

**ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO E USO DE
BIOFERTILIZANTE E BIOGÁS EM ESTABELECIMENTOS AGROPECUÁRIOS
DE PEQUENO E MÉDIO PORTE NO BRASIL**

***SUSTAINABILITY ANALYSIS OF BIOFERTILIZER AND BIOGAS PRODUCTION IN
SMALL AND MEDIUM SIZE AGRICULTURAL ESTABLISHMENTS IN BRAZIL***

Rosana do Carmo Nascimento Guiducci

Embrapa Agroenergia

rosana.guiducci@embrapa.br

Priscila Seixas Sabaini

Embrapa Agroenergia

priscila.sabaini@embrapa.br

Itânia Pinheiro Soares

Embrapa Agroenergia

itania.soares@embrapa.br

Silvia Belém Gonçalves

Embrapa Agroenergia

silvia.belem@embrapa.br

Grupo de Trabalho (GT): 4. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo

Frente ao elevado contingente de propriedades agropecuárias de pequeno e médio porte com rebanhos bovinos no Brasil, buscou-se avaliar o potencial deste segmento para gerar renda e contribuir com a redução de emissões de GEE, por meio da produção de biogás e biofertilizante voltados ao consumo próprio. Avaliou-se o impacto econômico e ambiental da substituição de GLP por biogás, bem como o uso de digestato como biofertilizante no cultivo de milho. Foram utilizados dados primários obtidos em propriedade familiar, Luziânia (GO), dados secundário e o auxílio da ferramenta RenovaCalc. Os resultados confirmam o potencial deste segmento de produtores agropecuários em aproveitar de forma sustentável os dejetos oriundos da bovinocultura, com fins de produção de energia renovável para autoconsumo. Em um cenário otimista, com 90% do segmento produzindo bioenergia, gera-se renda adicional equivalente a R\$ 2.052,97 milhões com o biogás e R\$ 727,09 milhões mediante substituição de 50% de fertilizante NPK pelo digestato, no cultivo de 01 ha de milho, por propriedade. A redução de emissões de GEE neste cenário é de 343.316,51 t CO₂ eq. Conclui-se que a produção de biogás e biofertilizante é sustentável em propriedades de pequeno e médio porte, resultando em impactos econômicos, ambientais e sociais relevantes.

Palavras-chave: Agricultura familiar, Biodigestor, Economia circular, RenovaBio.

Abstract

Given the high number of small and medium-sized agricultural properties with cattle herds in Brazil, we sought to evaluate the potential of this segment to generate income and contribute to the reduction of GHG emissions, through the production of biogas and biofertilizer aimed at consumption. own. The economic and environmental impact of replacing LPG with biogas was evaluated, as well as the use of digestate as biofertilizer in corn cultivation. Primary data obtained from a family property, Luziânia (GO), secondary data and the help of the RenovaCalc tool were used. The results confirm the potential of this segment of agricultural producers to sustainably use waste from cattle farming, with the aim of producing renewable energy for self-consumption. In an optimistic scenario, with 90% of the segment producing bioenergy, additional income equivalent to R\$ 2,052.97 million is generated with biogas and R\$ 727.09 million by replacing 50% of NPK fertilizer with digestate, in the cultivation of 01 ha of corn, per property. The reduction in GHG emissions in this scenario is 343,316.51 t CO₂ eq. It is concluded that the production of biogas and biofertilizer is sustainable on small and medium-sized properties, resulting in relevant economic, environmental and social impacts.

Key words: Family farming, Biodigestor, Circular economy, RenovaBio.

1. Introdução

O biogás é uma das fontes de energia renovável mais promissoras, frente aos múltiplos usos e diversidade de substratos que podem ser utilizados na produção. Com efeito, vem se expandindo em diversos países, a exemplo do Brasil, nos últimos anos. O principal uso do biogás tem sido a conversão para consumo de eletricidade. A capacidade mundial de geração de energia elétrica a partir de biogás passou de 9.634 MW, em 2010, para 21.512 MW, em 2022 (IRENA, 2023), um crescimento de 123,3% em uma década.

Embora o Brasil configure entre os 7 países que possuem 73,8% das plantas de biogás para produção de energia elétrica, responde apenas por 2,1% da capacidade instalada mundial (IRENA, 2023). Em 2024, espera-se um crescimento de 1 GW na capacidade instalada de cogeração no Brasil, alavancada por usinas movidas a biomassa que percebem cada vez mais o biogás e biometano como um quarto produto, além do açúcar, etanol e bioeletricidade (PETRONOTICIAS, 2024).

Neste contexto de transição energética e aumento da capacidade de produção de bioenergia, sobretudo biogás, setores como o agropecuário, que possui enorme potencial de geração de biomassa residual e, portanto, de produção de biogás e derivados, ainda são subaproveitados. Em 2022 havia no Brasil 885 plantas de biogás, produzindo 2,88 bilhões de Nm³/ano. Apenas 10% do substrato utilizado nesta produção era de origem da agropecuária, 16% da indústria e 74% de esgotos urbanos (CIBIOGAS, 2023). A produção é altamente concentrada em plantas de grande porte, com produção anual acima de 5 milhões de Nm³. Essas plantas respondem por 8% do total e produzem 83% do biogás. As plantas de pequeno porte (produção de até 1 milhão de Nm³/ano) respondem por 78% do total de plantas de biogás e 7% da produção, enquanto as de médio porte (produção de 1 milhão a 5 milhões de Nm³/ano) são 15% do total e respondem por 10% da produção (CIBIOGAS, 2023).

Há um grande espaço para o setor agropecuário produzir, consumir ou mesmo comercializar biogás e derivados. Particularmente, a cadeia da bovinocultura pode destinar os dejetos bovinos para a produção de biogás e biofertilizante, com impactos econômicos em redução de custos de produção e aumento de renda, além de impactos ambientais positivos, pela redução de emissão de gases de efeito estufa.

O Brasil possui o maior rebanho bovino do mundo, da ordem de 224,6 milhões de cabeças (FAO, 2023), distribuído em todo o território nacional. Há uma elevada concentração de estabelecimentos agropecuários de pequeno e médio porte, contendo de 1 até 100 cabeças de gado, como indicado na Figura 1. De um total de 1,86 milhões de estabelecimentos com efetivo bovino no país, 1,59 milhões (85,47%) estão na faixa de 1 até 100 cabeças de bovinos.

Particularmente, chama a atenção o número de estabelecimentos agropecuários com 11 até 50 cabeças de gado, pois constituem o público ideal para utilizar biodigestor de pequena escala, adaptado e dimensionado para processar resíduos da bovinocultura, com fins de produção de biogás e biofertilizante. Essa faixa responde por 42,6% do número de estabelecimentos com bovinos no Brasil, totalizando 792.041 estabelecimentos.

Este contingente de produtores poderia se beneficiar da produção e consumo de biogás e biofertilizante, com fins de autonomia energética e redução de custos nas propriedades, em uma lógica de economia circular. Segundo Milanez et al. (2018), converter a biomassa residual da atividade agropecuária (resíduos agrícolas e dejetos de animais) em energia e fertilizante é o elo fundamental para fechar os ciclos da reciclagem dos nutrientes e do carbono, evitando emissões de gases do efeito estufa - GEE. Esta é uma forma eficiente de promover economia circular com os resíduos orgânicos, assim como, promover a redução da emissão de GEE. Mas, apesar do uso de dejetos de animais e restos de culturas ser viável economicamente para produzir energia e biofertilizante, torna-se necessário um planejamento adequado por parte do

produtor, para uma gestão eficiente e eficaz da produção e fornecimento adequado de biogás e digestato à propriedade.

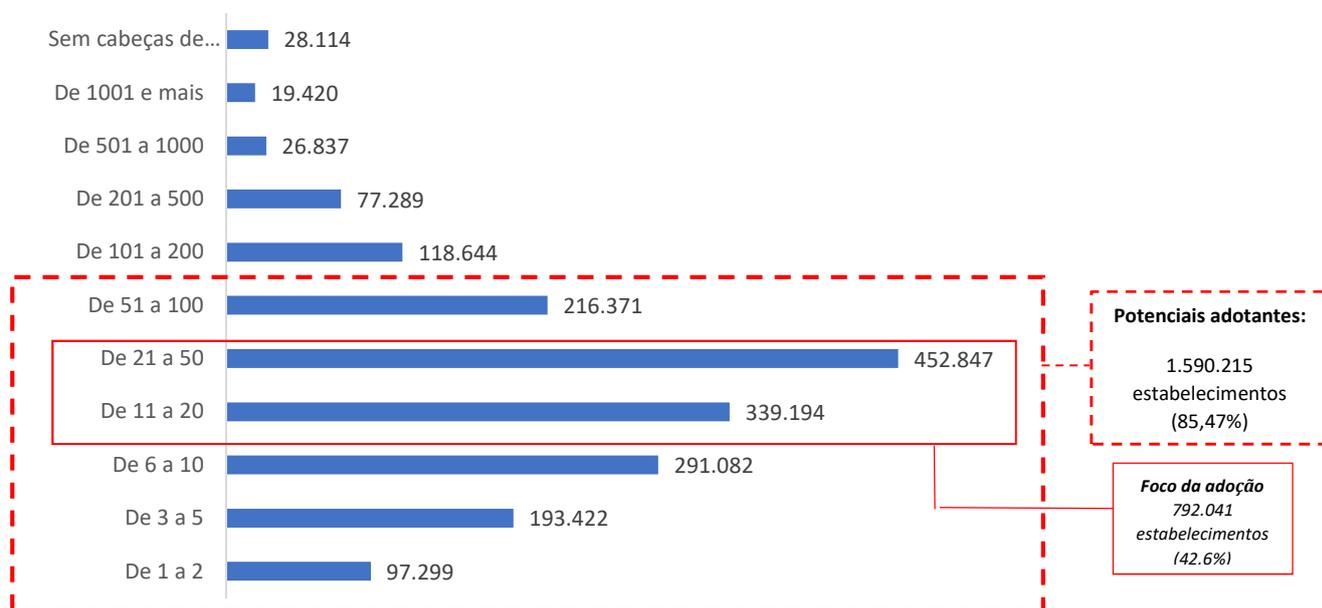


Figura 1 – Número de estabelecimentos por efetivo bovino no Brasil

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados do Censo Agropecuário 2017.

Neste contexto, e considerando o elevado contingente de propriedades agropecuárias de pequeno e médio porte, pergunta-se: qual o potencial deste segmento para contribuir com a redução de emissões de GEE, por meio da geração de energia renovável em pequena escala, destinada ao consumo próprio? Qual o impacto econômico e ambiental desta produção (biogás e biofertilizante) em um cenário de adoção abrangente?

Uma parte destes questionamentos foi abordado em Guiducci, et. al (2023). Neste trabalho busca-se incluir na análise a integração biogás e biofertilizante voltados ao consumo próprio em propriedades agropecuárias de pequeno e médio porte, com abrangência no território nacional.

2. Metodologia

Foram levantados dados primários da produção de biogás e digestato em uma propriedade familiar dedicada à atividade de bovinocultura leiteira, localizada no município de Luziânia – GO.

Utilizou-se dados de custo de produção de milho fornecidos pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, referentes à 2ª safra de milho de 2023/2023, agricultura empresarial e 1ª safra 2023/24, agricultura familiar, ambos em sistema de plantio direto, com uso de alta tecnologia – OGM para simular o uso do digestato em substituição ao fertilizante comercial NPK. Considerou-se que cada estabelecimento irá utilizar o digestato em um hectare de milho, substituindo parte do fertilizante que normalmente é utilizado neste cultivo. Optou-se pelo milho nesta análise por ser uma cultura comumente utilizada para fins de alimentação animal, em propriedades agropecuárias com rebanhos de pequeno e médio porte, foco desta análise.

Foi realizada análise química do digestato produzido na propriedade familiar em Luziânia (GO) para estabelecer a disponibilidade química, sobretudo dos elementos de

nitrogênio, fósforo e potássio, denominados N-P-K. Nos fertilizantes químicos, os elementos P e K são expressos como P₂O₅ (óxido de fósforo) e K₂O (óxido de potássio), respectivamente. Foi feita a conversão para essas formas químicas, seguindo os critérios definidos por CFSMG (1999).

Em se tratando de uma avaliação *ex ante*, os impactos econômicos esperados são relacionados ao excedente econômico gerado pela substituição do gás liquefeito de petróleo – GLP pelo biogás (agregação de valor da bovinocultura), conforme demonstrado em Gonçalves et al. (2023) e Guiducci et al. (2023), e ganhos com redução no custo de produção agrícola, mediante substituição de parte do fertilizante utilizado na lavoura de milho pelo biofertilizante (digestado).

Fez-se análise de viabilidade econômica do biodigestor em nível de propriedade, utilizando para isto um fluxo de caixa, onde o investimento no biodigestor ocorre no ano 0, orçado em R\$10.000,00. Foram considerados cinco anos de produção, em que o o fluxo de renda anual refere-se ao valor da produção do biogás, acrescido do valor relativo à redução de gastos com fertilizante. Buscou-se avaliar se estes fluxos econômicos pagam o investimento no biodigestor. Para isso, os seguintes indicadores foram avaliados: Taxa interna de retorno - TIR, Valor presente líquido -VPL e *Payback* descontado.

A avaliação do impacto ambiental do biogás e do digestato foi realizada em termos de emissões de CO₂ equivalentes evitadas, no âmbito do Programa RenovaBio (BRASIL, 2018). Utilizou-se a versão 7 da “RenovaCalc - Rota Biometano para certificação de biocombustíveis” (ANP, 2020) no cálculo da Intensidade de Carbono do Biogás, que foi comparada à intensidade de carbono do GLP, combustível fóssil que o biogás está substituindo. O mesmo procedimento foi adotado para estimar o impacto do uso do digestado como substituto de 50% de fertilizante NPK no cultivo de 1 ha de milho.

A RenovaCalc corresponde a um conjunto de planilhas na plataforma Excel®, contendo um banco de dados e uma estrutura de cálculo específica (ANP, 2023). A RenovaBio adota a Avaliação de Ciclo de Vida - ACV atribucional em sua metodologia e prioriza a categoria “Mudança do Clima” como *output* da análise. A abrangência dos cálculos é “do poço à roda” (ou “do berço ao túmulo”). Nesse escopo são contabilizados todos os fluxos de material e energia consumidos pelos processos produtivos e emitidos para o meio ambiente, desde a extração de recursos naturais, aquisição ou produção e tratamento da biomassa, sua conversão em biocombustível, até sua combustão em motores, incluindo todas as fases de transporte (MATSUURA et al., 2018).

Neste estudo foram utilizados dados relacionados à fase agrícola, da RenovaCalc v.7 Aberta da rota de Etanol de milho para simular o impacto ambiental da redução de 50% de fertilizantes NPK no cultivo de milho. Como o digestado é um resíduo, não foi atribuída carga ambiental para este bioinsumo.

Para dimensionar o potencial de impacto econômico e ambiental do biogás e do digestato, consideraram-se três cenários. No primeiro cenário, apenas 10% do grupo de interesse (79.204 estabelecimentos) irá adotar o biodigestor, com fins de produção e consumo de biogás e biofertilizante. No segundo cenário tem-se 50% de adesão do segmento (396.012 estabelecimentos); e, no terceiro cenário, mais otimista, 90% dos estabelecimentos com efetivos bovinos entre 11 e 50 cabeças adotam o biodigestor (712.837 estabelecimentos).

3. Resultados e discussão

Os resultados discutidos neste tópico estão organizados em três seções. Inicialmente apresenta-se resultado laboratorial e análise do potencial do digestato para ser utilizado como biofertilizante. Em seguida, apresentam-se os impactos econômicos do biogás e do digestato

em nível de propriedade, e também nos cenários de adoção. Por fim, são apresentados os resultados do impacto ambiental do biogás e do digestato nos cenários propostos.

3.1. Análise do potencial de uso do digestato como biofertilizante

A análise química do digestato produzido na propriedade familiar revelou a quantidade encontrada de cada elemento expressa em g/kg de sólidos totais (ST) (Tabela 1). A amostra apresentou 4,3% de ST. Considerando uma produção diária de 200 litros de digestato na propriedade (GUIDUCCI et al., 2023) gera-se 8,6 kg de sólidos totais contendo 0,11 kg de K, 0,08 kg de P e 0,27 kg de N, entre outros nutrientes por dia.

Tabela 1 –Propriedades químicas do digestato

Elementos químicos	Resultado	
	(g/kg de ST)	kg/200 litros de digestato
Alumínio (AL)	9,37	
Boro (B)	0,05	
Cálcio (Ca)	8,59	
Cobre (Cu)	0,02	
Ferro (Fe)	5,59	
Potássio (K)	12,86	0,11
Magnésio (Mg)	3,95	
Manganês (Mn)	0,21	
Fósforo (P)	9,21	0,08
Enxofre (S)	3,85	
Zinco (Zn)	0,08	
Nitrogênio (N)	31,00	0,27

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados da pesquisa.

O resultado da transformação desses elementos para a fórmula dos fertilizantes é mostrado na Tabela 2 em termos de disponibilidade anual. Observa-se que a produção anual de digestato contém 95,98 kg de N, 65,30 kg de P₂O₅ e 47,78 kg de K₂O. Dada a quantidade utilizada na safra 2023/2023, de 104 kg/ha de N e 75kg/ha de P₂O₅, assim como o recomendado de K₂O de 70 kg/ha, tem-se que a produção anual de digestato pode suprir até 92,3% das necessidades de N, 87,1% de P₂O₅ e 68,3% de K₂O em uma área de 1 ha de milho.

Tabela 2 – Digestato: disponibilidade de componentes químicos e demanda para cultivo de milho

Elementos	Disponibilidade no digestato (kg/ano)	Uso no cultivo de milho (Kg/ha)	% suprido pelo digestato em 1 ha
Nitrogênio	95,98	104*	92,3
P ₂ O ₅	65,30	75*	87,1
K ₂ O	47,78	70**	68,3

Fonte: elaborado pelos autores.

* Safra 2023/CONAB. ** Quantidade recomendada por CFMAG (1999).

3.2. Impacto econômico da produção de biogás e digestato nas propriedades agropecuárias de pequeno e médio porte

Cada estabelecimento fez a instalação de um biodigestor, orçado no valor de R\$ 10.000,00, com capacidade de produzir o equivalente à 2 botijões de 13 kg de biogás por mês. Sendo assim, a produção anual por estabelecimento é de 24 botijões ou 312 kg de biogás ao ano. O valor do botijão considerado na análise é de R\$ 120,00, o que gera uma renda adicional de R\$ 2.880,00 por ano, para cada estabelecimento. A redução no custo com fertilizantes foi avaliada para dois sistemas de cultivo de milho na safra 2023/2023, um de agricultura empresarial, 2ª safra 2023/2023 e outro de agricultura familiar, 1ª safra 2023/24, ambos em plantio direto, com uso de alta tecnologia – OGM.

De acordo com os dados da CONAB, o dispêndio com fertilizantes (MAP, UREIA 45 e MAP Purificado) foi de R\$ 1.165,00/ha de milho, no sistema empresarial, respondendo por 25,7% do custo total e R\$ 2.040,00/ha, no sistema familiar, respondendo por 29,3% do custo total. Com a utilização do digestato, a economia obtida é de R\$ 582,50/ha, no sistema empresarial, e R\$ 1.020,00/ha, no sistema familiar.

A renda anual obtida no sistema empresarial é de R\$ 3.462,50, sendo R\$ 2.880,00 do biogás e R\$ 582,50 do digestato (Tabela 3). No sistema familiar, este valor chegou a R\$ 3.900,00 devido ao maior ganho com digestato. Em ambos os casos, constatou-se viabilidade econômica do investimento no biodigestor, com TIR de 21,6% e 27,4%, respectivamente, para uma taxa mínima de atratividade - TMA de 16% a.a. O VPL de R\$ 5.000 (empresarial) e R\$ 6.000,00 (familiar), indicam que ao final de cinco anos de produção, além de recuperar o capital investido remunerado à taxa de 16% a.a., retorna o equivalente ao VPL. O *payback* descontado foi 3,96 no sistema empresarial e 3,41 no sistema familiar, indicando que o investimento se paga em 4 anos; e 3 anos e 3 meses, respectivamente.

Tabela 3 – Indicadores de viabilidade econômica do investimento no biodigestor, em nível de propriedade

Indicadores	Sistema Empresarial	Sistema Familiar
Renda com biogás	R\$ 2.880,00	R\$ 2.880,00
Renda com digestato	R\$ 582,50	R\$ 1.020,00
Fluxo de renda anual	R\$ R\$ 3.462,50	R\$ 3.900,00
Investimento no biodigestor	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00
TMA	16% a.a.	16% a.a.
TIR	21,6%	27,4%
VPL	R\$ 5.000,00	R\$ 6.000,00
<i>PayBack</i> descontado	3,96	3,41

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 4 mostra os resultados do impacto econômico *ex ante* da produção e consumo de biogás e digestato nos três cenários propostos. No cenário 1 são produzidos 24,7 mil toneladas de biogás, com benefício econômico de R\$ 228, 11 milhões. Nos cenários 2 e 3, a produção passa para 123,5 mil toneladas e 222,4 mil toneladas de biogás, respectivamente, com impacto econômico de R\$ 1,1 bilhões e R\$ 2,0 bilhões ao ano, respectivamente.

Com relação ao digestato, conforme já mencionado, verificou-se potencial para substituir até 92,3% do N e 87,1% do P₂O₅ usados no cultivo de milho safrinha em 2023. Nos dados informados pela CONAB não houve aplicação de K no cultivo empresarial, apenas no

sistema familiar. Todavia, o digestato poderia suprir até 68,3% do requerimento médio do milho, estabelecida em 70 kg/ha de k_2O por CFSMG (1999).

Diferentemente da adubação convencional, cuja aplicação se dá predominantemente no momento do plantio/tratos culturais, evitando perdas, o digestato poderá ser armazenado para aplicações periódicas ao longo do ano, de modo a melhorar a fertilidade do solo com o tempo. Sendo assim, optou-se, nesta análise *ex ante*, por um percentual de substituição de 50% do fertilizante, percentual considerado conservador frente ao potencial apresentado nas análises químicas laboratoriais.

Tabela 4 – Impacto econômico da produção e consumo de biogás e digestato, por ano

Cenário	nº de estabelecimentos	Produção de Biogás (T)	Benefício econômico (R\$ milhões)		
			Biogás	Digestato	
				Empresarial	Familiar
1	79.204	24.711,68	228,11	46,14	80,79
2	396.021	123.558,40	1.140,54	230,68	403,94
3	712.837	222.405,11	2.052,97	415,23	727,09

Fonte: Elaborado pelos autores.

O total de ha de milho nos cenários propostos correspondem ao número de estabelecimentos em cada cenário, pois cada estabelecimento irá cultivar uma área de 1 hectare de milho. O benefício econômico (Tabela 4) pela redução de custo com fertilizante é de R\$ 46,14 milhões, no cultivo empresarial, no cenário 1; e, R\$ 80,79 milhões, no cultivo familiar. No cenário 2, esses valores passam a R\$ 230,7 milhões (cultivo empresarial) e R\$ 403,94 milhões (cultivo familiar). Por fim, no cenário 3, quando 90% dos estabelecimentos estão produzindo e utilizando digestato, a economia com fertilizantes chega a R\$ 415,23 milhões no sistema de cultivo empresarial e R\$ 727,09 milhões no sistema de cultivo familiar. Esses valores referem-se ao conjunto de estabelecimentos no Brasil, com rebanho bovino entre 11 e 50 cabeças.

3.3. Impacto ambiental da produção de biogás e digestato nas propriedades agropecuárias de pequeno e médio porte

Em cada estabelecimento agropecuário, por ano, utilizou-se 7,2 toneladas de esterco e 90.000 litros de água, o que resulta em uma intensidade de carbono (IC) de 3,59 gCO_2eq/MJ para o Biogás, enquanto o gás GLP tem IC de 85 gCO_2eq/MJ (Tabela 5).

Tabela 5 – Intensidade de carbono do biogás e GLP

Intensidade de Carbono	$g CO_2eq/MJ$	PCI* em MJ	Emissão em $kg CO_2eq$
Biogás (calculado na Renovacalc v7)	3,59	604,16	2,17
GLP	85	604,16	51,35

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados da ANP.

*Poder Calorífico Inferior.

Considerando o poder calorífico inferior do GLP que é de 46,47 MJ/kg foi possível calcular o conteúdo energético de um botijão de 13 kg que é de 604,16 MJ. As emissões do

ciclo de vida do GLP representam um impacto de 85 g CO₂eq/MJ, de forma que o uso de um botijão de gás representa a emissão de 51,35 kg CO₂eq para a atmosfera. Já a obtenção da mesma quantidade de energia, por meio do biogás, representa um impacto de 2,17 kg CO₂eq (Tabela 5). Ou seja, a substituição de um botijão de GLP tem o potencial de evitar a emissão de 49,18 kg CO₂eq.

Aplicando essa redução ao cenário de adoção proposto, calcula-se o impacto ambiental expresso em emissões evitadas (Tabela 6). Observa-se um potencial de evitar a emissão de 93.487,3 t CO₂eq no primeiro cenário, chegando a 467.436,57 tCO₂eq no cenário 2 e 841.385,83 t CO₂eq no cenário 3.

Tabela 6 – Impacto ambiental da substituição de gás GLP por biogás, medido em t CO₂-eq evitadas

Cenário	Nº de botijões de 13 kg (GLP) substituídos/ano	Emissão GLP em t CO ₂ -eq	Emissão Biogás em t CO ₂ -eq	Emissões evitadas em t CO ₂ -eq
	A	B	C	D=B-C
1	1.900.898,40	97.609,90	4.122,58	93.487,31
2	9.504.492,00	488.049,49	20.612,91	467.436,57
3	17.108.085,60	878.489,08	37.103,24	841.385,83

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Renovabio é definido um perfil típico de produção, que busca representar a quantidade média de insumos aportados aos sistemas de produção agrícola brasileiros, expresso em kg CO₂ eq/t de produto agrícola. No caso do cultivo de milho, este perfil corresponde a uma emissão de 242,66 kg CO₂ eq/t milho. Reduzindo-se em 50% o uso dos fertilizantes, a emissão passa a ser 162,39 kg CO₂ eq/t milho, que corresponde a uma redução de emissão de 80,27 kg CO₂ eq/t milho.

Trazendo esta mitigação para o cenário de adoção considerado neste estudo, chega-se ao impacto ambiental potencial do segmento de bovinocultores com rebanhos de pequeno e médio porte. Para isto, considerou-se a produtividade média de 6 t/ha de milho no cultivo empresarial (safra 2023/2023) e 7,2 t/ha no cultivo familiar (safra 2023/2024), para obter emissões evitadas em 1 hectare de milho. Os resultados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Impacto ambiental da substituição de fertilizante comercial por digestato, medido em t CO₂-eq evitadas

Cenário	Nº de estabelecimentos	Emissões evitadas, em t CO ₂ eq	
		Empresarial	Familiar
1	79.204,10	38.146,28	45.775,53
2	396.020,50	190.731,39	228.877,67
3	712.836,90	343.316,51	411.979,81

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se que no cenário 1, a substituição de 50% de fertilizante NPK por digestato permite reduzir a emissão de 45.775,53 t CO₂ eq, podendo chegar a 411.979,81 t CO₂ eq no cenário 3, para o sistema de cultivo familiar. No sistema empresarial, a variação das emissões

evitadas se devem à diferença na produtividade do milho, chegando a evitar a emissão de 343.316,51 t CO₂ eq no cenário 3.

Para efeitos de comparação, Lacerda et al. (2009) relatam valores de fixação de CO₂ equivalente entre 103,4 a 689,3 t.ha⁻¹ para as florestas tropicais nas Américas. Todavia, os autores alertam que os valores encontrados na literatura sobre fixação de carbono na forma de CO₂-equivalente são muito variáveis. Desta forma, considerando as emissões evitadas com o biogás e o digestato, tem-se no cenário 1 o potencial de fixação de carbono similar a uma área de 202,04 a 1.346,84 hectares de florestas tropicais, enquanto a mitigação observada no cenário 2 equivale a uma área de floresta que varia de 1.010,18 ha a 6.734,18 ha. No cenário três esta área varia de 1.818,32 ha a 12.121,52 ha de floresta (Figura 2).

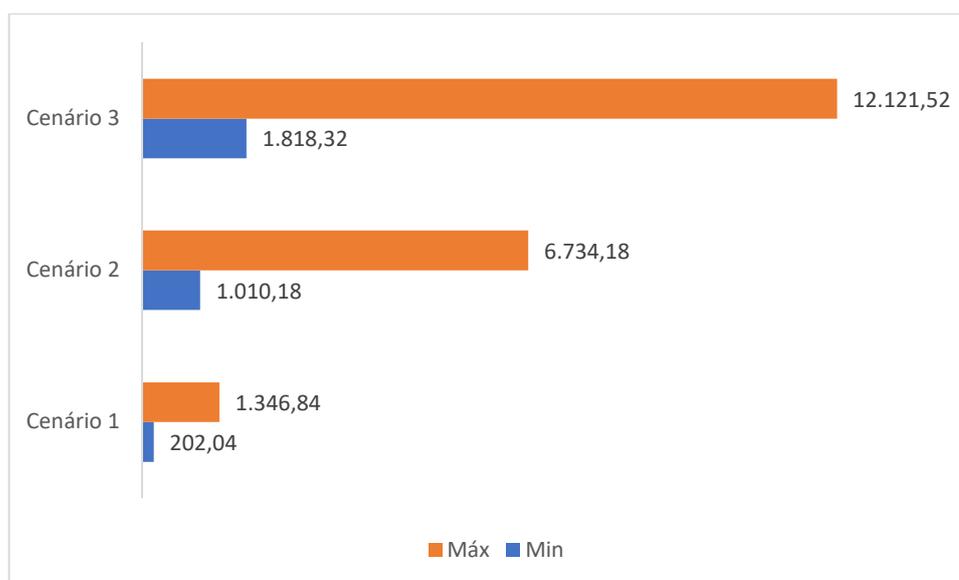


Figura 2 – Emissões de CO₂ evitadas pelo uso do Biogás, expressa em área de floresta tropical equivalente, por cenário.

4. Conclusão

Os resultados deste estudo mostraram ganho econômico, social e ambiental expressivos, com a adesão de pequenos e médios estabelecimentos agropecuários à lógica da economia circular, por meio do aproveitamento de dejetos da bovinocultura para produção de biogás e biofertilizante (digestato) voltada ao autoconsumo.

Em nível de propriedade agropecuária, verificou-se que o investimento no biodigestor é viável economicamente, sendo pago em menos de 4 anos, considerando apenas a renda adicional obtida com o biogás e o digestato.

Nos cenários de adoção propostos, a produção de biogás em substituição ao GLP permite que o conjunto de estabelecimentos agropecuários com efetivo bovino entre 11 a 50 cabeças gerem renda adicional da ordem de R\$ 228,11 milhões, quando 10% do segmento adere à produção de bioenergia. Quando a adesão é de 50% do segmento, obtem-se renda adicional de R\$ 1.140,54 milhões e R\$ 2.052,97 milhões para 90% de adesão. Em termos de impacto ambiental, é possível evitar a emissão de 93.487,31 t CO₂-eq (cenário 1), 467.436,57 t CO₂-eq (cenário 2) 841.385,83 t CO₂-eq (cenário 3) com a substituição de GLP por biogás nas propriedades.

O uso do digestato como biofertilizante no cultivo de 1 hectare de milho nas propriedades também resultou em impactos econômicos e ambientais significativos. Os resultados da análise química do digestato mostrou que a produção anual de digestato contém 95,98 kg de N, 65,30 kg de P₂O₅ e 47,78 kg de K₂O, o que permitiria suprir até 92,3% das

necessidades de N, 87,1% de P₂O₅ e 68,3% de K₂O em uma área de 1 ha de milho. Para um sistema de cultivo familiar, a redução de 50% de NPK gera um ganho econômico da ordem de R\$ 80,79 milhões, se 10% do segmento estiver aderindo à produção de biogás e digestato. Este montante se eleva para R\$ 403,94 milhões se houver 50% de adesão e R\$ 727,09 se 90% dos estabelecimentos com efetivo bovino de 11 a 50 cabeças aderirem à produção. O impacto ambiental do uso do digestato em substituição à 50% do fertilizante é de 45,7 mil t CO₂ eq no cenários 1, podendo chegar a 412 mil t CO₂ eq no cenário 3, no sistema de cultivo familiar.

Conclui-se que há espaço para a ampliação da produção de biogás e derivados no setor agropecuário brasileiro, mais particularmente na cadeia produtiva da bovinocultura. Verificou-se que a inclusão de estabelecimentos agropecuários de menor porte no processo de transição energética por meio de práticas de economia circular permite a obtenção de resultados importantes em termos de sustentabilidade da cadeia produtiva, com geração de renda, autonomia energética e impacto ambiental positivo.

Referências

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RenovaBio**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 25 de mar. 2024.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Renovacalc**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>. Acesso em: 25 de mar. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução N° 758, de 23 de novembro de 2018. Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei n° 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras. **Diário Oficial da União**, 27 de nov. 2018. Acesso em: 25 de mar. 2024

CFSMG. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5a Aproximação** / Antonio Carlos Ribeiro, Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Victor Hugo Alvarez V., Editores. – Viçosa, MG, 1999. 359p.

CIBIOGAS. Centro Internacional de Energias Renováveis. **Panorama do Biogás no Brasil 2022**. Relatório Técnico n° 001, Foz do Iguaçu, 2023. Disponível em: <https://materiais.cibogas.org/webinar-panorama-do-biogas-no-brasil-2022>. Acesso em: 18 de mar. 2024.

FAO. FAOSTAT: crops and livestock products. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 3 ago. 2023.

GUIDUCCI, Rosana do Carmo Nascimento et al.. **Impacto econômico-ambiental da produção de biogás para consumo próprio em estabelecimentos agropecuários de pequeno e médio porte**. In: Anais do VII Encontro de Pesquisa e Inovação (Enpi). Anais ... Brasília (DF) Embrapa Agroenergia, 2023. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1158048/1/Impacto-economico-ambiental.pdf>. Acesso em: 23 Jan. 2024.

GONÇALVES, Delman de Almeida et al.. **Impacto econômico e ambiental da adoção de biodigestor de pequena escala para produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura leiteira em propriedade rural familiar.** In: Anais do 61º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER). Anais...Piracicaba(SP) ESALQ/USP, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/sober2023/627376-IMPACTO-ECONOMICO-E-AMBIENTAL-DA-ADOCADO-DE-BIODIGESTOR-DE-PEQUENA-ESCALA-PARA-PRODUCAO-DE-BIOGAS-A-PARTIR-DE-DEJE>. Acesso em: 23 Jan. 2024

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário, 2017.** 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados--definitivos>. Acesso em: 2 ago. 2023.

PETRONOTICIAS. **Capacidade instalada da cogeração de energia no Brasil pode crescer em até 1 GW no ano de 2024.** Disponível em: <https://petronoticias.com.br/capacidade-instalada-na-cogerao-de-energia-pode-crescer-em-ate-1-gw-no-brasil-em-2024/>. Acesso em 25 de mar. 2024.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Statistics Time Series: What are the latest trends in renewable energy?** Last update: 18 July, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>. Acesso em 25 de mar. 2024.

LACERDA, Jeanicolau Simone et al. **Estimativa de biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de essências nativas.** Centro de Métodos Quantitativos do Depto. de Ciências Florestais, ESALQ. Universidade de São Paulo. METRVM (ISSN 1519-5058), nº 5 nov. 2009. Disponível em [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:metrvm:metrvm-2009-n05.pdf](http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:metrvm:metrvm-2009-n05.pdf). Acesso em: 02 ago. 2023.

MATSUURA, Marília Ieda Folegatti et al. **RenovaCalcMD: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio.** 2018. Disponível em: http://www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/2018/n10/CP10-2018_Nota-Tecnica-Renova-Calc.pdf.

MILANEZ, Artur Yabe et al. **Biogás: a próxima fronteira da energia renovável.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, mar. 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15384/1/BS47_Biogas_FECHADO.pdf. Acesso em: 7 dez. 2023.