ao contrário de outros tipos de adubos, o biofertilizante, pode ser aplicado

diretamente no solo, em forma líquida ou desidratada. O poder germinativo das sementes de plantas prejudiciais à lavoura é destruído pelos efeitos da biofermentação, não oferecendo perigo de infestação nas lavouras onde forem aplicados os biofertilizantes (SGANZERLA, 1983).

## **2.7 Análise do ciclo de vida (ACV)**

Segundo COSTA (2007), a ACV – Análise do Ciclo de Vida é uma das técnicas mais utilizadas para quantificar de forma global e objetiva as cargas ambientais de uma atividade. Sistemas de produção sustentáveis devem apresentar soluções para a redução dos impactos ambientais originados nos processos produtivos. Produzir com sustentabilidade significa minimizar as emissões atmosféricas e conservar recursos energéticos e materiais. A ACV é uma ferramenta para planejamento na utilização de recursos energéticos que orienta as tomadas de decisões, para que sejam as mais adequadas na redução dos impactos ambientais.

Para MONTEIRO (2008), a ACV é uma ferramenta que permite uma melhor gestão ambiental, avaliando todos os efeitos ambientais ocorridos ao longo da trajetória do produto, desde a extração da matéria-prima, passando pelo processo de produção e uso, como também as possibilidades de reciclagem e reuso, até sua disposição final. A ACV não irá determinar qual produto ou processo é melhor, ela apenas avalia seu impacto ambiental.

Um dos maiores desafios da agropecuária atual é se desenvolver de maneira sustentável. Para que isso aconteça torna-se necessária a implantação de metodologias e ferramentas de pesquisa, que quantifiquem os impactos ambientais decorrentes deste tipo de produção. Neste sentido, muitas instituições de pesquisa agropecuária já estão desenvolvendo softwares capazes de quantificar as emissões atmosféricas originadas dos sistemas de produção agrícola (RODRIGUES *et al.*, 2002).

Além de considerar o consumo de recursos naturais e energéticos, a ACV identifica e avalia as oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de um produto ou atividade. Ao analisar o ciclo de vida de um produto, a ACV também considera a possibilidade da substituição deste produto por outro que desempenhe a mesma função no mercado e que cause menos impactos ambientais.

### 2.7.1 *Aplicações da ACV*

As técnicas de análise do ciclo de vida têm diferentes aplicações, dentre elas, a de desenvolver novos produtos ou otimizar os processos produtivos, reduzindo os impactos ambientais. Os esquemas montados, chamados na Europa de Selos Verdes e no Brasil de Rótulos Ambientais, frequentemente são baseados em análises do ciclo de vida dos produtos, o que faz com que as empresas iniciem esforços a fim de melhorar o gerenciamento de seus processos produtivos.

MONTEIRO (2008) enumera algumas possíveis aplicações da ACV: desenvolvimento do planejamento estratégico; otimização, melhoria e projeto de produtos e processos; identificação de oportunidades de melhoria ambiental; auxílio ao estabelecimento de procedimentos comerciais ou especificações; suporte à auditoria ambiental e à minimização de resíduos; desenvolvimento do marketing ambiental; seleção de critérios para a rotulagem ambiental; definição de políticas públicas, privadas e auxílio às metodologias educacionais.

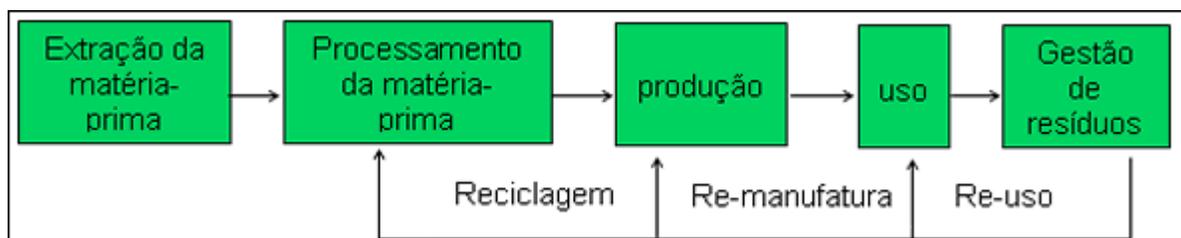
### 2.7.2 *Filosofia da ACV*

A filosofia desta análise é identificar os impactos ambientais possíveis de serem causados, desde o momento da extração da matéria-prima até a disposição final do produto, como forma de aprimorar econômica e ambientalmente o projeto, produzindo com sustentabilidade (COSTA, 2007).

Segundo COSTA (2007), “a ACV mostra informações a respeito das interações significativas entre o sistema do produto e o meio ambiente, funcionando como ferramenta de obtenção e compilação de informações. A ACV pode ser aplicada na identificação de oportunidades de melhoria de desempenho, buscando a origem das principais contribuições de um ciclo de vida de produto os impactos ambientais potenciais. Uma vez que se sabe o quanto cada etapa contribui, pode-se proceder a ações de planejamento direcionadas à minimização dos impactos. Outra aplicação desta ferramenta seria a comparação ambiental entre produtos de função equivalente. Assim, levantado o aspecto ambiental de um ciclo de vida, pode-se compará-lo a outro, a produtos distintos, de mesma função disponível no

mercado, e também a comparação de um produto específico com um padrão determinado para aquele tipo de produto, como feito no caso dos rótulos e declarações ambientais. A idéia, neste caso, é realizar a avaliação de quais são os aspectos ambientais mais significativos, e geralmente quais seus respectivos impactos potenciais”.

Os cinco estágios típicos do ciclo de vida de um produto são: extração de matéria-prima, processamento da matéria-prima, produção, uso final e gestão de resíduos, conforme Figura 2.4.



**Figura 2.4** - Estágios do ciclo de vida de um produto ou serviço.

Fonte: (COSTA, 2007).

Todo processo produtivo causa impactos ambientais, que pode ocorrer desde o momento da extração das matérias-primas utilizadas na fabricação do produto até a disposição final dos resíduos. Cada estágio do ciclo de vida do produto é responsável por algum tipo de impacto ambiental, que podem ser minimizados quando se utiliza a ACV como ferramenta de gestão destes impactos. O reuso ou reciclagem dos resíduos gerados no processo produtivo se apresenta como uma alternativa para a redução dos impactos ambientais associados à produção (COSTA, 2007).

### 2.7.3 A ACV relacionada à atividade pecuária

Devido à expansão do setor agropecuário no Brasil e ao crescente aumento das emissões de GEE, tem-se buscado ferramentas que quantifiquem estas emissões, procurando principalmente atender aos compromissos firmados em fóruns internacionais, de maneira especial à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. O Ministério da Ciência e Tecnologia elaborou inventários brasileiros de emissões antrópicas de GEE. De acordo com o Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal (Parte 2), MCT (2010), as principais fontes emissoras de metano na agropecuária

são a fermentação entérica e o manejo dos dejetos de animais, representadas principalmente pelo rebanho bovino, seguido pela cultura do arroz irrigado e a queima de resíduos agrícolas, conforme mostra a Tabela 2.8.

**Tabela 2.8** – Principais fontes de emissão de metano na agropecuária e quantidades emitidas no Brasil, em 2005.

<b>Fonte</b>	<b>Emissões de metano (kg)</b>
Fermentação entérica <sup>(1)</sup>	11,5 x 10 <sup>9</sup>
Manejo dos dejetos de animais <sup>(2)</sup>	723 x 10 <sup>6</sup>
Cultura de arroz	426 x 10 <sup>6</sup>
Queima de resíduos agrícolas	133 x 10 <sup>6</sup>

1. Considerou-se, para cálculo, as emissões de metano por fermentação entérica dos seguintes rebanhos: gado de leite, gado de corte e outros animais.
2. Considerou-se, para cálculo, as emissões de metano pelo manejo dos dejetos dos seguintes rebanhos: gado de leite, gado de corte, suínos, aves e outros animais.

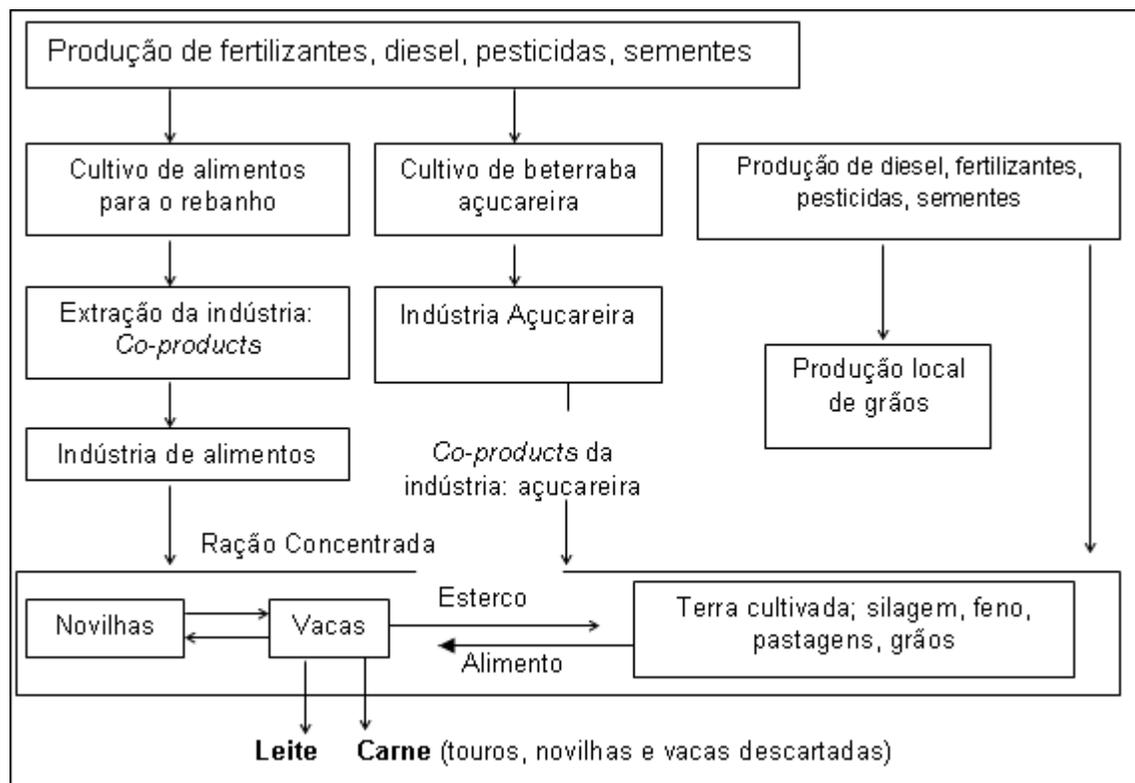
Fonte: Adaptado de (MCT, 2010).

A ACV relacionada com a atividade pecuária teve um de seus primeiros estudos realizado por CEDERBERG e MATTSSON (2000) apud XAVIER e CALDEIRA-PIRES (2004), conforme mostra a Figura 2.5, sendo comparados os impactos ambientais de duas fazendas de produção de leite na Suécia – uma utilizando o sistema convencional, e a outra, o sistema orgânico. O estudo foi conduzido durante um ano agrícola (setembro de 1996 a agosto de 1997), incluindo as maiores diferenças entre os sistemas produtivos das fazendas. Foram consideradas as seguintes categorias de impacto: a) Recursos: energia, materiais e uso da terra; b) Saúde humana: uso de pesticidas; c) Efeitos ecológicos: aquecimento global, acidificação, eutrofização, formação de foto oxidantes, redução da camada de ozônio.

Nesse estudo, observou-se que sistemas agrícolas de baixas entradas, como é o caso do sistema orgânico, apresentam benefícios ambientais como a redução considerável no uso de pesticidas e fósforo. Entretanto, ao serem consideradas outras categorias de impacto, como o aquecimento global, a acidificação e a eutrofização, ambos os sistemas precisavam adotar medidas de redução dos potenciais impactos ambientais.

BERLIN (2002) apud XAVIER e CALDEIRA-PIRES (2004), “reconhecendo a importância do setor do leite e de outros produtos lácteos na alimentação da população da

Suécia, efetuou um estudo de ACV, enfocando o processo de produção de um tipo de queijo bastante consumido (o *Hushallsost*, do tipo *semi-hard*), com o objetivo de investigar as consequências ambientais decorrentes da produção de queijo nesse país. As principais categorias quantitativas de impacto ambiental selecionadas foram: uso de recursos, consumo de energia, aquecimento global, acidificação e eutrofização. Os parâmetros-chave dessas categorias são: óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ), amônia ( $NH_3$ ) e suas emissões. Os resultados de cada atividade englobaram a produção, o processamento do ingrediente ou do produto e seu transporte para a próxima atividade. Nesse estudo, demonstrou-se que a fase de produção de leite contribuiu para o maior impacto ambiental em todas as categorias analisadas e que a fase industrial da produção do queijo foi a segunda maior fonte de impactos”.



**Figura 2.5** – Ciclo de vida da produção de leite de fazendas convencionais e orgânicas na Suécia.

Nota: Apenas as fazendas convencionais usam fertilizantes e pesticidas nas suas lavouras e nos *co-products* oriundos da indústria açucareira (em itálico).

Fonte: (XAVIER e CALDEIRA-PIRES, 2004).

Em outro estudo, HASS *et al.* (2001), implementaram uma ACV na região de Allgäu (Alemanha) com o objetivo de comparar os impactos ambientais relevantes de sistemas de produção pecuária em diferentes níveis tecnológicos (intensivo, sistema orgânico e extensivo). Para determinar os indicadores desse estudo (Tabela 2.9), foi feita uma pesquisa de opinião pública, considerando as políticas agroambientais européias e adotados os demais indicadores normalmente utilizados em estudos de ACV. Através de indicadores ambientais específicos, foram traçados os perfis dos diferentes tipos de produção, confirmando a importância da ACV na comparação de diferentes sistemas produtivos.

**Tabela 2.9** – Categorias de impacto e indicadores selecionados na aplicação de ACV na região de Allgäu, Alemanha.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicador ambiental</b>
<b>Consumo de recursos</b>	
Energia	Uso de energia primária
Minerais	Uso de fertilizantes fosfatados e potássicos
<b>Potencial de aquecimento global</b>	Emissões de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O (equivalentes CO <sub>2</sub> )
<b>Esgotamento dos solos</b>	Acumulação de metais pesados
Pastagens	Emissões de NH <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , excedente de N e P (em equivalentes de SO <sub>2</sub> e PO <sub>4</sub> )
Outros ecossistemas	
<b>Qualidade da água</b>	Fertilização nitrogenada, balanço de N do sistema e lixiviação de nitrato
Lençol freático (conteúdo de nitrato)	
Água de superfície (eutrofização com P)	Fertilização fosfatada, balanço de P e percentagem de área drenada
<b>Biodiversidade</b>	Pastagens, limites (cercas vivas) e margens de campos (densidade, diversidade, estado/cuidados, cercas)
	Pastagens, limites (cercas vivas) e margens de campos, manejo dos animais (período, alimentação, local de confinamento do rebanho), layout da fazenda (tipo regional, construções, jardins, árvores, pomar)
<b>Efeito estéticos na paisagem</b>	
<b>Bem-estar dos animais</b>	Sistema de confinamento e suas condições, manejo do rebanho (ex.: luminosidade, espaço, período de pastejo, cuidados dispensados aos animais)

Fonte: (XAVIER e CALDEIRA-PIRES, 2004).

XAVIER (2003) analisou os impactos ambientais e os resultados econômicos de quatro sistemas de produção agropecuária no município de UNAÍ/MG. Os impactos ambientais foram quantificados utilizando as ferramentas da ACV, tendo concluído que o uso intensivo de insumos, como fertilizantes e rações proporciona maior produtividade. No entanto, a adoção deste tipo de sistema ocasiona os maiores impactos ambientais do sistema produtivo. Neste sentido, é importante que outros estudos de ACV sejam feitos para que surjam novas alternativas de produção, para que a agropecuária brasileira possa se desenvolver de maneira mais sustentável.

## 2.8 Coeficientes energéticos

Uma grande quantidade de energia de origem fóssil é requerida na produção de fertilizantes químicos. Segundo CAPAZ (2009), existe uma grande variação entre os coeficientes energéticos para a produção de um mesmo produto, que é justificada pelo fato dos autores terem feito estudos distintos em condições específicas diferentes. Este fato faz com que as análises energéticas de um mesmo produto apresentem divergências, principalmente quando certos insumos são responsáveis por grande contribuição energética.

A Tabela 2.10 apresenta os coeficientes energéticos utilizados para o cálculo do gasto energético para a produção dos fertilizantes químicos, por vários autores, em análises energéticas de diferentes produtos.

**Tabela 2.10** - Coeficientes energéticos para a produção de fertilizantes químicos considerados em análises energéticas.

<b>Autores</b>	<b>Nitrogênio(N)</b>	<b>Fósforo(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b> (MJ/kg)	<b>Potássio(K<sub>2</sub>O)</b>
PELLIZZI (1992)	73	13	9
ROMERO <i>et al.</i> (2006)	62,5	9,6	9,2
ALMEIDA <i>et al.</i> (2010)	62,8	9,6	9,6
BUENO (2002)	62,6	9,6	9,2
MACEDÔNIO e PICCHIONI (1985)	63,8	13,9	9,8
SEABRA (2008)	56,3	7,5	7,0
YANÉZ (2008)	48,9	17,4	10,4
PIMENTEL e PATZEK (2005)	66,5	17,4	13,6
SHEEHAN <i>et al.</i> (1998)	66,8	12,8	4,6

Fonte: Elaboração própria.

ROMERO *et al.* (2006); ALMEIDA *et al.* (2010); BUENO (2002), acrescentaram 0,50 MJ/kg, referente ao transporte marítimo, devido ao volume representativo das importações dos adubos utilizados.

MACEDÔNIO e PICCHIONI (1985), em análise do consumo de energia na produção da silagem de milho, constataram que no fluxo de energia direta, os fertilizantes químicos e biológicos foram os maiores consumidores de energia, representando 49,9% do consumo total e os fertilizantes de origem fóssil consumiram 28,4%. O nitrogênio, isoladamente, teve a maior participação no consumo de energia, representando 23,4% sobre o total e 84,1% no grupo dos fertilizantes fósseis.

SEABRA (2008) utilizou dados internacionais sobre o consumo de energia e fatores de emissão de gases de efeito estufa para a produção de fertilizantes e defensivos (valores apresentados nos modelos EBAMM e GREET, os quais representam os valores padrões verificados nos EUA), conforme Tabela 2.11.

**Tabela 2.11** - Demanda de energia e emissões de GEE na produção de defensivos e fertilizantes.

<b>Fertilizante/ Defensivo</b>	<b>Demanda de energia (MJ/kg)</b>	<b>Fator de emissão (kg CO<sub>2</sub> eq/kg)</b>
Nitrogênio (N)	56,3	3,97
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	7,5	130
Potássio (K <sub>2</sub> O)	7,0	0,71
Calcário	0,1	0,01
Herbicida	355,6	25,0
Inseticida	358,0	29,0

Fonte: (SEABRA, 2008).

Os fertilizantes e defensivos agrícolas se destacam em análises energéticas do ciclo de vida dos produtos devido a sua grande representação energética nos processos, como também pelas emissões de GEE liberados pela sua produção. De acordo com a Tabela 2.11, o nitrogênio é o fertilizante químico que mais demanda energia para a sua produção, enquanto a produção de fósforo é a que mais provoca emissões atmosféricas.

## 2.9 Caracterização do esterco bovino

Segundo PALHARES *et al.* (2011), o correto aproveitamento dos esterco dos animais como fertilizantes e o dimensionamento correto do biodigestor dependem do

conhecimento das características químicas dos esterco dos animais de produção. Estes dados são escassos na literatura científica brasileira. Devido ao crescimento do setor agropecuário, torna-se urgente a caracterização dos esterco nas diversas regiões pecuárias. O conhecimento das características químicas dos esterco auxiliará o manejo correto destes nas propriedades, promovendo o desenvolvimento pecuário com responsabilidade ambiental.

De acordo com VLIET *et al.* (2007), a avaliação dos processos produtivos é feita baseando-se na avaliação dos produtos comerciais, sendo os resíduos deixados em segundo plano. PALHARES *et al.* (2011), afirmam que “as variações verificadas na caracterização dos esterco animais devem-se as condições diferenciadas de idade e genética dos animais, sistema de manejo, tipo de mão-de-obra, programa de arraçamento e manejo hídrico. Isso demonstra a dificuldade em se estabelecer referenciais técnicos para esse tipo de resíduo. O manejo ambiental em uma unidade produtiva deve ser baseado na caracterização do seu próprio dejetos, desta forma, o risco de impacto será reduzido. Quando essa caracterização não for possível, recomenda-se utilizar dados da literatura gerados a partir de condições produtivas semelhantes à unidade em questão”.

KIEHL (1985) afirma que a composição dos esterco não é fixa, variando em função de diversos fatores: espécie animal, raça, idade, alimentação, material utilizado como cama, manejo do esterco, etc. A alimentação é um dos fatores que mais influencia a composição do esterco. Dependendo da qualidade e da quantidade de alimentos fornecidos aos animais é que se tem um esterco mais rico em nutrientes. Em animais adultos estima-se que 80% da quantidade ingerida de nitrogênio, fósforo e potássio são eliminados através dos dejetos. Já a matéria orgânica é assimilada em apenas 40% do total ingerido pelos animais. Os bovinos criados em regime de confinamento, com a alimentação baseada em rações concentradas produzem estrumes mais ricos que os criados a pasto ou em regime semi-intensivo com a suplementação volumosa de feno ou silagem no cocho. Outro fator determinante sobre a qualidade do esterco é a idade dos animais. Os animais mais jovens retêm cerca de 50% do que ingerem e produzem esterco mais pobre em nutrientes.

A quantidade e as características dos dejetos animais produzidos por dia, os teores de umidade, de matéria seca e a composição química variam de acordo com o peso do animal, idade, a alimentação consumida, assim como a digestibilidade do alimento, a

quantidade de água ingerida, estação do ano e outros fatores. O conteúdo de sólidos presentes no esterco depende também do tipo de cama usada e o sistema de limpeza das instalações.

A produção diária de esterco fresco (sólidos e líquidos) de vacas leiteiras varia principalmente em função do tipo e idade biológica do animal (vaca leiteira, novilha, boi, bezerro, entre outros) e sua alimentação. GASPARG (2003), considera um fator de 0,019 kg de esterco por unidade de peso (kg) da vaca. Já GENEROSO (2001), afirma que os dejetos representam de 8 a 11% do peso do animal. JORDAN (2005) considera a quantidade diária de 30 kg de dejetos por bovino adulto estabulado. DIAZ (2006), considera uma produção de 16 kg de esterco por vaca, gerando o equivalente a 0,61 m<sup>3</sup> de biogás.

A Tabela 2.12 demonstra a produção e características de dejetos de bovinos leiteiros.

**Tabela 2.12** - Produção e características dos dejetos de bovinos leiteiros.

<b>Características</b>	<b>Vacas de leite</b>
Peso vivo, kg	450
Dejeções (sólidas+líquidas), kg/dia	45
Quantidade por peso vivo, %	9-11

Fonte: Adaptado de (CAMPOS, 1997).

SIQUEIRA JUNIOR (2005) descreve a quantidade de dejetos produzidos diariamente por bovinos com peso vivo de 453 kg, sendo 23,5 kg de fezes e 9,1 kg de urina. Relata também, a distribuição dos minerais consumidos por vacas em lactação: 10% é retido pelo animal e 90% sai na forma de urina e fezes; do nitrogênio 25 % é retido, 18% é eliminado pelas fezes e 57% pela urina.

HAYNES e WILLIAMS (1993) afirmam que os bovinos aproveitam pouco da energia ingerida. No caso dos nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio, em média, 65% do que é absorvido é eliminado via urina e fezes. Se a produção animal ocorrer em sistemas de confinamento ou semi-confinamento e não tiver um manejo correto do esterco, 65% da energia alimentar oferecida aos animais está sendo perdida. Enquanto TAMMINGA (1992) afirma que, em média, de 75 a 85% do N ingerido por vacas produtoras de leite é perdido nas formas de fezes e urina; assim sendo, uma vaca leiteira que consome 88,0 kg de N ao

ano, irá utilizar 33,0 kg e 4,0 kg de nitrogênio, respectivamente, para a produção de leite e tecido muscular, sendo o restante eliminado através do esterco.

A Tabela 2.13 mostra a porcentagem em relação à matéria seca (MS), de macronutrientes presentes nos dejetos de vacas leiteiras, segundo alguns autores.

**Tabela 2.13** - Quantidade média de macronutrientes presentes no esterco de bovinos leiteiros, em porcentagem da MS.

Autores	Quantidade de macronutrientes em % da MS		
	Nitrogênio (N)	Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Potássio (K <sub>2</sub> O)
Xavier e Lucas Júnior (2011) <sup>a</sup>	2,51	1,47	1,32
Siqueira Junior (2005) <sup>b</sup>	0,38	0,18	1,15
Safley <i>et al.</i> (1984) <sup>c</sup>	2,92	1,2	0,84
Osaki (1990) <sup>d</sup>	1,11	0,68	0,67

a) Vacas leiteiras da raça Holandesa, dieta: silagem de milho, cana-de-açúcar *in natura* e cana-de-açúcar hidrolisada com cal virgem.

b) Vacas leiteiras de raça não informada, dieta: concentrado, silagem de milho e pastagem.

c) Raça e dieta não informadas.

d) Raça e dieta não informadas.

Fonte: Elaboração própria.

XAVIER e LUCAS JÚNIOR (2011), ao avaliarem as quantidades de macronutrientes contidos nos biofertilizantes obtidos em biodigestores batelada e contínuos operados com dejetos de vacas leiteiras, apresentaram a análise química de dejetos de vacas da raça Holandês, em lactação, confinadas, que receberam dietas contendo silagem de milho (SM), cana-de-açúcar *in natura* (CIN) e cana-de-açúcar hidrolisada com cal virgem (CHCV). Para a análise dos dejetos foi feita a coleta separadamente por dieta.

Nos substratos contendo dejetos de animais que receberam cana-de-açúcar como volumoso, foram adicionados 6% de caldo de cana-de-açúcar como aditivo para incremento da produção de biogás. Os substratos foram formulados para que contivessem 6% de matéria seca (MS), conforme mostra a Tabela 2.14.

**Tabela 2.14** - Teores médios de nutrientes dos substratos.

Nutrientes	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Sódio
SM	2,70	1,78	1,12	2,61	0,70	0,13
CIN	2,50	1,55	1,96	2,21	0,71	0,24
CINC	2,70	1,22	1,43	2,01	0,46	0,23
CHCV	2,30	1,64	1,10	4,15	0,62	0,19
CHCVC	2,40	1,15	1,00	3,38	0,53	0,13

SM: dejetos de animais que receberam silagem de milho + água. CIN: dejetos de animais que receberam cana in *natura* + água. CHCV: dejetos de animais que receberam cana hidrolisada com cal virgem + água. CINC: CIN + caldo de cana. CHCVC: CHCV + caldo de cana.

Fonte: (XAVIER e LUCAS JÚNIOR ,2011).

Na Tabela 2.15, KIEHL (1985) demonstra a quantidade de macronutrientes presentes no esterco bovino de várias categorias animais.

**Tabela 2.15** - Umidade e conteúdo de macronutrientes (N, P, K) presentes nos dejetos de bovinos.

Categoria animal	Umidade %		Elementos Totais - %Base Seca					
			(N)		(P)		(K)	
	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média
Bovino corte	22-85	65,3	1,80-3,70	3,09	0,42-1,03	0,79	0,61-2,50	1,72
Bovino leite	79-80	79,7	1,84-5,60	3,17	0,44-1,02	0,68	0,57-4,20	2,11
Bovino (Fezes+urina)	86-93	89,0	0,20-1,70	1,30	0,04-1,00	0,10	0,08-1,90	0,7
Touro (Base úmida, curtido)	-	-	-	0,62	-	0,26	-	0,72
Vaca (Base úmida, curtido)	-	-	-	0,40	-	0,20	-	0,44

Fonte: Adaptado de (KIEHL, 1985).

A literatura brasileira é carente de informações referentes à composição do esterco bovino nas diversas categorias (da bovinocultura leiteira e da bovinocultura de corte). Alguns autores citam a composição dos macronutrientes e teor de matéria orgânica presentes no

esterco bovino de uma maneira geral, sem especificar a categoria animal, conforme mostra a Tabela 2.16.

**Tabela 2.16** - Quantidade média de macronutrientes e matéria orgânica presentes no esterco bovino.

<b>Autores</b>	<b>Matéria Orgânica (MO)</b>	<b>Nitrogênio (N)</b>	<b>Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	<b>Potássio (K<sub>2</sub>O)</b>
				%
NOGUEIRA (1983)	16,4	0,34	0,13	0,4
PRESTES (2007)	14	0,3	0,17	0,1
AMORIM (2002)	-	2,05	1,44	1,49
KIEHL (1985)	57,1	1,67	0,86	1,37

Fonte: Elaboração própria.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando estudar as condições para uma produção pecuária sustentável, através de dados encontrados na literatura, foram quantificados em valor energético os macronutrientes do esterco bovino e o biogás obtido através da biodigestão anaeróbia. 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 químico pelo biofertilizante. Nesse sentido, a seguir são apresentadas as etapas desenvolvidas (Figura 3.1), que compreendem:

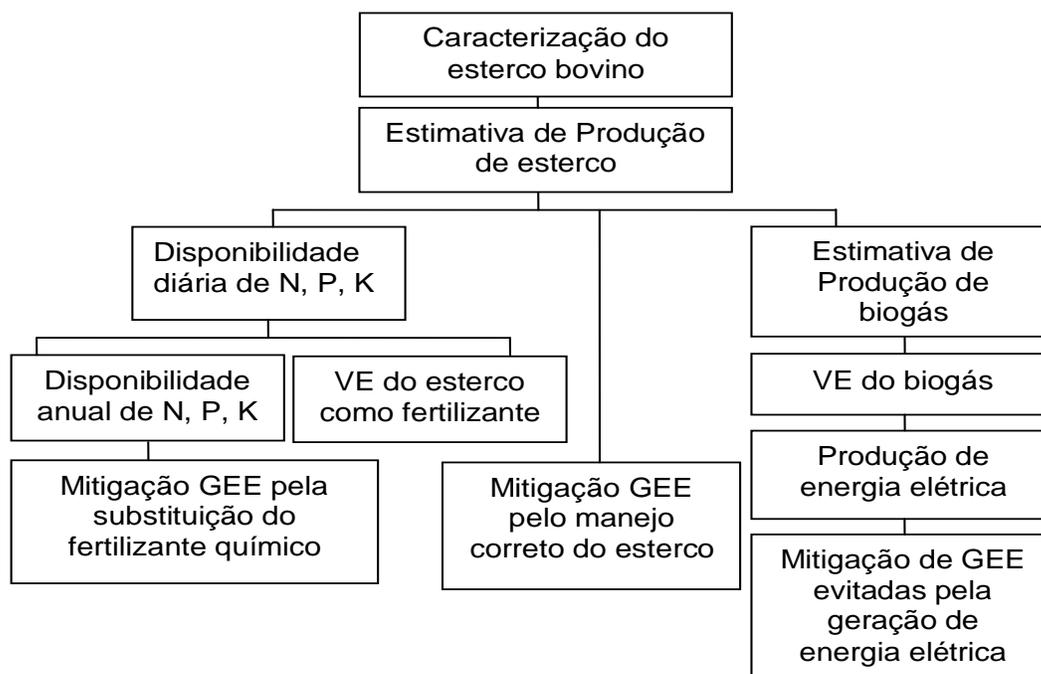


Figura 3.1 – Fluxograma metodológico.

#### 3.1 Caracterização do esterco bovino

Foi feita uma pesquisa bibliográfica a fim de obter dados referentes à quantificação e composição química do esterco bovino, pois a composição dos estercos é variável, sendo influenciada por fatores como a espécie animal, a raça, a idade, a alimentação, o material utilizado como cama, o tratamento dado ao esterco, etc.

As equações utilizadas para os cálculos das estimativas da produção de esterco, da disponibilidade dos macronutrientes, do valor energético de substituição do esterco, da produção e valor energético do biogás foram elaboradas a partir dos dados constantes na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Produção diária de esterco (fezes + urina), por animais de raças leiteiras, com 87,3% de umidade, 933,0 kg/m<sup>3</sup> de densidade e conteúdo em nutrientes.

Peso do animal (kg)	Produção total de esterco (m <sup>3</sup> /dia)	Conteúdo em nutrientes (g/dia)		
		(N)	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	(K <sub>2</sub> O)
68	0,005	27,2	10,4	21,8
113	0,009	45,4	20,8	38,2
227	0,019	90,7	37,4	76,5
454	0,037	186,0	75,9	147,5
635	0,052	258,5	106,0	207,6

Fonte: (MWPS-18, 1985 apud CAMPOS, 1997).

### 3.2 Estimativa da produção de esterco

Pela impossibilidade de quantificar as diversas categorias animais de todo o rebanho bovino brasileiro, para a determinação da quantidade diária do esterco foi feita a média ponderada de produção de esterco por kg de peso vivo (PV) dos animais. No presente estudo o peso médio dos bovinos foi considerado em 300 kg de peso vivo (PV).

Para a estimativa da produção diária de esterco, foi utilizada a Equação 3.1:

$$P_{est} = PV * VM \quad (3.1)$$

onde:

$P_{est}$  - Produção diária de esterco (kg/dia)

$PV$  - Peso vivo do animal (kg)

$VM$  - Valor médio de produção de esterco (0,07 kg)

### 3.3 Estimativa de disponibilidade diária de macronutrientes

A disponibilidade diária de macronutrientes (N, P, K), presentes no esterco bovino foi calculada de acordo com as Equações 3.2, 3.3 e 3.4:

$$D_N = PE * P_N \quad (3.2)$$

onde:

$D_N$  - Disponibilidade de nitrogênio presente no esterco bovino (kg/dia)

$PE$  - Produção de esterco (kg/dia)

$P_N$  - Percentual de nitrogênio presente no esterco bovino (0,53%)

$$D_P = PE * P_P \quad (3.3)$$

onde:

$D_P$  - Disponibilidade de fósforo presente no esterco bovino (kg/dia)

$PE$  - Produção de esterco (kg/dia)

$P_P$  - Percentual de fósforo presente no esterco bovino (0,21%)

$$D_K = PE * P_K \quad (3.4)$$

onde:

$D_K$  - Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino (kg/dia)

$PE$  - Produção de esterco (kg/dia)

$P_K$  - Percentual de potássio presente no esterco bovino (0,43%)

### **3.4 Estimativa do valor energético (VE) de substituição do esterco**

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

A Tabela 3.2 apresenta os valores mínimos, médios e máximos dos coeficientes energéticos utilizados nos diversos estudos de análises energéticas. Para o cálculo do valor energético de substituição do esterco foram utilizados os valores médios dos coeficientes energéticos para a produção de fertilizantes químicos.

**Tabela 3.2** - Coeficientes energéticos (CE) médios utilizados na produção de fertilizantes químicos.

<b>Fertilizantes</b>	<b>CE<sub>mínimo</sub></b>	<b>CE<sub>médio</sub></b> <b>(MJ/kg)</b>	<b>CE<sub>máximo</sub></b>
Nitrogênio (N)	48,9	62,6	73
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	7,5	12,3	17,4
Potássio (K <sub>2</sub> O)	4,6	9,2	13,6

Fonte: Elaboração própria.

O valor energético de substituição do esterco foi calculado de acordo com a Equação 3.5:

$$VE_{Est}(T) = D_N * (CEM_N) * a + D_P * (CEM_P) * a + D_K * (CEM_K) * a \quad (3.5)$$

onde:

$VE_{Est}(T)$  - Valor energético total estimado do esterco (MJ/ano)

$D_N$  - Disponibilidade de nitrogênio presente no esterco bovino (kg/dia)

$CEM_N$  - Coeficiente energético médio utilizado na produção de nitrogênio químico (MJ/kg)

$D_P$  - Disponibilidade de fósforo presente no esterco bovino (kg/dia)

$CEM_P$  - Coeficiente energético médio utilizado na produção de fósforo químico (MJ/kg)

$D_K$  - Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino (kg/dia)

$CEM_K$  - Coeficiente energético médio utilizado na produção de potássio químico (MJ/kg)

$a$  - número de dias no ano (365)

### 3.5 Estimativa de disponibilidade anual de macronutrientes

A disponibilidade anual de macronutrientes (N, P, K), presentes no esterco bovino foi calculada de acordo com as Equações 3.6, 3.7 e 3.8. A disponibilidade média dos

macronutrientes N, P, K, foram estimados em 0,11, 0,04, 0,09 kg/dia, respectivamente. O quantitativo do rebanho bovino nacional foi estimado em 205,3 milhões de cabeças, de acordo com as últimas pesquisas do IBGE (2009).

$$D_{AN} = D_{MN} * n * a \quad (3.6)$$

onde:

$D_{AN}$  - Disponibilidade anual de nitrogênio presente no esterco bovino (kg/ano)

$D_{MN}$  - Disponibilidade média de nitrogênio presente no esterco bovino

$n$  - quantitativo nacional de gado bovino

$a$  - número de dias no ano (365)

$$D_{AP} = D_{MP} * n * a \quad (3.7)$$

onde:

$D_{AP}$  - Disponibilidade anual de fósforo presente no esterco bovino (kg/ano)

$D_{MP}$  - Disponibilidade média de fósforo presente no esterco bovino

$n$  - quantitativo nacional de gado bovino

$a$  - número de dias no ano (365)

$$D_{AK} = D_{MK} * n * a \quad (3.8)$$

onde:

$D_{AK}$  - Disponibilidade de potássio presente no esterco bovino (kg/ano)

$D_{MK}$  - Disponibilidade média de potássio presente no esterco bovino

$n$  - quantitativo nacional de gado bovino

$a$  - número de dias no ano (365)

### 3.6 Estimativa de produção de biogás

A Tabela 3.3, a seguir, apresenta alguns valores de produtividade de biogás.

**Tabela 3.3** - Produtividade de biogás.

Material	Produtividade (m <sup>3</sup> /kg)	Material	Produtividade (m <sup>3</sup> /kg)
Esterco bovino, fresco	0,04	Resíduos vegetais, secos	0,30
Esterco de galinha, seco	0,43	Resíduos de matadouro (úmido)	0,07
Esterco suíno, seco	0,35	Lixo	0,05

Fonte: (NOGUEIRA, 1986).

A estimativa da quantidade anual de biogás do rebanho bovino brasileiro foi calculada multiplicando-se o índice de produtividade de biogás do esterco bovino, informado na Tabela 3.3, pela produção diária de esterco, de um bovino de 300 kg de peso estimado.

### 3.7 Valor energético do biogás proveniente da biodigestão de dejetos de bovinos

O conteúdo energético do biogás a partir do esterco bovino foi estimado tendo como parâmetros os valores do poder calorífico inferior (PCI), que para este estudo foi considerado em 16.235 kJ/kg (55% CH<sub>4</sub> e 45% CO<sub>2</sub>) e a produção diária de biogás. O cálculo do conteúdo energético do biogás foi feito segundo a Equação 3.9:

$$VE_{est} = PCI * P_{biogás} \quad (3.9)$$

onde:

$VE_{est}$  - Valor energético estimado do biogás (kJ/kg)

$PCI$  - Poder calorífico inferior do biogás proveniente do esterco bovino (kJ/kg)

$P_{biogás}$  - Produção diária de biogás (kg)

### 3.8 Estimativa da mitigação de gases de efeito estufa pelo manejo dos dejetos

Baseando-se nos estudos de MARTINS-COSTA (2009), (Anexo A), foi feita 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 de corte e leiteiro. MARTINS-COSTA (2009) quantifica de forma simplificada as emissões de metano e óxido nítrico, decorrentes da fermentação entérica e manejo dos dejetos de bovinos leiteiros e de corte nas propriedades rurais.

As Equações 3.10, 3.11 e 3.12 foram utilizadas para o cálculo das emissões de GEE do rebanho bovino nacional:

$$M_{GEE\ Gado\ Corte} = \frac{\sum(GEE_{ca})}{n} \quad (3.10)$$

onde:

$M_{GEE\ Gado\ Corte}$  - Estimativa da mitigação de GEE pelo manejo dos dejetos do rebanho bovino de corte (CO<sub>2</sub> eq)

$\sum(GEE_{ca})$  - Total das emissões de GEE das categorias animais do rebanho bovino de corte (CO<sub>2</sub> eq)

$n$  - número de categorias animais do rebanho bovino de corte

$$M_{GEE\ Gado\ Leiteiro} = \frac{\sum(GEE_{ca})}{n} \quad (3.11)$$

onde:

$M_{GEE\ Gado\ Leiteiro}$  - Estimativa da mitigação de GEE pelo manejo dos dejetos do rebanho bovino leiteiro (CO<sub>2</sub> eq)

$\sum(GEE_{ca})$  - Total das emissões de GEE das categorias animais do rebanho bovino leiteiro (CO<sub>2</sub> eq)

$n$  - número de categorias animais do rebanho bovino leiteiro

$$M_{GEE(T)} = \frac{M_{GEE\ Gado\ Corte} + M_{GEE\ Gado\ Leiteiro}}{2} \quad (3.12)$$

onde:

$M_{GEE(T)}$  - Mitigação total de GEE (CO<sub>2</sub> eq)

$M_{GEE\ Gado\ Corte}$  - Mitigação de GEE do rebanho bovino de corte

$M_{GEE\ Gado\ Leiteiro}$  - Mitigação de GEE do rebanho bovino leiteiro

O balanço geral dos GEE foi obtido pela conversão dos fluxos de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em CO<sub>2</sub> eq, conforme metodologia abaixo, adaptada de OLIVEIRA (2010). A conversão dos fluxos de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O para CO<sub>2</sub> equivalente foi necessária uma vez que cada GEE possui um potencial de aquecimento global (PAG) diferente. Os cálculos foram feitos considerando o Potencial de Aquecimento Global – GWP (Global Warming Potential). De acordo com MCT (2010), o GWP agrega as emissões relatadas em unidades de dióxido de carbono equivalente em um horizonte de tempo de 100 anos. Os fluxos de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em CO<sub>2</sub> eq, foram estimados utilizando as Equações 3.13 e 3.14:

$$CO_{2\ eq}(N_2O) = N_2O * RPM_{N_2O} * PAG_{N_2O} \quad (3.13)$$

$$CO_{2\ eq}(CH_4) = CH_4 * RPM_{CH_4} * PAG_{CH_4} \quad (3.14)$$

onde:

$CO_{2\ eq}(N_2O)$  - Quantidade de N<sub>2</sub>O em CO<sub>2</sub> eq

$CO_{2\ eq}(CH_4)$  - Quantidade de CH<sub>4</sub> em CO<sub>2</sub> eq

$N_2O$  - fluxo de N<sub>2</sub>O na situação

$CH_4$  - fluxo de CH<sub>4</sub> na situação

$RPM_{N_2O}$  - relação entre o peso molecular do N<sub>2</sub>O e do nitrogênio (44/28)

$RPM_{CH_4}$  - relação entre o peso molecular do CH<sub>4</sub> e do carbono (16/12)

$PAG_{N_2O}$  - potencial de aquecimento global do N<sub>2</sub>O em relação ao CO<sub>2</sub> (310)

$PAG_{CH_4}$  - potencial de aquecimento global do CH<sub>4</sub> em relação ao CO<sub>2</sub> (21)

### 3.9 Estimativa da mitigação de GEE decorrentes da substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante

As Equações 3.15, 3.16 e 3.17 foram utilizadas para calcular o potencial de mitigação de GEE decorrente da substituição do uso do fertilizante químico pelo biofertilizante, considerando o quantitativo do rebanho bovino nacional, de acordo com as últimas pesquisas publicadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2009) e o fator de emissão de GEE na produção de fertilizantes químicos, de acordo com SEABRA (2008).

**Tabela 3.4** - Emissão de GEE na produção de fertilizantes químicos.

Fertilizantes	Fator de emissão (kg CO <sub>2</sub> eq/kg)
Nitrogênio (N)	3,97
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	130
Potássio (K <sub>2</sub> O)	0,71

Fonte: Adaptado de (SEABRA, 2008).

$$M_{GEEFQ} = FE_{GEE_N} * D_{MN} * n * a \quad (3.15)$$

onde:

$M_{GEEFQ}$  - Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante (10<sup>6</sup> kg CO<sub>2</sub> eq/ano)

$FE_{GEE_N}$  - Fator de emissão de GEE na produção de nitrogênio (kg CO<sub>2</sub> eq/kg)

$D_{MN}$  - Disponibilidade média de nitrogênio presente no esterco bovino

$n$  - quantitativo nacional de gado bovino

$a$  - número de dias no ano (365)

$$M_{GEEFQ} = FE_{GEEP} * D_{MP} * n * a \quad (3.16)$$

onde:

$M_{GEEFQ}$  - Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante ( $10^6$  kg CO<sub>2</sub> eq/ano)

$FE_{GEEP}$  - Fator de emissão de GEE na produção de fósforo (kg CO<sub>2</sub> eq/kg)

$D_{MP}$  - Disponibilidade média de fósforo presente no esterco bovino

$n$  - quantitativo nacional de gado bovino

$a$  - número de dias no ano (365)

$$M_{GEEFQ} = FE_{GEEK} * D_{MK} * n * a \quad (3.17)$$

onde:

$M_{GEEFQ}$  - Mitigação de GEE pela substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante ( $10^6$  kg CO<sub>2</sub> eq/ano)

$FE_{GEEK}$  - Fator de emissão de GEE na produção de potássio (kg CO<sub>2</sub> eq/kg)

$D_{MK}$  - Disponibilidade média de potássio presente no esterco bovino

$n$  - quantitativo nacional de gado bovino

$a$  - número de dias no ano (365)

### 3.10 Estimativa de produção de energia elétrica

Através dos resultados obtidos pela produtividade de biogás, foi estimado o quantitativo de energia elétrica possível de ser produzida.

A energia elétrica gerada através do biogás foi determinada utilizando a metodologia proposta pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, CETESB (2002), conforme Equação 3.18, que considera um rendimento de 30% para o grupo gerador.

$$E_{elétrica} = E * \eta_{gerador} * PCI_{Biogás} \quad (3.18)$$

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: 22.320 kJ/m<sup>3</sup>

### 3.11 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<sub>2</sub> para a produção de energia elétrica. Para se determinar o fator médio de emissão de GEE, na geração de energia elétrica através das usinas hidrelétricas, foi feita uma consulta ao site do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT (2011). O fator médio de emissão de GEE reflete a intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> da energia despachada na margem, para geração de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional, dos meses de janeiro a agosto de 2011. A partir destes dados foi calculado o fator de emissão médio de CO<sub>2</sub> para a produção de energia elétrica, cujo valor foi considerado em 0,2717.

A Equação 3.19, adaptada de SALOMON (2007), mostra como foi realizado o cálculo do quantitativo de emissões de GEE evitadas pela geração de energia elétrica.

$$CO_{2eq} = EE * FEM \quad (3.19)$$

onde:

$CO_{2eq}$  - Total de CO<sub>2eq</sub>. Evitado (tCO<sub>2eq</sub>/ano)

$EE$  - Total de Energia Elétrica Gerada (MWh/ano)

$FEM$  - Fator de Emissão Médio (tCO<sub>2eq</sub>/MWh)

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Estimativa do valor energético de substituição do esterco

No presente estudo, a média de peso do gado bovino foi considerada em 300 kg e a produção diária de esterco em 21 kg.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1, apresentam os valores energéticos estimados dos macronutrientes do esterco bovino, tendo como parâmetros o peso vivo (PV) dos bovinos, a produção de esterco, o conteúdo em macronutrientes e o valor médio dos coeficientes energéticos utilizados para a produção de fertilizantes químicos, considerando a substituição do adubo químico pelo biofertilizante.

**Tabela 4.1** - Valor energético estimado dos macronutrientes do esterco bovino, considerando a substituição do adubo químico pelo biofertilizante.

Peso do animal (kg)	Produção de esterco (kg/animal/dia)	MO * (%)	Disponibilidade em nutrientes (kg/dia)			VE Total ** (MJ/ano)
			N	P	K	
68	4,8	0,8	0,02	0,01	0,02	569
113	7,9	1,3	0,04	0,02	0,03	1104
227	15,9	2,6	0,08	0,03	0,07	2197
300	21,0	3,4	0,11	0,04	0,09	2995
454	31,8	5,2	0,17	0,07	0,14	4667
635	44,4	7,3	0,23	0,09	0,19	6295

Fonte: (Adaptado de MWPS-18, 1985 apud CAMPOS, 1997).

\* Valores obtidos através de cálculos realizados por SANTOS (2012), com valor de referência de (NOGUEIRA, 1986).

\*\* Valores obtidos através de cálculos realizados por SANTOS (2012), com os dados constantes na Tabela 4.1, Adaptada de (MWPS-18, 1985 apud CAMPOS, 1997).

A Figura 4.1, foi elaborada através dos valores constantes na Tabela 4.1.

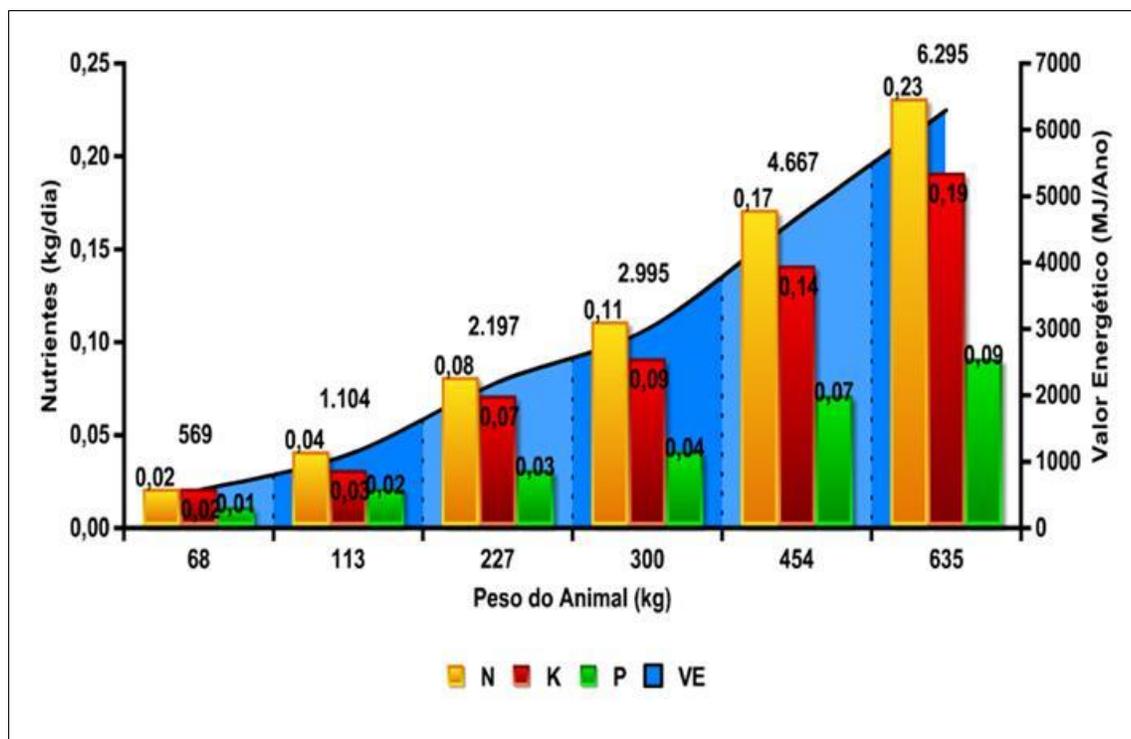


Figura 4.1 – Valor energético dos macronutrientes do esterco bovino (animal/ano).

A Tabela 4.2 demonstra a economia de energia fóssil pela substituição do esterco, considerando a quantidade média de N, P, K disponível anualmente no esterco do rebanho bovino brasileiro (considerando o bovino de 300 kg de peso vivo) e o coeficiente energético médio para a produção destes fertilizantes químicos.

**Tabela 4.2** - Economia de energia fóssil pela substituição do esterco.

Fertilizantes	Valor médio dos macronutrientes (kg/dia)	Produção macronutrientes (kg/ano)	CE médio (MJ/kg)	Economia de energia fóssil (GJ/ano)
Nitrogênio (N)	0,11	$8,2 \times 10^9$	62,6	$5,1 \times 10^8$
Fósforo ( $P_2O_5$ )	0,04	$3 \times 10^9$	12,3	$3,6 \times 10^7$
Potássio ( $K_2O$ )	0,09	$6,7 \times 10^9$	9,2	$6,2 \times 10^7$
<b>Total</b>		<b><math>17,9 \times 10^9</math></b>		<b><math>6,1 \times 10^8</math></b>

De acordo com a Tabela 4.2, a substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante proporciona uma economia de energia de origem fóssil na ordem de  $6,1 \times 10^8$  GJ/ano.

## 4.2 Valor energético do biogás proveniente da biodigestão de dejetos de bovinos

O presente estudo considerou a média do peso do gado bovino em 300 kg, a produção diária de esterco em 21 kg e em 0,84 m<sup>3</sup> a produtividade de biogás por bovino, sendo a produção anual estimada em 62,9 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

**Tabela 4.3** - Valor energético (VE) do biogás de acordo com a produção diária de esterco bovino.

<b>Peso do animal</b>	<b>Produção total de esterco</b>	<b>Produção biogás *</b>	<b>Produção biogás *</b>	<b>Valor Energético estimado *</b>
<b>(kg)</b>	<b>(kg/dia)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>(kg/dia)</b>	<b>(MJ/Ano)</b>
68	4,8	0,19	0,15	888
113	7,9	0,32	0,25	1.481
227	15,9	0,64	0,50	2.963
300	21,0	0,84	0,66	3.911
454	31,8	1,27	0,99	5.867
635	44,4	1,78	1,39	8.237

Fonte: Adaptado de (MWPS-18, 1985 apud CAMPOS,1997).

\* Valores obtidos através de cálculos realizados por SANTOS (2012), com os dados constantes na Tabela 4.3, Adaptada de (MWPS-18, 1985 apud CAMPOS, 1997).

A Figura 4.2, foi elaborada através dos valores constantes na Tabela 4.3.

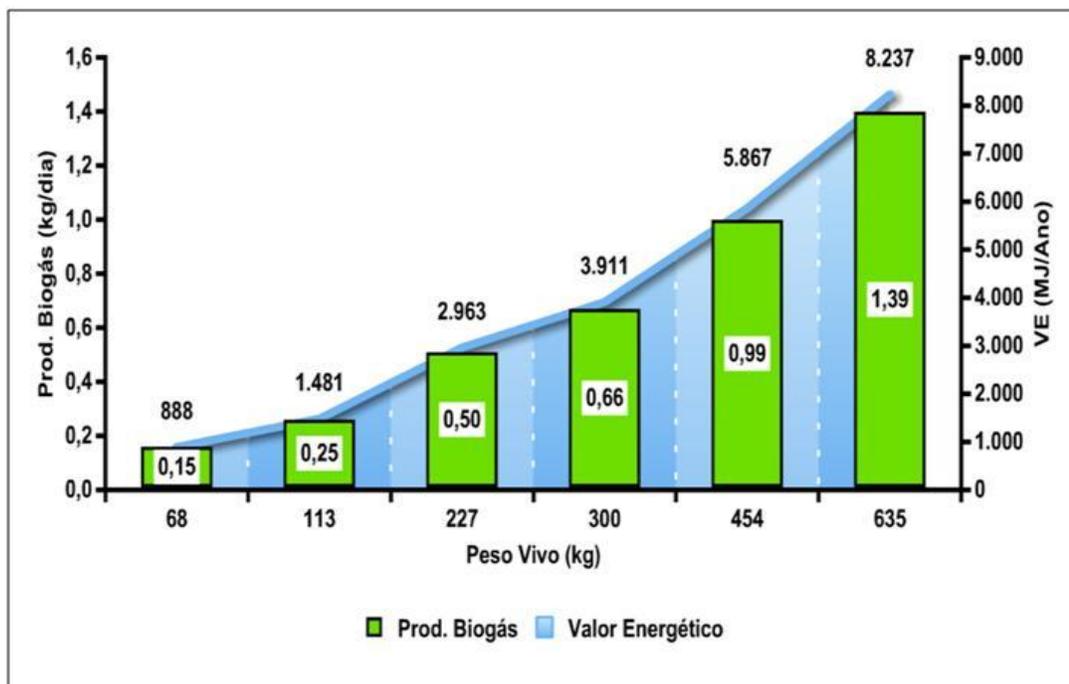


Figura 4.2 – Valor energético do biogás de acordo com as diversas categorias animais (animal/ano).

A produção de energia elétrica através do biogás do esterco bovino evitaria a emissão de cerca de  $31,8 \times 10^9$  kg CO<sub>2</sub> eq na atmosfera e geraria anualmente cerca de 117,1 TWh de energia elétrica.

#### 4.3 Estimativa de mitigação de GEE pelo manejo dos dejetos

A Tabela 4.4 demonstra a contribuição anual da pecuária leiteira na emissão de metano por manejo de dejetos, em CO<sub>2</sub>eq.

**Tabela 4.4** - Emissões anuais de CH<sub>4</sub> da pecuária leiteira, em CO<sub>2</sub> eq.

	<b>Bezerras Até 1 ano</b>	<b>Novilhas não prenhas</b>	<b>Novilhas prenhas</b>	<b>Vacas em lactação</b>	<b>Vacas secas</b>	<b>Touros</b>
Emissões anuais (kg CH <sub>4</sub> /cabeça)	0,47	0,79	0,94	2,23	1,03	1,15
Emissões de CH <sub>4</sub> (kg CO <sub>2</sub> eq/cabeça/ano) *	13,14	22,02	26,24	62,29	28,71	32,24

Fonte: Adaptada de (MARTINS-COSTA, 2009).

\* Valores obtidos através de cálculos realizados por SANTOS (2012), com os dados constantes na Tabela 4.4, Adaptada de (MARTINS-COSTA, 2009).

A Tabela 4.5, demonstra a contribuição anual da pecuária leiteira na emissão de óxido nítrico por manejo dos dejetos, em CO<sub>2</sub> eq.

**Tabela 4.5** - Emissões anuais de N<sub>2</sub>O da pecuária leiteira, em CO<sub>2</sub> eq.

	<b>Bezerras Até 1 ano</b>	<b>Novilhas não prenhas</b>	<b>Novilhas prenhas</b>	<b>Vacas em lactação</b>	<b>Vacas secas</b>	<b>Touros</b>
N <sub>2</sub> O(mm) kg/cabeça/ano	0,49	0,99	0,99	1,65	1,65	1,65
Emissões de N <sub>2</sub> O(kg CO <sub>2</sub> eq/cabeça/ano)*	238,48	481,83	481,83	803,05	803,05	803,05

Fonte: Adaptado de (MARTINS-COSTA, 2009).

\* Valores obtidos através de cálculos realizados por SANTOS (2012), com os dados constantes na Tabela 4.5, Adaptada de (MARTINS-COSTA, 2009).

A Tabela 4.6 demonstra a contribuição anual da pecuária de corte na emissão de metano por manejo dos dejetos, em CO<sub>2</sub> eq.

**Tabela 4.6** - Emissões anuais de CH<sub>4</sub> da pecuária de corte, em CO<sub>2</sub> eq.

<b>Categoria animal</b>	<b>Emissões anuais (kg CH<sub>4</sub>/cabeça)</b>	<b>Emissões anuais de CH<sub>4</sub>(kg CO<sub>2</sub> eq/cabeça)*</b>
Terneiros ao pé da vaca	0,26	7,39
Terneiras ao pé da vaca	0,27	7,68
Novilhas 14 meses	0,63	17,50
Novilhas 24 meses prenhas	0,64	17,90
Novilhas 24 meses descarte	0,59	16,49
Vacas com cria ao pé	0,84	23,46
Vacas prenhas	0,69	19,28
Machos 14 meses para recria	0,89	24,83
Machos 14 meses para reprodução	0,76	21,33

Fonte: Adaptado de (MARTINS-COSTA, 2009).

\* Valores obtidos através de cálculos realizados por SANTOS (2012), com os dados constantes na Tabela 4.6, Adaptada de (MARTINS-COSTA, 2009).

A Tabela 4.7 demonstra a contribuição anual da pecuária de corte na emissão de óxido nitroso por manejo dos dejetos, em CO<sub>2</sub> eq.

**Tabela 4.7** - Emissões anuais de N<sub>2</sub>O da pecuária de corte, em CO<sub>2</sub> eq.

<b>Categoria animal</b>	<b>Emissões anuais (kg N<sub>2</sub>O/cabeça)</b>	<b>Emissões anuais de N<sub>2</sub>O(kg CO<sub>2</sub> eq/cabeça)*</b>
Terneiros ao pé da vaca	0,49	238,48
Terneiras ao pé da vaca	0,49	238,48
Novilhas 14 meses	0,99	481,83
Novilhas 24 meses prenhas	0,99	481,83
Novilhas 24 meses descarte	0,99	481,83
Vacas com cria ao pé	0,99	481,83
Vacas prenhas	0,99	481,83
Machos 14 meses para recria	0,99	481,83
Machos 14 meses para reprodução	0,99	481,83

Fonte: Adaptado de (MARTINS-COSTA, 2009).

\* Valores obtidos através de cálculos realizados por SANTOS (2012), com os dados constantes na Tabela 4.7, Adaptada de (MARTINS-COSTA, 2009).

A Tabela 4.8 demonstra o potencial poluente de cada categoria animal do rebanho leiteiro, referente à emissão de metano e óxido nitroso.

**Tabela 4.8** - Potencial de aquecimento global pelo manejo dos dejetos da pecuária leiteira.

	<b>Bezerras Até 1 ano</b>	<b>Novilhas não prenhas</b>	<b>Novilhas prenhas</b>	<b>Vacas em lactação</b>	<b>Vacas secas</b>	<b>Touros</b>	<b>Total</b>
Emissões anuais de CH <sub>4</sub> (kg CO <sub>2</sub> eq/cabeça)	13,14	22,02	26,24	62,29	28,71	32,24	184,64
Emissões anuais de N <sub>2</sub> O(kg CO <sub>2</sub> eq/cabeça)	238,48	481,83	481,83	803,05	803,05	803,05	3611,29
<b>Total</b>	<b>251,62</b>	<b>503,85</b>	<b>508,07</b>	<b>865,34</b>	<b>831,76</b>	<b>835,29</b>	<b>3795,93</b>

A Tabela 4.9 demonstra o potencial de aquecimento global pelo manejo dos dejetos da pecuária de corte.

**Tabela 4.9** - Potencial de aquecimento global pelo manejo dos dejetos da pecuária de corte.

<b>Categoria animal</b>	<b>Emissões anuais de CH<sub>4</sub>(kg CO<sub>2</sub> eq/cabeça)</b>	<b>Emissões anuais de N<sub>2</sub>O(kg CO<sub>2</sub> eq/cabeça)</b>
Terneiros ao pé da vaca	7,39	238,48
Terneiras ao pé da vaca	7,68	238,48
Novilhas 14 meses	17,50	481,83
Novilhas 24 meses prenhas	17,90	481,83
Novilhas 24 meses descarte	16,49	481,83
Vacas com cria ao pé	23,46	481,83
Vacas prenhas	19,28	481,83
Machos 14 meses para recria	24,83	481,83
Machos 14 meses para reprodução	21,33	481,83
<b>Total</b>	<b>155,86</b>	<b>3367,94</b>
<b>Total Emissões Anuais</b>	<b>3523,8 (kg CO<sub>2</sub> eq)</b>	

#### 4.4 Estimativa da mitigação de GEE decorrente da substituição do fertilizante químico

A substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante promove a mitigação de GEE, pois no processo produtivo do fertilizante químico existe a liberação de diversos GEE, sendo sua quantificação em CO<sub>2</sub> eq expressa na Tabela 4.10, a seguir.

**Tabela 4.10** - Emissões de GEE em CO<sub>2</sub> eq por tonelada de fertilizante químico produzido.

<b>Fertilizantes</b>	<b>Fator de emissão (kg CO<sub>2</sub> eq/kg)</b>	<b>Emissões de CO<sub>2</sub> eq (kg CO<sub>2</sub> eq/t)</b>
Nitrogênio (N)	3,97	3,97 x 10 <sup>3</sup>
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	130 <sup>c</sup>	130 x 10 <sup>3</sup>
Potássio (K <sub>2</sub> O)	0,71	0,71 x 10 <sup>3</sup>

A Tabela 4.11 demonstra a estimativa anual das emissões de GEE evitadas, considerando o rebanho bovino brasileiro, o fator de emissão de GEE na produção de fertilizantes químicos e a disponibilidade anual de N, P, K do esterco bovino.

**Tabela 4.11** – Emissões anuais evitadas pela substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante.

<b>Fertilizantes</b>	<b>Produção macronutrientes (kg/ano)</b>	<b>Fator de emissão (kg CO<sub>2</sub> eq/kg)</b>	<b>Emissões anuais evitadas (kg CO<sub>2</sub> eq)</b>
Nitrogênio (N)	8,2 x 10 <sup>9</sup>	3,97	32,5 x 10 <sup>9</sup>
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3 x 10 <sup>9</sup>	130	390 x 10 <sup>9</sup>
Potássio (K <sub>2</sub> O)	6,7 x 10 <sup>9</sup>	0,71	4,7 x 10 <sup>9</sup>
<b>Total</b>			<b>427,2 x 10<sup>9</sup></b>

A substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante evitaria, anualmente, a emissão de aproximadamente 427,2 x 10<sup>9</sup> kg CO<sub>2</sub> eq.

#### 4.5 Total das emissões de GEE evitadas pela biodigestão anaeróbia do esterco

A Figura 4.3 demonstra a mitigação de GEE pela biodigestão do esterco bovino, que totaliza aproximadamente  $564,2 \times 10^9$  kg de  $\text{CO}_2$  eq/ano.

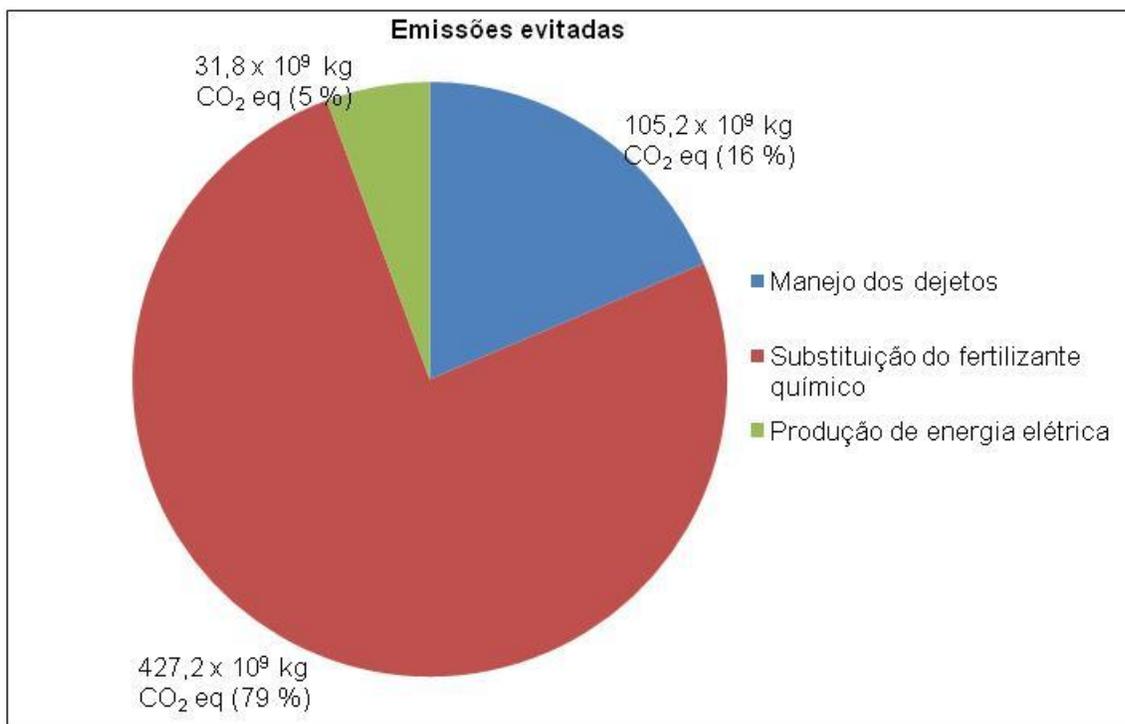


Figura 4.3 – Total das emissões de GEE evitadas pela biodigestão anaeróbia do esterco bovino.

A Tabela 4.12 apresenta os principais resultados encontrados neste estudo.

**Tabela 4.12** – Benefícios potenciais da biodigestão anaeróbia do esterco.

Economia de energia de origem fóssil	$6,1 \times 10^8$ GJ/ano
Disponibilidade de N, P, K	$17,9 \times 10^6$ t/ano
Produção de biogás	$62,9 \times 10^9$ m <sup>3</sup> /ano
Produção de energia elétrica	117,1 TWh/ano
Total das emissões evitadas	$564,2 \times 10^9$ kg de $\text{CO}_2$ eq/ano
Energia contida no biogás	$7,9 \times 10^8$ GJ/ano

Os resultados encontrados neste trabalho possuem valores significativos, tanto em termos de geração de energia, como em relação ao quantitativo de emissões evitadas e disponibilidade de N, P, K. O estudo foi desenvolvido considerando a possibilidade de total aproveitamento do esterco do rebanho bovino nacional. No entanto, sabe-se que existe perda de grande parte do esterco produzido quando os animais são criados em regime extensivo ou de semi-confinamento. Mesmo considerando o não aproveitamento total do esterco, a proposta do manejo adequado do esterco se justifica pelos ganhos econômicos, sociais e ambientais.

## 5 DISCUSSÃO

Os cálculos da produção diária de esterco, biogás e energia elétrica foram efetuados considerando uma situação onde todo o esterco do gado bovino brasileiro fosse biodigerido e aproveitado. A média de peso do gado bovino foi considerada em 300 kg, a produção diária de esterco em 21 kg e em 0,84 m<sup>3</sup> a produtividade diária de biogás por bovino, sendo a produção anual de biogás estimada em 62,9 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

Considerando a utilização diária dos dejetos de um bovino de 300 kg, na substituição ao uso dos fertilizantes químicos, com os macronutrientes N, P, K, obtém-se aproximadamente os seguintes valores energéticos anuais: 2.513 MJ no nitrogênio, 180 MJ no fósforo e 302 MJ no potássio. Diariamente o valor energético do esterco desta categoria animal é de aproximadamente 8,2 MJ, ou seja, quase 0,2 litros de diesel. De acordo com o Balanço Energético Nacional - BEN (2010), o PCI do diesel é equivalente a 10.100 kcal/kg ou 42,3 MJ/kg.

Considerando a produtividade anual estimada de N, P, K, disponível no esterco bovino em 17,9 x 10<sup>6</sup> t anuais, este quantitativo representa aproximadamente 63% do consumo de fertilizantes químicos no Brasil no ano de 2011 (ANDA, 2012), o que demonstra a importância do aproveitamento dos macronutrientes presentes no esterco bovino. A substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante, considerando o N, P, K disponível, traria o benefício adicional de conservação de energia de origem fóssil na ordem de 6,1 x 10<sup>8</sup> GJ/ano.

A substituição de uma t de fertilizantes químicos, com os macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio, pelo biofertilizante significaria a mitigação de 3,97 x 10<sup>3</sup>, 130 x 10<sup>3</sup> e 0,71 x 10<sup>3</sup> kg CO<sub>2</sub> eq, respectivamente, por t de fertilizante químico que deixasse de ser produzida.

Segundo estimativas da ANDA (2012), o consumo de fertilizantes químicos simples e compostos ficou em torno de 28,3 t no ano de 2011. Considerando a produtividade anual estimada de N, P, K, disponível no esterco bovino, este quantitativo representa aproximadamente 63% do consumo de fertilizantes químicos no Brasil no ano de 2011, o que demonstra a importância do aproveitamento dos macronutrientes presentes no esterco.

O fertilizante 25-00-25, (com a formulação N, P, K), é um dos adubos químicos mais utilizados na cafeicultura, para fornecer os nutrientes necessários para este tipo de cultura e tem o custo atual de R\$ 1.385,78 por t (valor em abril/2012) (CONAB, 2012). Um produtor rural que tenha 100 cabeças de gado com peso médio de 300 kg poderá ter uma receita anual de aproximadamente R\$ 12.000,00, com o biofertilizante. A utilização do biofertilizante não só poderá trazer impactos econômicos positivos para o produtor rural como também poderá causar impactos a níveis macroeconômicos no país, por diminuir a produção e a necessidade de importação de fertilizantes químicos.

A substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante nos processos produtivos promove economia energética, pois o fertilizante químico, para sua produção depende do uso de energia fóssil. O uso do biofertilizante faz com que esta energia fóssil deixe de ser consumida. A utilização do biofertilizante também tem grande importância ambiental, por evitar emissões de GEE na produção de fertilizantes químicos.

Tendo como parâmetro um bovino leiteiro de 300 kg de peso vivo, com a produtividade diária de 0,84 m<sup>3</sup> de biogás, obtém-se o valor energético anual estimado em aproximadamente 3.911 MJ/ano. O valor energético do biogás possível de ser gerado com o esterco do rebanho bovino brasileiro pode ser estimado em 7,9 x 10<sup>8</sup> GJ/ano.

Considerando o efetivo da bovinocultura brasileira em 205,3 milhões de cabeças, IBGE (2009), e a média de emissões de GEE pelo manejo dos dejetos da pecuária leiteira e de corte em 512,09 kg CO<sub>2</sub> eq por bovino/ano, o potencial poluidor do rebanho bovino brasileiro é de aproximadamente 105,2 x 10<sup>9</sup> kg de CO<sub>2</sub> eq/ano. Portanto, o tratamento dos dejetos da bovinocultura brasileira com a utilização de biodigestores para a produção de biogás, considerando o N, P, K disponível, promoveria uma mitigação de GEE desta ordem.

Muitos autores apontam o regime de confinamento como uma solução para reduzir as emissões de GEE, pelo menor tempo que os bovinos levariam para chegar ao abate. Entretanto, a dieta dos animais confinados se compõe basicamente de rações concentradas, que demandam energia para a sua produção e ocasionam emissões de GEE.

A mitigação de GEE totalizou, aproximadamente, 564,2 x 10<sup>9</sup> kg de CO<sub>2</sub> eq/ano, o que corresponde a cerca de 73% das emissões totais de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O no ano de 2005. Em relação às emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O do rebanho bovino brasileiro no ano de 2005, as

emissões evitadas pelo manejo correto dos dejetos, substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante e geração de energia elétrica através do biogás, correspondem a aproximadamente 180% do total emitido por este rebanho, naquele ano.

A Figura 5.1, apresenta as emissões totais de CO<sub>2</sub> dos vários setores brasileiros, no ano de 2005. No Brasil, o setor de Agropecuária foi o que mais contribuiu para as emissões de CH<sub>4</sub> (71% em 2005), tendo o gado bovino como a maior fonte emissora, através da fermentação entérica (eructação). Em 2005, 90% do total de emissões de CH<sub>4</sub> do setor de agropecuária foram associadas à fermentação entérica, estimadas em 11,5 x 10<sup>9</sup> kg. O restante das emissões de CH<sub>4</sub> se referem ao manejo de dejetos de animais, a cultura do arroz irrigado e a queima de resíduos agrícolas. Atualmente houve um acréscimo das emissões de CH<sub>4</sub>, devido predominantemente à expansão do rebanho de gado de corte nos últimos anos (MCT, 2010).

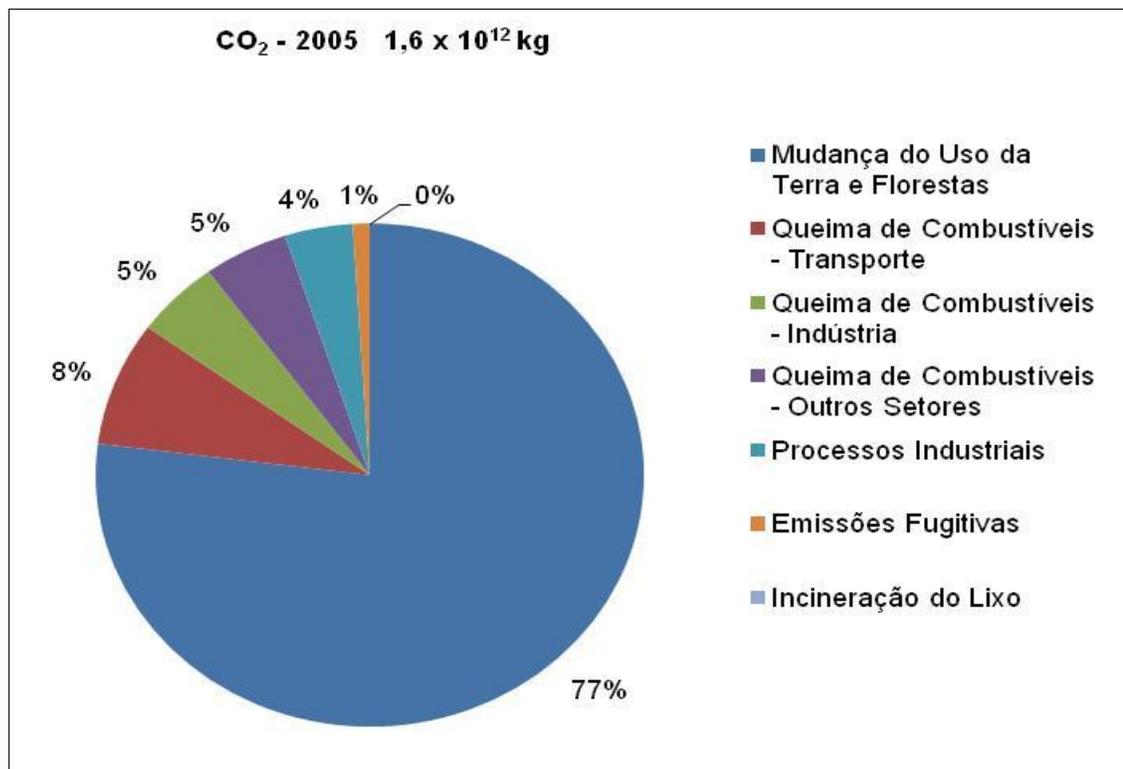


Figura 5.1 – Total de emissões de CO<sub>2</sub> no ano de 2005.  
Fonte: (MCT, 2010).

De acordo com o MCT (2010), dentre os principais setores responsáveis pela emissão de CH<sub>4</sub>, a fermentação entérica do rebanho bovino foi a maior responsável pela

emissão deste GEE no ano de 2005, representando cerca de 61% das emissões totais, seguido pela emissões de outros tipos de animais, representando 17% do total emitido e também do setor de tratamento de resíduos, com o percentual de 10%. A Figura 5.2, mostra os percentuais de emissões de CH<sub>4</sub> dos diversos setores brasileiros, no ano de 2005.

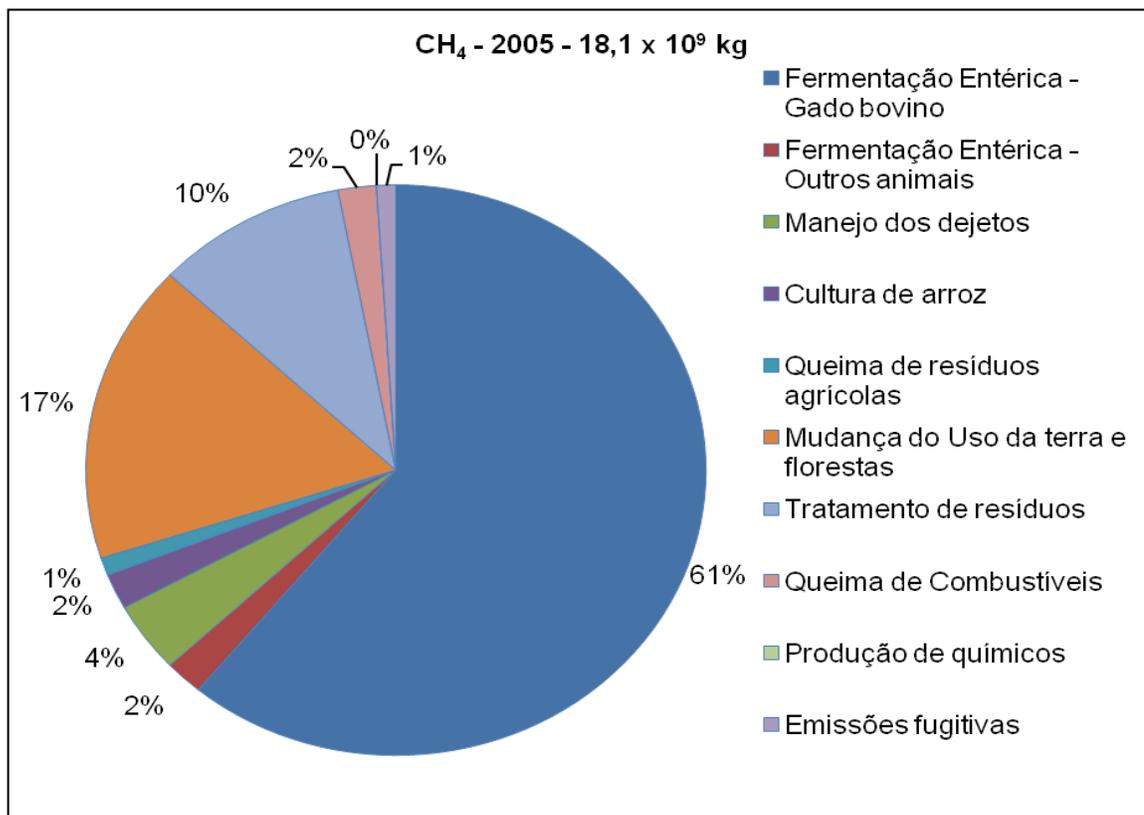


Figura 5.2 - Emissões de CH<sub>4</sub> por setor – 2005  
 Fonte: (MCT, 2010).

No Brasil, o N<sub>2</sub>O é outro importante GEE, suas emissões ocorrem, predominantemente, no setor de Agropecuária, que no ano de 2005 ficou em torno de 87%. Uma fonte emissora deste GEE é a deposição dos esterco animais em áreas de pastagem, podendo ocorrer também pela aplicação de fertilizantes químicos em solos agrícolas. As emissões de N<sub>2</sub>O aumentaram 43% entre os anos de 1990 e 2005 (MCT, 2010).

A Figura 5.3, demonstra a emissão de N<sub>2</sub>O, no ano de 2005, dos diversos setores brasileiros.

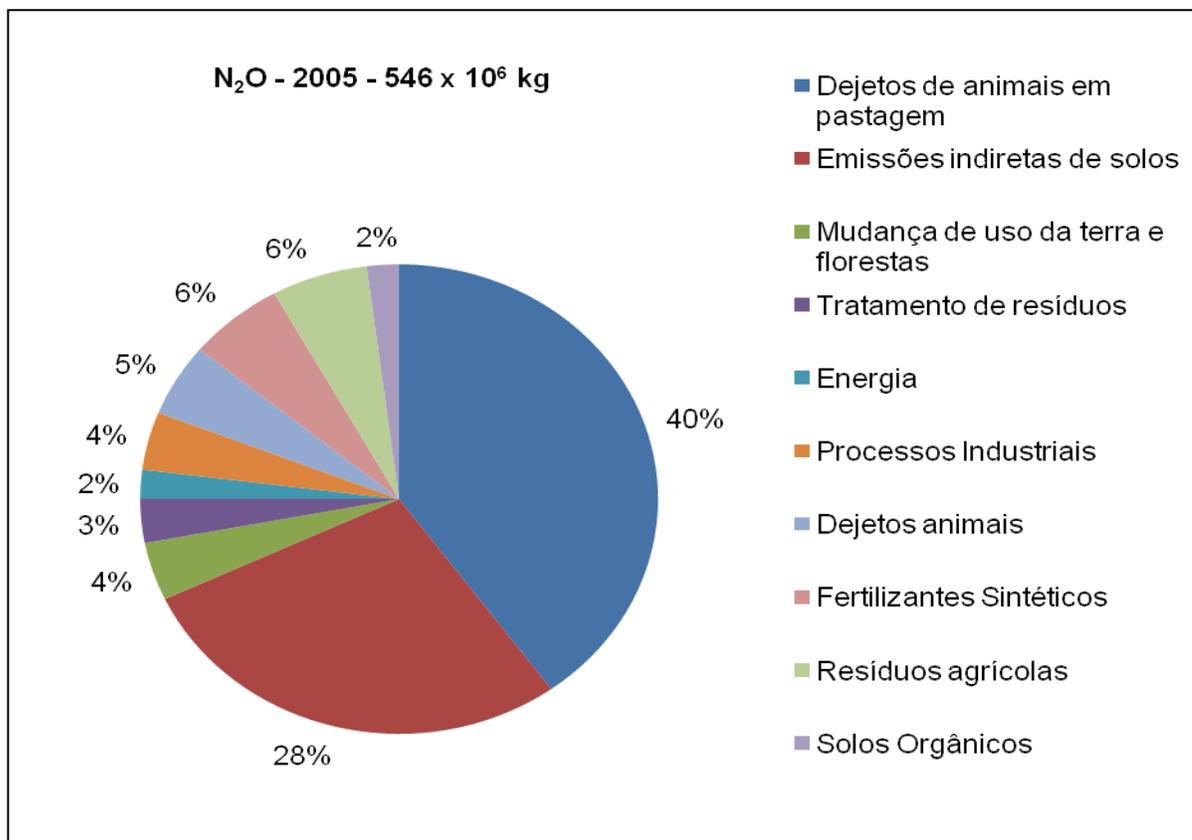


Figura 5.3 - Emissões de N<sub>2</sub>O por setor – 2005

Fonte: (MCT, 2010).

A mitigação de GEE pela biodigestão do esterco bovino totaliza aproximadamente 564,2 x 10<sup>9</sup> kg de CO<sub>2</sub> eq/ano, o que corresponde a cerca de 73% das emissões totais de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O no ano de 2005. De acordo com o “Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal”, (parte 2) do MCT (2010), no ano de 2005 o total de bovinos do rebanho nacional foi estimado em 207 milhões. As emissões totais no Brasil, no ano de 2005 dos GEE CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O foi o equivalente a 771,5 x 10<sup>9</sup> kg de CO<sub>2</sub> eq. Em 2005, 94% do total de emissões de metano pela pecuária brasileira foi atribuída à fermentação entérica, sendo que as categorias de gado bovino contribuíram com 97% das emissões de metano por fermentação entérica.

No presente estudo, a substituição do fertilizante químico foi responsável pela maior quantidade de emissões evitadas, representando cerca de 79% do total mitigado, isso se deve ao fato dos fertilizantes químicos emitirem grande quantidade de GEE no seu processo produtivo. O manejo dos dejetos respondeu por cerca de 16% do total das emissões evitadas, pois grande parte da bovinocultura brasileira atualmente se desenvolve em áreas de pastagens, onde a emissão de GEE através do esterco é menor. A produção de energia elétrica foi responsável por apenas 5% do total da mitigação de GEE, devido ao fato das emissões emitidas terem sido calculadas com base em indicadores de produção de energia elétrica em usinas hidrelétricas, sendo uma fonte renovável de energia. De acordo com o MCT (2010), em 2005 as emissões de metano pelo gado bovino foram estimadas em  $310,8 \times 10^9$  kg de  $\text{CO}_2$  eq e as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ , em  $1,5 \times 10^9$  kg de  $\text{CO}_2$  eq. Em relação ao total de emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  do rebanho bovino brasileiro no ano de 2005, as emissões evitadas pelo manejo correto dos dejetos, a substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante e a geração de energia elétrica através do biogás, correspondem a aproximadamente 180% do total emitido por este rebanho naquele ano.

Segundo o BEN (2010), no Brasil a geração de energia elétrica atingiu 466,2 TWh em 2009. Este montante se refere à energia gerada em centrais de serviço público e autoprodutores. Em 2009 a oferta interna de energia foi de 506,1 TWh, deste total, 40,0 TWh foram importados. Este valor foi 0,2% superior ao valor ofertado no ano de 2008. O consumo final de energia foi de 426,0 TWh, em comparação com o ano de 2008 houve uma redução de 0,5%.

A matriz de geração elétrica no Brasil é predominantemente renovável. Dentre a oferta de energia de fontes renováveis a que mais se destaca é a hidráulica, que no ano de 2009 respondeu por aproximadamente 76% da oferta deste tipo de energia. Pode-se afirmar que 85% da eletricidade utilizada no Brasil é proveniente de fontes renováveis, pois até mesmo as importações de energia são de origens renováveis (BEN, 2010).

De acordo com BEN (2010), o setor agropecuário foi responsável por cerca de 15,1 % do montante consumido de energia elétrica no ano de 2009. A produção de energia elétrica através do biogás do esterco dos bovinos evitaria a emissão de cerca de  $31,8 \times 10^9$  kg  $\text{CO}_2$  eq na atmosfera e geraria anualmente cerca de 117,1 TWh de energia elétrica, o que significa aproximadamente 27,5% do consumo de energia elétrica no Brasil, no ano de 2009.

Esta produtividade de energia elétrica através do biogás também supriria com folga as necessidades deste tipo de energia no setor agropecuário.

No caso da produção de energia elétrica for superior às necessidades de consumo do produtor rural, poderá ser feita a venda da energia excedente à concessionária, no valor de R\$ 0,10/kWh, que é um valor aproximado, baseado nos resultados dos últimos leilões de energia nova promovidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), BRASIL (2012). Segundo a ANEEL (2012), o valor médio do kWh da tarifa rural é de R\$ 0,18/kWh. Neste caso a utilização da energia para suprir energeticamente a propriedade é mais vantajosa que a venda para a concessionária.

A falta de conhecimentos e tecnologias muitas vezes inviabiliza o desenvolvimento dos sistemas produtivos. Uma boa estratégia para o sucesso da atividade pecuária é a agregação de valor aliada à conservação de recursos naturais. Neste contexto, o aproveitamento do esterco produzido pela bovinocultura, em processos como a biodigestão anaeróbia, se mostra eficiente para o manejo sanitário e a preservação ambiental.

## 6 CONCLUSÕES

Pela impossibilidade de quantificar o peso vivo dos bovinos do rebanho nacional, o estudo foi feito tendo como parâmetro um bovino de 300 kg de peso vivo, representando a média de peso dos animais do rebanho brasileiro.

A quantificação do valor energético do esterco bovino, neste trabalho, pode contribuir para que o mesmo não continue sendo visto como um resíduo, mas sim como um subproduto da pecuária, buscando condições para que esta atividade econômica tão importante para o Brasil possa se tornar sustentável. As pesquisas realizadas demonstraram que no Brasil existe carência de informações referentes à caracterização química dos estercos bovinos; o desconhecimento destas características pode ser responsável pelo não aproveitamento deste subproduto em maior escala. Porém este estudo demonstrou que o esterco bovino possui uma grande disponibilidade de macronutrientes N, P, K e sua utilização proporciona economia de recursos fósseis pela substituição dos fertilizantes químicos pelo biofertilizante, assim como o biogás possui grande poder energético, possível de ser transformado em energia elétrica.

A utilização do biofertilizante, além de gerar impactos econômicos positivos na propriedade rural, também pode produzir efeitos macroeconômicos, por diminuir a necessidade de produção e importação de fertilizantes químicos.

Baseando-se no contexto da Análise do Ciclo de Vida, a substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante apresenta significativa vantagem ambiental, pois o biofertilizante possui poder nutricional, sem demandar energia fóssil e emitir gases de efeito estufa na sua produção, reduzindo os impactos ambientais dos processos produtivos. Melhorando o gerenciamento destes processos, os produtores rurais se tornam competitivos junto aos consumidores e concorrência, pois cada vez mais, atitudes sustentáveis são valorizadas.

A biomassa resultante da atividade pecuária possui grande valor energético e ambiental, podendo ser encontrada em todo o país. Sua utilização apresenta oportunidades para o desenvolvimento rural, através da produção sustentável. Tem também importante representação social, sendo responsável pela geração de emprego e renda, de maneira direta e indireta.

Na década de 1980, os biodigestores não obtiveram sucesso na implantação por considerarem apenas as receitas econômicas relativas à utilização dos biofertilizantes, sendo a produção de energia elétrica deixada em segundo plano. No entanto, este estudo pode contribuir para que o biofertilizante possa ser visto dentro do contexto energético e ambiental, promovendo sua valorização.

A biodigestão anaeróbia se apresenta como um instrumento eficaz para o tratamento dos resíduos, podendo promover a autonomia energética da produção pecuária e gerar novas receitas para a propriedade rural, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma proposta para trabalhos futuros seria a caracterização química do esterco bovino de acordo com os vários sistemas produtivos e as diversas categorias e raças animais, para que sejam criados bancos de dados com referências técnicas sobre a composição do esterco bovino e o teor de macronutrientes contidos nos mesmos a fim de que a agropecuária brasileira se desenvolva de forma sustentável, otimizando o aproveitamento dos insumos orgânicos provenientes da biomassa.

A matéria orgânica é importante na estrutura do solo, pois disponibiliza gradualmente os nutrientes para as plantas. Neste sentido sugere-se que sejam desenvolvidos experimentos utilizando matéria orgânica nas culturas agrícolas a fim de avaliar seu valor energético em comparação com os fertilizantes químicos.

O Brasil é um país rico em biomassas, que deveriam ter melhor aproveitamento energético. Descobrir o potencial energético de cada tipo de biomassa é essencial para que sejam estudadas as condições para aproveitamento das mesmas. Neste sentido, poderia ser criado um programa de execução da ferramenta metodológica desenvolvida neste estudo para que se possa fazer a estimativa do valor energético de outros tipos de resíduos.

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 BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. H. S. P (2010), **Análise econômico ambiental da intensificação da pecuária de corte no centro-oeste brasileiro**. Piracicaba/SP. 86 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, L. C. F.; BUENO, O.C.; ESPERANCINI, M. S. T. **Avaliação energética econômica da cultura do milho em assentamento rural, Iperó-SP**. Botucatu, vol. 25, n.2, 2010, p.105-122.

ALVES, J. W. S. (2000) **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. São Paulo. 151 p. Dissertação (Mestrado) – PIPGE/USP.

AMORIM, A.C. (2002) **Caracterização dos dejetos de caprinos: reciclagem energética e de nutrientes**. Jaboticabal/SP. 108 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em 10 jun 2012.

ARAÚJO, A. P. S. R. (2009) **Dinâmica do mercado da carne bovina no período 2000-2007: desafios da cadeia produtiva do Tocantins**. Palmas. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Tocantins.

ARRUDA, V. C. M. de. (2004) **Tratamento anaeróbio de efluentes geradas em matadouros de bovinos**. Recife/PE. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.

BEM. Balanço Energético Nacional. 2010. Disponível em: <<http://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 30 set. 2011.

BEZERRA, S. A.(2002) **Gestão ambiental da propriedade suinícola: um modelo baseado em um biosistema integrado**. Florianópolis/SC. 270 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

BUENO, O. C. (2002) **Análise energética e eficiência cultural do milho em assentamento rural**. Botucatu/SP. 146 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil**. 2011. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 24 set. 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 10 junho 2012.

- CAMPOS, A.T. (1997) **Análise da viabilidade da reciclagem de dejetos de bovinos com tratamento biológico, em sistema intensivo de produção de leite.** Botucatu/SP. 161 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas.
- CANELA, G. C. (2006) **Construção e operação de um biodigestor rural no PAEDA.** Itajubá/MG. 45 p. Monografia - Universidade Federal de Itajubá.
- CAPAZ, R.S. (2009) **Estudo do desempenho energético da produção de biocombustíveis: aspectos metodológicos e estudos de caso.** Itajubá/MG. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.
- CARRER, C. C. (2000) **Caracterização e diferencial regional da pecuária de corte no Brasil do fim do século: gênese, modernização e a reestruturação produtiva e mercadológica.** Campinas/SP. 291 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.
- CASTRO, L. R.; CORTEZ, L. A. B., **Influência da temperatura no desempenho de biodigestores com esterco bovino.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, número 1, volume 2, 1998. Campina Grande – PB, DEAg/UFPB.
- CETEC, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Estado da arte da digestão anaeróbia.** Belo Horizonte, 1982.
- 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.
- CHERNICHARO, C. A. L., **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: biodigestores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997. v. 5, 246 p.
- COLDEBELLA, A.; SOUZA, S.N.M. de; SOUZA, J. de; KOHELER, A. C., **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – 2006.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <[www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)> Acesso em 10 junho 2012.
- COSTA, D. F. (2006) **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto.** São Paulo. 194 p. Dissertação (Mestrado), PIPGE/USP.
- COSTA, R. E. da. (2007) **Inventário do ciclo de vida do biodiesel obtido a partir do óleo de palma para as condições do Brasil e da Colômbia.** Itajubá/MG. 195 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.
- DEGANUTTI, R.; PALLACI, M. C. J. P.; ROSSI, M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA DO MEIO RURAL, 4, 2002, Bauru. **Anais...** Bauru: Enc. Ene. Meio Rural, 2002. p. 1-5. Disponível em: <[www.feagri.unicamp.br](http://www.feagri.unicamp.br)>. Acesso em: 10 junho 2009.

DIAZ, G.O. (2006) **Análise de sistemas para o resfriamento de leite em fazendas leiteiras com o uso do biogás gerados em projetos MDL**. São Paulo/SP. 162 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FAOSTAT, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO, 2010. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 10 setembro, 2009.

FERRAZ, J. M. G., MARIEL, I. E. **Biogás: uma fonte alternativa de energia**. Brasil, 1980. 27 p.

FERNANDES, S. R. et al. **Utilização de energia para crescimento e sua influencia na composição corporal de bovinos de corte**. PUBVET, Londrina, vol. 5, n. 5, ed. 152, art. 1023, 2011.

GASPAR. R. M. B. L. (2003) **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo/PR**. Florianópolis/SC. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

GENEROSO, F. B. (2001), **Quantificação e caracterização de dejetos produzidos em propriedade com exploração leiteira para uso em biodigestores e reciclagem de nutrientes**. Jaboticabal/SP. 66 p. Monografia. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista.

HAAS, G.; WETTERICH, F.; KÖPKE, U. Comparing organic, intensive and extensive grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Oxford, v. 83, n. 1/2, p. 43-53, Jan.2001. <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 setembro, 2009.

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://scielo.br>> Acesso em: 10 outubro, 2007.

HAYNES, R.J.; WILLIAMS, P.H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in Agronomy**. New York, v.49, p.119-199, 1993.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Pecuária Municipal**. Vol 37. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

JORDAN, R. A. (2005) **Desenvolvimento de uma bomba de calor água-água adicionada a biogás para utilização em processos de aquecimento e resfriamento em sistemas de produção de leite**. Campinas/SP. 286 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres Ltda., 1985. 492 p.

LEITE, V. D.; LOPES, W.S.; SOUSA, J. T. de et al. Tratamento anaeróbico de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Eng. Sanit. Ambient.**. 2004, vol. 9, no. 4, pp. 280-284.

LETTINGA, G.; FIELD, J.; VAN LIER, J.; ZEEMAN, G.; HULSHOFF POL, L.W. **Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future**. Water Science and Technology, v. 35, n. 10, p. 5-12, 1997.

LORA, E. E. S. & TEIXEIRA, F. N., **Energia e meio ambiente**. Conservação de Energia, 597 p., FUPAI, 2006.

LUCAS JÚNIOR, J. et al. **O esterco de suínos como substrato de biodigestor contínuo: observações quanto ao início da operação**. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Jundiaí: SBEA, p.658, 1987.

MACEDÔNIO, A.C.; PICCHIONI, S.A. **Metodologia para o cálculo do consumo de energia fóssil no processo de produção agropecuária**. v.1. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura, 1985.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Bovinos e Bubalinos**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 10 agosto 2011.

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.

MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia. **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. Disponível em: <[www.mct.gov.br](http://www.mct.gov.br)> Acesso em: 05 outubro 2011.

MEDEIROS, A. L. (2006) **Regressão múltipla e o modelo Arima na previsão do preço da arroba do boi gordo**. Itajubá/MG. 110p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

MEZZADRI, F. P. **Panorama da Pecuária Leiteira: Aspectos Internacionais - Nacionais – Estaduais**. Curitiba: SEAB/DERAL/DCA. 2005. Disponível em: <[www.agricultura.pr.gov.br](http://www.agricultura.pr.gov.br)>. Acesso em: 09 junho 2012.

MIELITZ NETTO, C. G. A. **Modernização e Diferenciação da Bovinocultura de Corte Brasileira**. Campinas-SP, 1994. 224 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 1994.

MONTEIRO, M. F. (2008) **Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfostato simples**. Salvador/BA. 179p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia.

NEVES, E. M.; RODRIGUES, L.; DAYOUB, M.; DRAGONE, D. S. **Fertilizantes no Plano Real: estratégias empresariais e demanda**. Piracicaba, 2002. 23p. Relatório de Pesquisa. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão A Alternativa Energética**. São Paulo: Nobel, 1986. 93 p.

NICOLELLA, A. C.; DRAGONE, D.S.; BACHA, C. J. C. Determinantes da demanda de fertilizantes no Brasil no período de 1970 a 2002. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, vol. 43, n. 1, 2005.

OLIVA, C. A.; SOUZA, J.; SOUZA, S. N. M.; SORDI, A., **Potencial de conservação de energia nos processos de produção em uma propriedade rural**. Universidade estadual do oeste do Paraná – UNIOESTE – 2002.

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.

OSAKI, F. **Calagem e adubação**. 2. ed. Campinas: Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola. 1990. 503 p.

PALHARES, J.C.P.; BIESUS, L.L.; KICH, J.D.; BESSA, M.C.; CURIOLETTI, F.; COLDEBELLA, L. **Caracterização química dos esterços de suínos e de bovinos de leite**. In: II SIGERA – Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. 2011.

PELLIZZI, G. Use of energy and labour in Italian agriculture. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.52, n.2, p.111-9, 1992.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T. Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane. **Natural Resources Research**, v.16, n.3, pp. 235-242, 2007.

PRESTES, M. T. (2007) **Efeitos de diferentes doses de esterco de gado no desenvolvimento e no balanço nutricional de mudas do angico (*Anadenanthera macrocarpa*)**. Brasília/DF. 51 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C.; KITAMURA, P. C. **Avaliação de impacto ambiental da inovação tecnológica agropecuária: um sistema de avaliação para o contexto institucional de P&D**. Cadernos de Ciência e Tecnologia, Brasília, v. 19, n. 3, p. 349-375, set./dez. 2002. Disponível em: <seer.sct.embrapa.br>. Acesso em 27 maio 2012.

ROMERO, M. G. C.; BUENO, O. C.; ESPERANCINI, S. T. Análise energética e econômica da cultura de algodão em sistemas agrícolas familiares. **Energia na Agricultura**. Botucatu, v.21, n. 4, p. 81-97, 2006.

SAFLEY, L.M.; BARKER, J.C.; WESTERMAN, P.W. Characteristics of fresh dairy manure. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.27, n.2, p.1150-1153, 1984.

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, J. F. dos (2008) **Fertilização orgânica de batata-doce com esterco bovino e biofertilizante**. Areia/PB. 109 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba.

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.

SCHLESINGER, S. (2010) **Onde pastar? O gado bovino no Brasil**. Rio de Janeiro: FASE, 2010.

SHEEHAN, J.; CAMOBRECO, V.; DUFFIELD, J.; GRABOSKI, M.; SHAPOURI, H. **Final Report: Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus**. Estados Unidos NREL/SR-580-24089 UC Category 1503, 1998.

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

SIQUEIRA JÚNIOR, L. A.(2005), **Alterações de características do solo na implantação de um sistema de integração agricultura-pecuária leiteira**. Curitiba/PR. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

TAMMINGA, S. (1992). Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control. **Journal of Dairy Science**, v. 75, p. 345–357.

TURDERA, M. V.; YURA, D. **Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de Dourados**. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS – 2006.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: UFPB, 1994. 232 p.

VAN HORN, H.H.; WILKIE, A C.; POWERS, W.J.; NORDSTEDT, R. A. **Components of dairy manure management systems**. *Journal Dairy Science*, v.77(7) p.2008-30, 1994.

VLIET, P.C.J. VAN.; REIJS, J.W.; BLOEM, J.; DIJKSTRA, J.; GOEDE, R.G.M. DE. Effects of Cow Diet on the Microbial Community and Organic Matter and Nitrogen Content of Feces. **J. Dairy Science**, v.90, p. 5146-5158. 2007.

XAVIER, J. H. V.(2003), **Análise de ciclo de vida (ACV) da produção agrícola familiar em Unaí, MG: resultados econômicos e impactos ambientais**. Brasília/DF. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília.

XAVIER, J. H. V.; CALDEIRA-PIRES, A. **Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de impactos ambientais na agricultura**. Cadernos de Ciência & Tecnologia. Brasília, v. 21, n. 2, 2004.

XAVIER, C. A. N.; LUCAS JÚNIOR, J. **Qualidade de biofertilizantes obtidos na digestão anaeróbia de dejetos de vacas em lactação confinadas que receberam diferentes dietas**. In: II SIGERA – Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. 2011.

YÀNEZ, A. E. E. (2008) **Avaliação do impacto energético e ambiental da cogeração no balanço energético e no ciclo de vida do biodiesel de óleo de dendê**. Itajubá/MG. 260 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A – Impactos ambientais da atividade pecuária**

MARTINS-COSTA (2009), a fim de analisar a contribuição da pecuária bovina nas emissões de GEE desenvolveu uma metodologia para quantificar tanto as emissões decorrentes da fermentação entérica quanto as emissões originadas pelo manejo dos dejetos de bovinos leiteiros e de corte nas propriedades rurais, quantificando de forma simplificada as emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

#### **Emissões de GEE provenientes da pecuária de corte**

A alimentação dos bovinos de corte é constituída, basicamente com campo nativo melhorado com trevo (*Trifolium sp.*), azevém (*Lolium multiflorum*) e cornichão (*Lotus corniculatus*).

As emissões de metano são diferenciadas conforme o tipo de animal, por este motivo, foi necessário uma divisão do rebanho em categorias, conforme o sexo, idade e função zootécnica conforme recomendações do IPCC. Para cada categoria são necessárias diversas operações, o conjunto de operações necessárias para cada uma é descrita no modelo como sistemas de criação (ou atelier) (MARTINS-COSTA, 2009).

O rebanho de corte conta com nove categorias de animais. A primeira categoria é a “Terneiros ao pé da vaca”, que são animais com seis meses de idade. A segunda categoria animal é composta de “Terneiras ao pé da vaca”. A terceira categoria animal é formada por fêmeas jovens que ainda não entraram na fase de reprodução, são as “Novilhas 14 meses” com idade até quatorze meses e são oriundas da categoria das terneiras. Na sequência, têm-se as “Novilhas 24 meses Prenhas”, são fêmeas com 24 meses e que já atingiram a idade reprodutiva e estão prenhas. A quinta categoria é composta por fêmeas jovens que tiveram falhas de concepção e serão descartadas, são as “Novilhas 24 meses descarte”. As vacas são separadas em duas categorias. A primeira é denominada de “Vacas prenhas”, a segunda denomina-se “Vacas com cria ao pé”, são vacas paridas que ainda estão amamentando os terneiros.

Os animais machos são divididos em duas categorias animais, sendo a categoria “Machos 14 meses para a recria”, composta por animais adquiridos no mercado para fins de

engorda e revenda. A categoria “Machos 14 meses para reprodutor” são os animais responsáveis pela reprodução na propriedade. São animais puro sangue da raça *Aberdeen Angus (Red Angus)* e que são obtidos pela inseminação artificial das fêmeas com sêmen de comprovada qualidade genética.

Para o cálculo das emissões de metano e do óxido nitroso foi utilizada a metodologia proposta pelo *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual* (1996) e *IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2001). Segundo Tier 2 da metodologia do IPCC, os animais dos rebanhos leiteiros e de corte devem ser divididos em categorias e subcategorias animais, estimando-se as emissões de GEE para cada categoria.

A Tabela A.1 apresenta as estimativas anuais das emissões de (N<sub>2</sub>O), pelo manejo de dejetos do rebanho de corte, provenientes de animais em pastagem, de acordo com a categoria animal. Essas estimativas correspondem às emissões de N<sub>2</sub>O diretas provenientes da criação animal em pastagens.

Tabela A.1 - Emissões de Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) por manejo de dejetos do rebanho de corte.

<b>Categoria animal</b>	<b>Número de animais</b>	<b>Emissões de N<sub>2</sub>O(mm) kg/ano</b>
Terneiros ao pé da vaca	30	14,85
Terneiras ao pé da vaca	30	14,85
Novilhas 14 meses	65	64,35
Novilhas 24 meses prenhas	20	19,80
Novilhas 24 meses descarte	30	29,70
Vacas com cria ao pé	60	59,40
Vacas prenhas	75	74,25
Machos 14 meses para recria	220	217,80
Machos 14 meses para reprodução	50	49,50
<b>Total</b>	<b>580</b>	<b>544,50</b>

Fonte: (MARTINS-COSTA, 2009).

A Tabela A.2 demonstra o potencial de emissões de metano do rebanho de corte, pelo manejo dos dejetos.

Tabela A.2 - Emissões de metano por manejo de dejetos do rebanho corte.

	Terneiros ao pé da vaca	Terneiras ao pé da vaca	Novilhas 14 meses	Novilhas 24 meses prenhas	Novilhas 24 meses descarte	Vacas com cria ao pé	Vacas prenhas	Machos 14 meses para recria	Machos 14 meses para reprodutor
Número de animais	30	30	65	20	30	60	75	220	50
Emissões de metano (kg CH <sub>4</sub> /cabeça)	0,0007	0,0008	0,0017	0,0018	0,0016	0,0023	0,0019	0,0024	0,0021
Emissões anuais (kg CH <sub>4</sub> /cabeça)	0,2647	0,2749	0,6266	0,6408	0,5904	0,8399	0,6902	0,8891	0,7636
Emissões diárias do sistema (kg CH <sub>4</sub> )	0,0218	0,0226	0,1116	0,0351	0,0485	0,1381	0,1418	0,5359	0,1046
Emissões por kg peso vivo (kg CH <sub>4</sub> /kg PV)	0,0022	0,0023	0,0017	0,0013	0,0012	0,0016	0,0013	0,0022	0,0017
Emissões anuais do sistema (kg CH <sub>4</sub> /ano)	7,94	8,25	40,73	12,82	17,71	50,39	51,77	195,61	38,18

Fonte: (MARTINS-COSTA, 2009).

### Emissões de GEE provenientes da pecuária leiteira

O sistema de alimentação do gado leiteiro na propriedade é composto por silagem de milho, consórcio sorgo e milheto, consórcio azevém e aveia e potreiro nativo. Para as vacas em lactação, na dieta alimentar são adicionados os concentrados.

O rebanho leiteiro da propriedade é dividido em seis subcategorias, sendo denominadas: bezerras até um ano são bezerras de até dez ou doze meses. A segunda categoria animal é composta de fêmeas jovens que ainda não entraram na fase de reprodução, são as “Novilhas não Prenhas” com idade até dezoito meses. Na sequência, tem-se as “Novilhas Prenhas”, são fêmeas com 24 meses e que já entraram na idade reprodutiva e estão prenhas. Em seguida tem-se a categoria “Vacas em Lactação”. As vacas que não estão na fase de lactação são denominadas “Vacas Secas”. A categoria animal “Touros” é composta pelo animal responsável pela reprodução na propriedade.

A Tabela A.3, apresenta as emissões de metano pelo manejo dos dejetos do rebanho leiteiro. Foram encontrados para vacas secas, touros e novilhas prenhas, valores de

emissões próximos aos valores *default* do IPCC para a América Latina e para o clima temperado, utilizado por LIMA et al. (2002) apud MARTINS-COSTA (2009), que é de 1 Kg CH<sub>4</sub>/cabeça/ano. Já para as vacas leiteiras, o fator de emissão estimado foi de 2,2 kg CH<sub>4</sub>/cabeça/ano.

Tabela A.3 - Emissões de metano por manejo de dejetos do rebanho leiteiro.

	<b>Bezerras Até 1 ano</b>	<b>Novilhas não prenhas</b>	<b>Novilhas prenhas</b>	<b>Vacas em lactação</b>	<b>Vacas secas</b>	<b>Touros</b>
Número de animais	10	14	6	20	10	1
Emissões de metano (kg CH <sub>4</sub> /cabeça)	0,0013	0,0022	0,0026	0,0061	0,0028	0,0032
Emissões anuais (kg CH <sub>4</sub> /cabeça)	0,4704	0,7886	0,9396	2,2302	1,0281	1,1542
Emissões diárias do sistema (kg CH <sub>4</sub> )	0,0129	0,0302	0,0154	0,1222	0,0282	0,0032
Emissões por kg peso vivo (kg CH <sub>4</sub> /kg PV)	0,0029	0,0021	0,0020	0,0037	0,0017	0,0016
Emissões anuais do sistema (kg CH <sub>4</sub> /ano)	4,70	11,04	5,64	44,60	10,28	1,15

Fonte: (MARTINS-COSTA, 2009).

Na Tabela A.4, são apresentadas as estimativas anuais das emissões de N<sub>2</sub>O, em kg, das diversas categorias animais, originadas da criação animal em pastagens. Essas estimativas correspondem às emissões de N<sub>2</sub>O diretas originadas de solos agrícolas, onde existe a criação animal em regime extensivo.

Tabela A.4 - Emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) por manejo de dejetos do rebanho leiteiro.

	<b>Bezerras Até 1 ano</b>	<b>Novilhas não prenhas</b>	<b>Novilhas prenhas</b>	<b>Vacas em lactação</b>	<b>Vacas secas</b>	<b>Touros</b>	<b>Total</b>
N <sub>2</sub> O(mm)kg/ano	4,95	13,86	5,94	33	16,5	1,65	75,9

Fonte: (MARTINS-COSTA, 2009).