



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA

Cadeias Produtivas do Estado do Rio Grande do Sul

Roteiros para a Descarbonização

Relatório Final 2025

Para fazer o download deste e outros materiais, visite: <https://www.proclima2050.rs.gov.br/inicial>

Este documento foi coordenado pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul, através da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura, por meio da Assessoria do Clima, e realizado pelo ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, em parceria com a Ecofinance Negócios e a Wyse Conexão. Trata-se do relatório final de Cadeias Produtivas do Estado do Rio Grande do Sul: Roteiros para a Descarbonização, desenvolvido no âmbito do processo de Conformidade Climática do Estado.

Este trabalho pode ser copiado, redistribuído e adaptado para fins não comerciais, desde que seja devidamente citado. Em qualquer utilização deste trabalho, não deve haver qualquer sugestão de que o ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade endossa qualquer organização, produto ou serviço específico.

Citação sugerida:

Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura, ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, Ecofinance Negócios e Wyse Conexão. Cadeias Produtivas do Estado do Rio Grande do Sul: Roteiros para a Descarbonização. Porto Alegre: Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura, ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, Ecofinance Negócios e Wyse Conexão, 2025.

ISBN: 978-85-99093-50-4

Para informações adicionais, por favor, contatar:

ICLEI América do Sul, R. Marquês de Itu, 70 - Vila Buarque, São Paulo – Brasil, 01223-000
iclei-sams@iclei.org.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Rio Grande do Sul (Estado). Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura
Cadeias produtivas do Estado do Rio Grande do Sul
[livro eletrônico] : roteiros para a descarbonização / Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura, ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. -- Porto Alegre, RS : ICLEI Governos Locais pela Sustentabilidade, 2026.
PDF

Bibliografia
ISBN 978-85-99093-50-4

1. Agronegócio 2. Desenvolvimento sustentável 3. Dióxido de carbono - Aspectos ambientais - Brasil 4. Efeito estufa (Atmosfera) 5. Emissões de gases efeito estufa 6. Pecuária 7. Petroquímica 8. Rio Grande do Sul (RS) 9. Silvicultura I. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. II. Título.

26-362955.1

CDD-338.1

Índices para catálogo sistemático:

1. Agronegócios e desenvolvimento sustentável : Economia 338.1
Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA

Cadeias Produtivas do Estado do Rio Grande do Sul

Roteiros para a Descarbonização

Relatório Final 2025

Este produto é parte da Conformidade Climática do Estado do Rio Grande do Sul



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA

Governo do Estado do Rio Grande do Sul

Eduardo Leite - *Governador*

Gabriel Souza - *Vice-Governador*

Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA)

Marjorie Kauffmann - *Secretária do Meio Ambiente e Infraestrutura*

Marcelo Camardelli Rosa - *Secretário Adjunto do Meio Ambiente e Infraestrutura*

Daniela Mueller de Lara - *Coordenadora da Assessoria do Clima*

Mariana Pavlick Pereira - *Assessora Técnica da Assessoria do Clima*

Diogo Fernando Heck - *Assessor Técnico da Assessoria do Clima*

Ricardo Andreazza - *Assessor Técnico da Assessoria do Clima*

Orozimbo Silveira Carvalho - *Especialista em Infraestrutura da Assessoria do Clima*

Luiz Antonio Freitas Junior - *Especialista em Tecnologia da Informação e Comunicação*

Maria Eduarda de Oliveira da Silva - *Estagiária da Assessoria do Clima*

Grupo Executivo

Rafael Maraschin Guigou, Valmir Zanatta, Liana Barbizan Tissiani - *Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura*

Leonardo Peraça da Silva, Carla Marle Paulitsch - *Secretaria de Desenvolvimento Econômico*

Alexandre Batista Scheifler, Cassio Martinez Machado - *Secretaria de Desenvolvimento Rural*

Lucas Corrêa Born - *Secretaria Estadual da Saúde*

Marlon Silva de Souza, Edinei Rodrigues Pavão - *Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Metropolitano*

Daiane Boelhower Menezes, Itzayana González Ávila, Fernando Preusser de Matt - *Secretaria da Reconstrução Gaúcha*

Ana Maria Hermes, Ana Amélia Da Cas Lima Duarte - *Defesa Civil*

Madalena Heinen, Alexandra Cruz Passuelo - *Secretaria de Inovação, Ciência e Tecnologia*

Ari Borges dos Santos - *Secretaria de Obras Públicas*

Álvaro Luiz de Melo Machado - *Secretaria de Turismo*

Vera Inêz Salgueiro Lermen, Maria do Socorro Ramos Barbosa - *Secretaria de Planejamento e Gestão e Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais*

Tiago da Silva Pinz, Wesley Henrique do Carmo Oliveira - *Secretaria da Fazenda*



ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade

Secretaria Executiva

Rodrigo Perpétuo - *Secretário Executivo ICLEI América do Sul*

Rodrigo Corradi - *Secretário Executivo Adjunto e Diretor ICLEI Brasil*

Armelle Cibaka - *Gerente de Planejamento, Gestão e Conhecimento*

Coordenação Técnica

Keila Ferreira - *Coordenadora Técnica Brasil*

Marília Israel - *Coordenadora Técnica Regional*

Stephania Aleixo - *Coordenadora Técnica Regional*

Project Management Office

Maria Fernandes Caldas - *Senior Fellow de Desenvolvimento Sustentável*

Coordenação e Desenvolvimento Técnico dos Estudos de Cadeias Produtivas

Léa Gejer - *Coordenadora Técnica Brasil*

Iris Coluna - *Assessora da Área Técnica Regional*

Maria Fernandes Caldas - *Senior Fellow de Desenvolvimento Sustentável*

Joice Oliveira - *Analista da Área Técnica Regional*

Gustavo Sanches da Silva - *Analista da Área Técnica Brasil*

Equipe de Comunicação

Fernanda Gouveia - *Analista de Comunicação Regional*

Gustavo Barboza - *Assistente de Comunicação Regional*

Colaboradores Externos

Apoio Técnico

Ecofinance Negócios

Eduardo Baltar - *CEO*

Anna Luisa Netto - *Consultora Associada*

Jhulie Ferreira - *Consultora Associada*

Andrew Messias - *Consultor*

Mirela Coelho - *Consultora*

Lucimara Carvalho - *Assistente de Projetos*

Livia Oliveira - *Consultora*

Fábio Teixeira - *Consultor*

Gerd Angelkorte - *Consultor*

Luiz Bernardo Baptista - *Consultor*

Mariana Ciotta - *Consultora*

Wyse Conexão

Christian Wyse de Lemos - *CEO*

Priscilla Souza Agassis Machado - *Consultora*

Diagramação

Max Tango - *Arquiteto e Designer*

LISTA DE SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais	IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
AGEFLOR	Associação Gaúcha de Empresas Florestais	IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
BAU	Business-as-Usual	ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
BLUES	Brazilian Land Use and Energy Systems	IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono	IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
CEBRI	Centro Brasileiro de Relações Internacionais	MM	Milhões
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural	MUT	Mudança do Uso da Terra
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	PEPSA	Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	PFM	Produtos Florestais Madeireiros
ESG	Environmental, Social and Governance (Ambiental, Social e Governança)	PROVEG RS	Programa Estadual de Recuperação da Vegetação Nativa do Rio Grande do Sul
FARSUL	Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul	REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
FBN	Fixação Biológica de Nitrogênio	RS	Rio Grande do Sul
FCC	Craqueamento Catalítico Fluido	SEAPI	Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental	SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
FETAG	Federação dos Trabalhadores na Agricultura	SEFAZ	Secretaria de Estado da Fazenda
FGV	Fundação Getúlio Vargas	SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura
FIERGS	Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul	SINDILAT	Sindicato da Indústria de Laticínios e Produtos Derivados do Rio Grande do Sul
FUNDESA	Fundo de Desenvolvimento e Defesa Sanitária Animal do Estado do Rio Grande do Sul	SSP	Shared Socioeconomic Pathways (Caminhos Socioeconômicos Compartilhados)
GEE	Gases de Efeito Estufa	UGH	Unidade de Geração de Hidrogênio
H2V RS	Programa Hidrogênio Verde		
IAM	Integrated Assessment Models (Modelos de Avaliação Integrada)		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma metodológico para as projeções setoriais das cadeias produtivas.....	20
Figura 2: Teia de stakeholders que contribuíram com a coleta de dados do mapeamento das emissões e remoções das cadeias produtivas.....	22
Figura 3: Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia petroquímica.....	23
Figura 4: Emissões da cadeia petroquímica do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO ₂ e).....	26
Figura 5: Projeção de emissões dos cenários BAU e Descarbonização da cadeia petroquímica, de 2024 a 2050 (MM tCO ₂ e).....	27
Figura 6: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE, comparando cenário BAU e descarbonização na cadeia da petroquímica em 2050 (MM tCO ₂ e).....	29
Figura 7: Recorte adotado para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia da silvicultura.....	34
Figura 8: Emissões e remoções da cadeia da silvicultura do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO ₂ e).....	36
Figura 9: Projeção de emissões dos cenários BAU e Descarbonização para a cadeia da silvicultura, de 2024 a 2050 (MM tCO ₂ e).....	37
Figura 10: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE, comparando cenário BAU e descarbonização na cadeia da silvicultura em 2050 (MM tCO ₂ e).....	39
Figura 11: Recorte adotado para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia do arroz.....	43
Figura 12: Emissões e remoções da cadeia do arroz no Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO ₂ e).....	46
Figura 13: Projeção de emissões da cadeia do arroz no cenário BAU e Descarbonização, de 2024 a 2050 (MM tCO ₂ e).....	47
Figura 14: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE, comparando cenário BAU e Descarbonização na cadeia do arroz em 2050 (MM tCO ₂ e).....	50
Figura 15: Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia dos bovinos de corte.....	53
Figura 16: Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia dos bovinos leiteiros.....	54
Figura 17: Emissões e remoções da cadeia da pecuária do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO ₂ e).....	57
Figura 18: Projeção de emissões da cadeia da pecuária no cenário BAU e Descarbonização, de 2024 a 2050 (MM tCO ₂ e).....	58
Figura 19: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE da cadeia da pecuária, comparando cenário BAU e descarbonização, em 2050 (MM tCO ₂ e).....	60
Figura 20: Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia da soja.....	65
Figura 21: Emissões e remoções da cadeia da soja do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023.....	68
Figura 22: Projeção de emissões da cadeia da soja no cenário BAU e Descarbonização, de 2024 a 2050 (MM tCO ₂ e).....	69
Figura 23: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE da cadeia da soja, comparando cenário BAU e descarbonização, em 2050 (MM tCO ₂ e).....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Impactos das ações de mitigação na cadeia petroquímica no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO ₂ e).....	28
Tabela 2: Impactos das ações de mitigação na cadeia da silvicultura no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO ₂ e).....	38
Tabela 3: Impactos das ações de mitigação na cadeia do arroz no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO ₂ e).....	48
Tabela 4: Impactos das ações de mitigação na cadeia da pecuária no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO ₂ e).....	59
Tabela 5: Impactos das ações de mitigação na cadeia da soja no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO ₂ e).....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estratégias para a cadeia petroquímica e alinhamento com planos e programas estaduais.....	31
Quadro 2: Estratégias para cadeia da silvicultura e alinhamento com planos e programas estaduais.....	41
Quadro 3: Estratégias para a cadeia do arroz e alinhamento com planos e programas estaduais.....	51
Quadro 4: Estratégias para a cadeia da pecuária e alinhamento com planos e programas estaduais.....	62
Quadro 5: Estratégias para a cadeia da soja e alinhamento com planos e programas estaduais.....	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. METODOLOGIA.....	18
3. COLETA DE DADOS E TEIA DE STAKEHOLDERS.....	21
4. PREMISSAS E RESULTADOS POR CADEIA PRODUTIVA.....	23
4.1. PETROQUÍMICA.....	23
4.1.1. Metodologia e premissas adotadas.....	23
4.1.2. Resultados.....	25
4.1.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização.....	30
4.1.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia petroquímica.....	30
4.1.3.2. Estratégias para atingir o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais.....	30
4.2. SILVICULTURA.....	34
4.2.1. Metodologia e premissas adotadas.....	34
4.2.2. Resultados.....	35
4.2.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização.....	40
4.2.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia da silvicultura.....	40
4.2.3.2. Estratégias para atingir o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais.....	40
4.3. ARROZ.....	43
4.3.1. Metodologia e premissas adotadas.....	43
4.3.2. Resultados.....	45
4.3.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização.....	50
4.3.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia do arroz.....	50
4.3.3.2. Estratégias para o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais.....	51
4.4. PECUÁRIA.....	53
4.4.1. Metodologia e premissas adotadas.....	53
4.4.2. Resultados.....	57
4.4.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização.....	61
4.4.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia da pecuária.....	61
4.4.3.2. Estratégias para o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais.....	61
4.5. SOJA.....	65
4.5.1. Metodologia e premissas adotadas.....	65
4.5.2. Resultados.....	67
4.5.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização.....	72
4.5.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia da soja.....	72
4.5.3.2. Estratégias para o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais.....	72
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
REFERÊNCIAS.....	77



SOBRE O ICLEI

O **ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade** é uma rede global de mais de 2.500 governos locais e regionais comprometida com o desenvolvimento urbano sustentável. Ativos em mais de 130 países, influenciamos as políticas de sustentabilidade e impulsionamos a ação local para um desenvolvimento urbano sustentável de zero carbono, baseado na natureza, equitativo, resiliente e circular, promovendo mudanças sistêmicas.

Nossa Rede e equipe de especialistas trabalham juntos oferecendo acesso a conhecimento, parcerias e capacitações para gerar mudanças sistêmicas. Fundado em 1990 e com mandato para atuar como ponto focal da Constituency de Governos Locais e Autoridades Municipais (LGMA) nas COPs sobre Clima, Biodiversidade e Desertificação, o ICLEI dá voz aos governos locais em encontros internacionais e articula a implementação da cooperação internacional com os governos locais.

Com atuação na América Latina desde 1994, o ICLEI América do Sul conecta seus 157 associados

em 8 países a este movimento global, com três escritórios nacionais estabelecidos no Brasil, Colômbia e Argentina. Na região, buscamos promover as seguintes estratégias aos governos locais associados:

1. **ACESSO A INFORMAÇÕES SOBRE ACORDOS INTERNACIONAIS; VISIBILIDADE E POSICIONAMENTO NOS DEBATES INTERNACIONAIS;**
2. **OPORTUNIDADES DE INTERCÂMBIO TÉCNICO E TROCA DE EXPERIÊNCIAS; E**
3. **ACESSO ÀS METODOLOGIAS INOVADORAS DISPONÍVEIS NO PORTFÓLIO DE SOLUÇÕES.**

Dessa forma, o ICLEI América do Sul busca fortalecer a capacidade de seus membros em desenvolver e aplicar políticas públicas, contribuindo para tornar as cidades mais resilientes, sustentáveis e alinhadas aos compromissos climáticos globais.



SOBRE A ECOFINANCE NEGÓCIOS

A **Ecofinance Negócios** atua desde 2007 oferecendo assessoria especializada a empresas e governos no enfrentamento das mudanças climáticas. Seus serviços incluem a elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa, negociação de créditos de carbono, desenvolvimento de estratégias net zero, neutralização de emissões e consultoria em ESG. Ao longo de sua trajetória, a Ecofinance já negociou

mais de 15 milhões de créditos de carbono, elaborou mais de 300 inventários de emissões de GEE e prestou suporte a mais de 200 empreendimentos do setor de energia. Todas as atividades seguem as melhores práticas e metodologias reconhecidas nacional e internacionalmente, contribuindo para a descarbonização e a transição sustentável de organizações em diferentes setores econômicos.

SOBRE A WYSE CONEXÃO

A **Wyse** é uma consultoria sediada em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, especializada em governança, gestão de projetos e comunicação estratégica. Sua atuação concentra-se na articulação entre planejamento técnico, coordenação institucional e mobilização multissetorial, apoiando instituições, empresas e territórios na estruturação de iniciativas voltadas ao desenvolvimento, inovação e sustentabilidade.

No âmbito deste projeto, a Wyse atuou como parceira do ICLEI América do Sul no processo

de Conformidade Climática Completa do Estado do Rio Grande do Sul, apoiando a identificação e priorização das cadeias produtivas, a mobilização de setores econômicos e entidades representativas e a sistematização de contribuições técnicas para o Plano Local de Ação Climática. Entre os projetos desenvolvidos em parceria com o ICLEI, destacam-se também iniciativas de governança e planejamento climático conduzidas nos municípios de Canoas, São Sepé, Santiago e Salvador.

PRÓLOGO

O desafio que a emergência climática impõe aos governos do mundo inteiro requer a aplicação de todos os esforços disponíveis para mitigar as contribuições humanas na dinâmica do clima global e promover a adaptação dos territórios aos cenários futuros que estão previstos. O caso do Rio Grande do Sul constitui um exemplo concreto do desafio que se impõe ao planejamento e execução, de maneira concomitante, das ações para o enfrentamento dos impactos adversos dos eventos climáticos extremos. Por estar situado em uma das regiões mais sensíveis do Planeta, o estado tem a necessidade de agir na prática para promover a adaptação climática, olhando para o futuro com planos de ações estruturantes e estruturadas.

Ao entregar para a sociedade gaúcha a Conformidade Climática do RS e todos os estudos que a compõem, o Governo do Estado disponibiliza uma ferramenta estratégica e norteadora das ações no território para os próximos vinte e cinco anos. A Conformidade Climática organiza e sistematiza iniciativas e objetivos com metas concretas e factíveis, desenvolvidas com base em

ciência, que indicam o caminho para alcançar a mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa, a adaptação e a resiliência climática. Constitui um instrumento que orienta a maneira como o Estado deve agir para contribuir com as metas globais e reforça o compromisso comum de todas as partes, promovendo um ambiente mais equilibrado, sustentável e adaptado às necessidades das futuras gerações e do meio em que vivemos.

Com a entrega da Conformidade Climática, o Rio Grande do Sul dispõe de mais um Plano de Estado que dialoga com as ações estruturantes desenvolvidas ao longo dos últimos anos, tendo como objetivos principais a promoção do desenvolvimento socioeconômico em consonância com a necessidade imposta pelas mudanças climáticas e os efeitos adversos deste processo no território. É ao mesmo tempo o encerramento e a abertura de um ciclo que se renova com os desafios que se impõem e a necessidade permanente que a humanidade enfrenta de repensar suas ações olhando para um futuro mais sustentável e resiliente.



Marjorie Kauffmann
Secretária – Conformidade Climática RS
Governo do Estado do Rio Grande do Sul

PREFÁCIO

Apresentamos o relatório Cadeias Produtivas do Estado do Rio Grande do Sul: Roteiros para a Descarbonização, um estudo estratégico que analisa o papel das principais cadeias produtivas estaduais na trajetória de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aponta caminhos para a transição para uma economia de carbono neutro. O Rio Grande do Sul desempenha papel central na produção agropecuária, florestal e industrial do país, com elevada relevância econômica, social e territorial.

As atividades associadas a essas cadeias produtivas contribuem tanto para o desenvolvimento econômico quanto para as emissões e remoções de GEE, em função das práticas de uso e manejo do solo, dos sistemas produtivos, do consumo de energia e dos processos industriais. Diante dos compromissos climáticos globais e da crescente demanda por competitividade sustentável, torna-se fundamental avançar em estratégias de descarbonização que conciliem crescimento econômico, segurança alimentar, geração de renda e redução dos impactos climáticos.

Este estudo propõe estratégias específicas de descarbonização para cada cadeia produtiva analisada e projeta as emissões setoriais de GEE no Rio Grande do Sul entre 2024 e 2050, por meio da construção de cenários. O cenário business-as-usual evidencia os riscos associados à manutenção das práticas atuais, enquanto o cenário de descarbonização demonstra o potencial de redução de emissões a partir de ganhos de produtividade, adoção de tecnologias de baixo carbono, sistemas integrados e inovações produtivas.

Mais do que comparar trajetórias, a análise de cenários oferece subsídios para a formulação de políticas públicas e a orientação de investimentos estratégicos, indicando os vetores de descarbonização com maior impacto e viabilidade no contexto estadual. Assim, o relatório se consolida como um instrumento fundamental para apoiar a tomada de decisão e promover uma transição justa, competitiva e sustentável das cadeias produtivas do Rio Grande do Sul.



Rodrigo Perpétuo
Secretário Executivo
ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade

Capítulo 01

INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul desempenha um papel estratégico na produção agropecuária, florestal e petroquímica do Brasil, destacando-se como grande produtor de arroz, soja, carne bovina, madeira e outros derivados industriais. Assim, o Estado concentra cadeias produtivas que contribuem para o desenvolvimento econômico regional e nacional, com elevada relevância econômica e social.

As atividades associadas a essas cadeias também apresentam sua contribuição para as emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE), decorrentes das práticas de plantio e manejo de solos, dos sistemas de irrigação e pecuária, além da queima de combustíveis fósseis e de processos industriais. Nesse contexto, torna-se necessário avançar em estratégias de descarbonização que conciliem crescimento econômico, segurança alimentar, geração de renda e competitividade internacional com a redução dos impactos climáticos. A agenda global da busca pela neutralidade de carbono reforça a necessidade de que estados e setores produtivos antecipem medidas de mitigação, adotando tecnologias de baixo carbono, práticas sustentáveis de manejo e soluções inovadoras de integração produtiva.

Este estudo busca contribuir para esse esforço ao propor estratégias para descarbonização em cada cadeia produtiva e projetar as emissões setoriais de GEE no Rio Grande do Sul entre 2024 e 2050, por meio da elaboração de cenários. O cenário BAU (Business-as-Usual) reflete a manutenção das práticas atuais e evidencia os riscos de uma trajetória de emissões incompatível com os compromissos climáticos globais. Já o cenário Descarbonização incorpora ganhos de produtividade, sistemas integrados e inovações tecnológicas que demonstram o potencial

de redução de emissões e a transição para cadeias menos intensivas em GEE.

Mais do que comparar trajetórias possíveis, a elaboração de cenários permite avaliar alternativas de políticas públicas e orientar investimentos estratégicos, indicando quais vetores de descarbonização possuem maior impacto e viabilidade no contexto estadual.

Assim, os objetivos desse estudo são:

- 1. Projetar cenários de produção para os anos de 2024 a 2050, no Rio Grande do Sul.**
- 2. Propor ações de mitigação aplicáveis a cada cadeia produtiva.**
- 3. Projetar as emissões e remoções setoriais de CO₂e entre 2024 e 2050, no Rio Grande do Sul, utilizando metodologias específicas.**
- 4. Analisar cenários com projeções alternativas (BAU e Descarbonização).**
- 5. Apoiar a formulação de políticas públicas estaduais voltadas à sustentabilidade das cadeias produtivas.**

Os roteiros para a descarbonização das cadeias produtivas do estado do Rio Grande do Sul apresentados neste relatório são parte da iniciativa de Conformidade Climática do Estado. O objetivo da Conformidade Climática é realizar diagnósticos territoriais, definir metas ambiciosas e elaborar planos para o Estado do Rio Grande do Sul reduzir as emissões de GEE e adaptar-se às mudanças climáticas. Além da etapa do inventário e roteiros de descarbonização das cadeias, a iniciativa



Foto: Igor Almeida - ASCOM/SEMA

é composta por cinco etapas: Instituição da Governança; Elaboração do Inventário Estadual de Emissões GEE; a Análise de Riscos e Vulnerabilidades Climáticas (ARVC); o Plano de Ação Climática; e a Normativa Climática. O desenvolvimento dos roteiros de descarbonização das cadeias produtivas ocorreu concomitantemente ao Inventário Estadual de GEE, garantindo maior consistência e coerência metodológica.

As projeções apresentadas no estudo derivam do inventário de emissões e remoções realizado para as cadeias de produção selecionadas pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Foram analisadas cinco cadeias relevantes para o estado: o Arroz, a Pecuária Bovina (de corte e leiteira), a Petroquímica, a Silvicultura e a Soja. Esse diagnóstico inicial forneceu insumos sobre quais fontes de emissões de GEE são as mais relevantes e onde o esforço de mitigação de emissões deve ser concentrado. Apesar de permitir uma representação consistente das cadeias produtivas, o processo ainda apresentou algumas lacunas de informação, resultado da ausência de estudos anteriores dedicados a essas cadeias no Estado.

A elaboração de inventários e cenários de emissões e remoções de GEE por cadeia produtiva representa um movimento inovador no contexto da gestão climática subnacional. Essa abordagem permite identificar com maior precisão os pontos críticos de emissões ao longo de cada etapa da cadeia e os potenciais de ampliação de remoções, desde a produção de insumos até o processamento e transporte final. Isso fortalece a capacidade de planejar ações mais precisas e eficientes, e posiciona o Rio Grande do Sul como referência na construção de estratégias de descarbonização.

Ao integrar diagnóstico, projeções e alternativas de mitigação, este relatório oferece uma visão de longo prazo sobre os caminhos possíveis para a descarbonização para o estado do Rio Grande do Sul. A expectativa é que os resultados apresentados sirvam como subsídio técnico para decisões políticas, empresariais e institucionais, apoiando e fomentando o debate sobre os caminhos que podem posicionar o Rio Grande do Sul como referência em produção de baixa emissão de carbono no Brasil e no mundo.

Capítulo 02

METODOLOGIA

O desenvolvimento das projeções para as cadeias de produção selecionadas parte dos resultados obtidos da elaboração dos respectivos inventários de emissões das cadeias, do período de 2018 a 2023, produzidos na fase anterior da execução do presente projeto. A partir do levantamento quantitativo e da estrutura delimitada para sua apresentação, foi realizada a projeção para os cenários analisados, BAU e Descarbonização, seguindo a mesma lógica de segmentação das etapas da cadeia proposta no inventário. A segmentação de cada cadeia e os resultados no inventário são apresentados na seção 4.

No cenário BAU, projetou-se a manutenção da intensidade de emissões com base nos valores do inventário das cadeias, ressalvadas algumas exceções descritas individualmente. Além disso, para as etapas da cadeia que envolvem o transporte dos produtos do setor, considerou-se a implementação planejada do programa Combustível do Futuro, assumindo-se que, partindo de 15% em 2024, o uso de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂¹ fóssil no setor de transportes chegará a um valor de 20% em 2030, mantendo-se nesse patamar até 2050.

No cenário de Descarbonização, são apresentadas as medidas de maior impacto para redução das emissões de GEE nas cadeias analisadas, de modo que possibilite indicar quais ações podem ser mais importantes ou impactantes para guiar formuladores de políticas públicas e tomadores de decisão. A definição de medidas de descarbonização

baseou-se, principalmente, em ações e planos já em andamento e promovidos pelo Governo do Estado e instituições privadas.

Dentre os planos que nortearam este trabalho, cita-se: PROCLIMA2050, Plano ABC+RS, Operação Terra Forte, Programa de Irrigação, Programa Hidrogênio Verde, Programa Biogás-RS, Pró-Etanol; Incentivos para Fotovoltaica, Programa Estadual de Recuperação da Vegetação Nativa do Rio Grande do Sul (PROVEG/RS), Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais (PEPSA) e Programa Agricultura de Precisão. Especificamente para o transporte, projetou-se que, após 2030, continuaria havendo um aumento da penetração de fontes energéticas sem emissão direta de CO₂ fóssil nos modais de transporte, alcançando 100% em 2050. Essa premissa foi utilizada para todas as cadeias produtivas. Foram também sugeridas medidas de descarbonização baseadas em literatura nacional e internacional, além da experiência técnica da equipe de consultores em planos de descarbonização anteriormente desenvolvidos.

Para a realização das projeções, as capacidades e necessidades de expansão econômica de cada cadeia produtiva no estado do Rio Grande do Sul para o período. Para isso, considerou-se, em primeiro lugar, projeções setoriais, sempre que disponíveis, obtidas por meio de interações com organizações representativas dos respectivos setores. Na ausência de informações, utilizaram-se vetores de projeções provenientes de estudos específicos que utilizaram o modelo BLUES² (*Brazilian Land Use and Energy*

Systems Model) para determinar a expansão da produção em diversos setores econômicos no Brasil (Angelkorte, 2023; CEBRI; BID; EPE; CENERGIA, 2023).

Optou-se pela utilização desse tipo de modelo pelo fato de ele ter suas premissas apoiadas nos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (do inglês, SSP – *Shared Socioeconomic Pathways*)³ que são utilizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) para a realização de cenários de projeção climática. Com isso, este trabalho se baseia no cenário definido no IPCC como “Meio de Caminho” ou SSP2, que não considera grandes mudanças estruturais na economia dos países como um todo, e facilita a comparabilidade com outros trabalhos dessa natureza.

O nível de produção considerado nos cenários projetados de cada cadeia produtiva, BAU e Descarbonização, foi o mesmo. Contudo, no cenário de Descarbonização, em determinadas cadeias, há a expectativa de uma maior produtividade que impacta a intensidade de emissões.

Embora o estudo tenha buscado garantir consistência metodológica e coerência com as principais referências nacionais e internacionais em projeções de descarbonização, é importante reconhecer algumas limitações inerentes à metodologia empregada. Destaca-se que as projeções apresentadas devem ser interpretadas como tendências indicativas, e não como previsões determinísticas, uma vez que se baseiam em

hipóteses médias de crescimento econômico, evolução tecnológica e adoção de práticas sustentáveis nas cadeias econômicas incluídas no escopo da análise.

Grande parte das informações utilizadas para as projeções de crescimento deriva de bases de dados secundárias e de estudos anteriores, como Angelkorte (2023) e o Programa de Transição Energética (CEBRI; BID; EPE; CENERGIA, 2023), posteriormente ajustadas ao contexto do Rio Grande do Sul. Essa adaptação, ainda que metodologicamente criteriosa, pode introduzir margens de erro associadas às especificidades regionais de produtividade e intensidade de emissões.

A ausência de séries históricas completas e homogêneas em nível estadual também limita a calibração de alguns parâmetros, especialmente nas cadeias com menor disponibilidade de informações locais. Ainda nesse aspecto, a definição de premissas e parâmetros dependeu, em parte, de julgamento técnico especializado, ancorado em evidências bibliográficas e experiências prévias de modelagem. Essa característica introduz certo grau de subjetividade, sobretudo em relação ao ritmo de adoção tecnológica e à efetividade de políticas públicas de mitigação, os quais podem divergir em contextos reais de implementação.

Outra limitação refere-se à ausência de espacialização das projeções, o que é particularmente relevante para as cadeias associadas aos



Foto: Governo do Estado do Rio Grande do Sul

3. Os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados, desenvolvidos no âmbito do IPCC, estabelecem níveis de expansão de população, produção e trocas internacionais que orientam análises e projeções climáticas de longo prazo.

1. Dentre as possibilidades, inclui-se tanto a eletricidade, quanto biocombustíveis (seja etanol, ou a gasolina, diesel, querosene e bunker verdes) e hidrogênio.
2. O BLUES é um modelo de análise integrada desenvolvido pelo Cenergia/Coppe/UFRJ. O modelo simula como os setores econômicos do Brasil podem evoluir até 2060, mostrando diferentes cenários de desenvolvimento e emissões de gases de efeito estufa, com foco em energia e uso do solo. Ele considera a necessidade de atendimento das demandas setoriais projetadas para diferentes cenários de longo prazo sujeitos a orçamentos de carbono.

setores da agropecuária. A metodologia adotada não permite identificar áreas específicas de mudança de uso da terra, variação de estoques de carbono no solo ou interações com zonas de vulnerabilidade ambiental, uma vez que não foi realizada uma análise georreferenciada das emissões. A incorporação dessa dimensão exigiria uma abordagem mais complexa e intensiva em dados geoespaciais, extrapolando o escopo do relatório.

Ainda, as projeções baseiam-se nas estimativas realizadas pelo inventário de emissões, o qual possui algumas limitações em razão da falta de dados de algumas etapas das cadeias, elencados neste relatório. Além disso, a escolha por não incorporar anos em que existiram impactos climáticos significativos, afetando o padrão de emissões, pode ser visto como uma possível fragilidade das projeções, uma vez que eventos extremos podem afetar a cadeia em outros anos até 2050.

Ademais, as análises priorizaram a dinâmica das emissões de GEE e da intensidade de carbono das cadeias produtivas, sem abranger de forma quantitativa aspectos relevantes a uma análise robusta da sustentabilidade das trajetórias de descarbonização, como a geração local de emprego e renda ou os impactos sobre a biodiversidade e o uso da água.

Por fim, o modelo adotado possui caráter setorial e tecnológico, sem integração macroeconômica ou

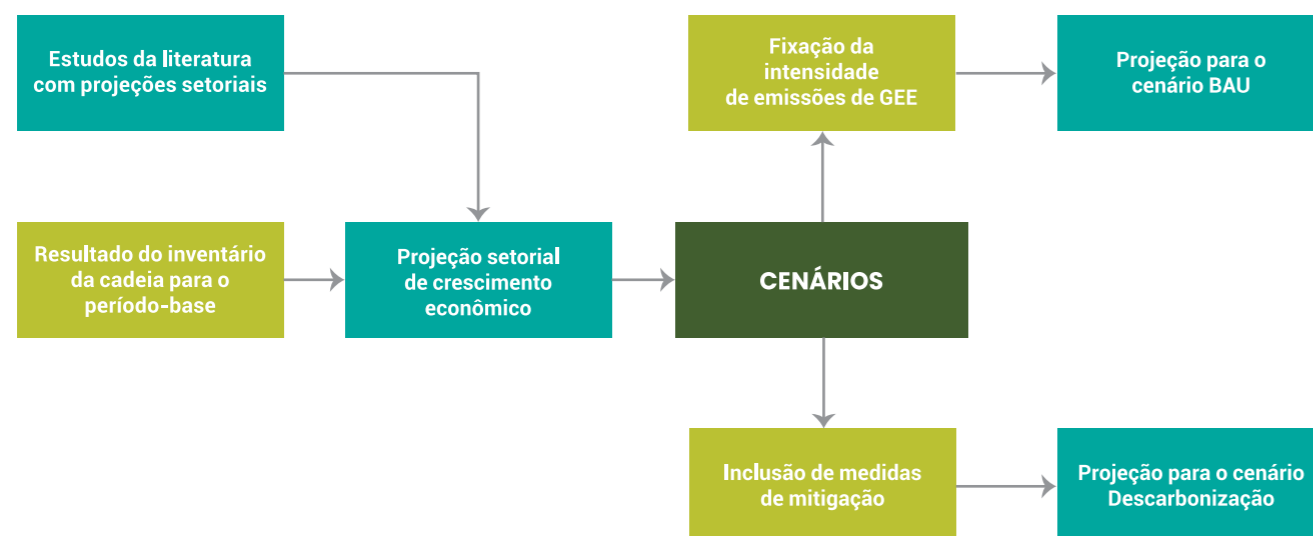
representação de retroalimentações entre setores. Assim, efeitos de segunda ordem da descarbonização de uma cadeia sobre as demais não puderam ser quantitativamente avaliados. Isso inclui, por exemplo, a competição por insumos críticos entre diferentes cadeias (como biomassa ou hidrogênio de fontes renováveis), a compensação intersetorial de emissões de difícil abatimento e possíveis vazamentos de carbono para outros setores dentro ou fora do estado.

O horizonte temporal de 2050, embora coerente com as metas de neutralidade climática, também implica incertezas associadas à linearidade das projeções e à suposição de continuidade das tendências observadas. Tais limitações, entretanto, não comprometem o valor analítico do estudo, que se propõe a oferecer uma visão estruturada e comparável das trajetórias possíveis de descarbonização das cadeias produtivas selecionadas do Rio Grande do Sul. Por outro lado, apresentam-se como possíveis espaços para aperfeiçoamento dos resultados em estudos futuros.

A Figura 1, na sequência, ilustra o procedimento metodológico geral de maneira esquemática, em forma de um fluxograma.

Na sequência, as projeções setoriais para ambos os cenários de cada cadeia são detalhadas de forma específica.

Figura 1: Fluxograma metodológico para as projeções setoriais das cadeias produtivas.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Capítulo 03

COLETA DE DADOS E TEIA DE STAKEHOLDERS



Foto: Governo do Estado do Rio Grande do Sul

A coleta dos dados necessários aos cálculos das projeções de emissões e remoções das cadeias produtivas ocorreu entre janeiro/2025 e agosto/2025. Tendo como ponto focal a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA-RS), foram enviados ofícios para os mesmos atores que participaram da elaboração do inventário de emissões e remoções das cadeias produtivas. Ocorreram reuniões de trabalho com as secretarias de governo, entidades e associações setoriais representativas voltadas ao alinhamento metodológico e à validação das informações utilizadas nas projeções.

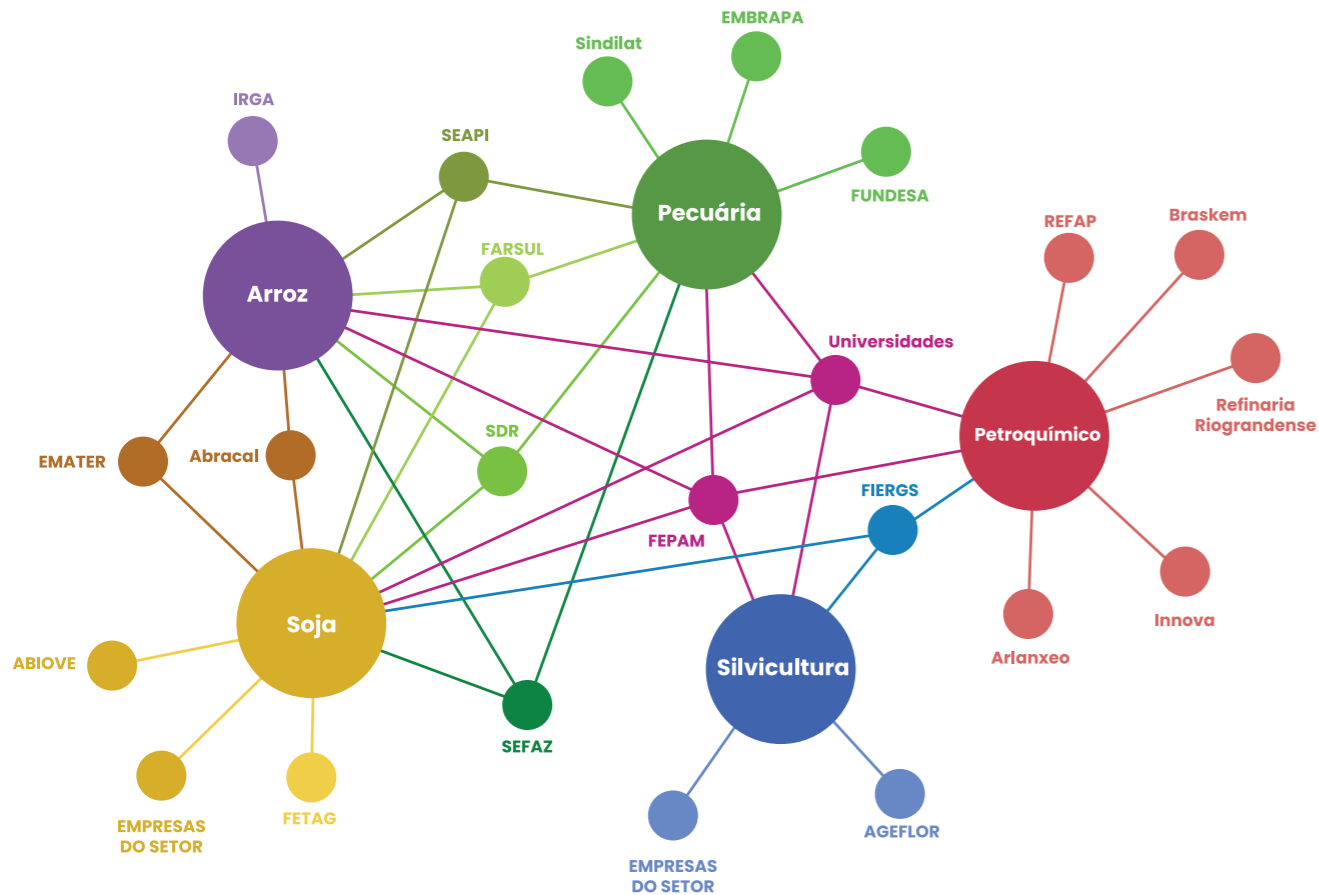
As projeções baseiam-se no inventário de emissões e remoções das cadeias produtivas, desenvolvidos a partir de dados primários (coletados diretamente junto às secretarias, instituições/associações representativas do setor e/ou empresa atuante na cadeia), secundários (obtidos a partir de

relatórios e/ou informações de fontes reconhecidas) e estimados (a partir de referências setoriais, regionais, nacionais ou internacionais).

Para as projeções, além dos planos estaduais alinhados com a descarbonização dos setores analisados, foram consideradas as ações já desenvolvidas pelo setor privado nesta frente. Foram também propostas ações com base em literatura e na experiência da equipe de consultoria. Os cenários e medidas de mitigação foram validados com os setores envolvidos em reuniões para a apresentação de resultados.

A elaboração do inventário e das projeções envolveram uma teia de stakeholders para aproximar o máximo possível as emissões calculadas com a realidade local. A Figura 2 apresenta as instituições que de alguma forma participaram e contribuíram com o processo de coleta de dados.

Figura 2: Teia de stakeholders que contribuíram com a coleta de dados do mapeamento das emissões e remoções das cadeias produtivas



Fonte: Elaboração própria, 2025.



Foto: Governo do Estado do Rio Grande do Sul

Capítulo 04

PREMISSAS E RESULTADOS POR CADEIA PRODUTIVA

4.1. PETROQUÍMICA

4.1.1. Metodologia e premissas adotadas

Para o desenvolvimento das projeções para o setor da petroquímica, os cenários analisados, BAU e Descarbonização, foram segregados nas mesmas categorias do inventário realizado para o período de 2018 a 2023:

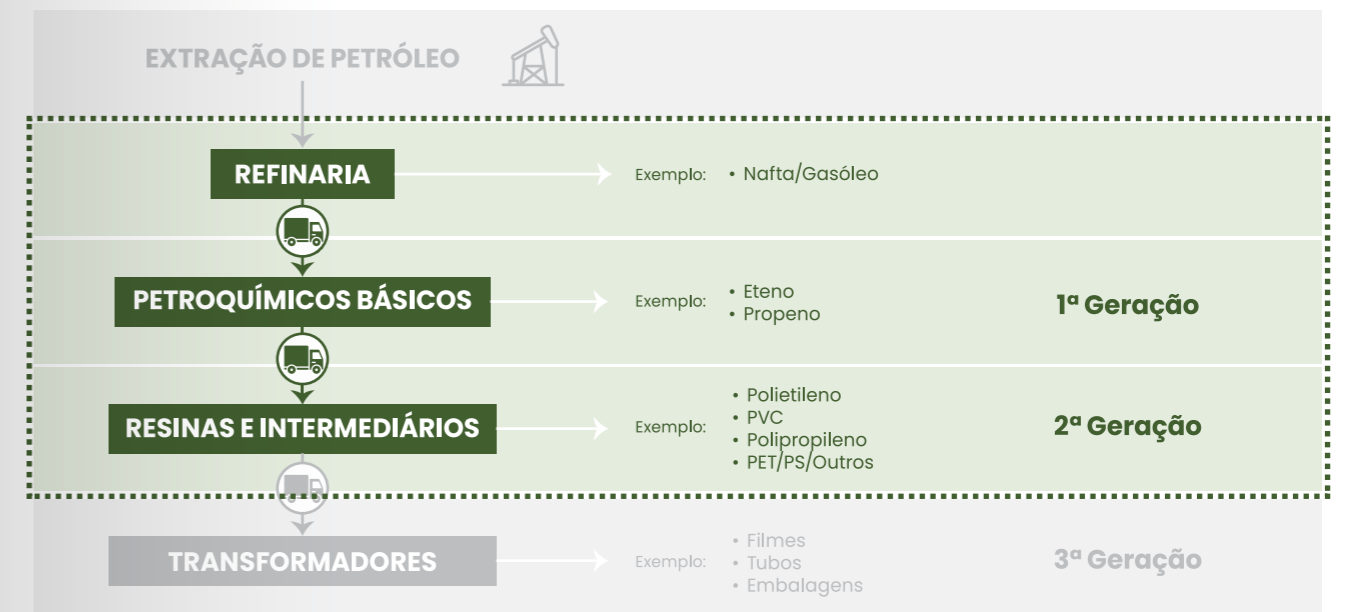
1. Refino de petróleo;
2. Transporte da refinaria até o Polo Petroquímico de Triunfo;
3. Indústria de 1ª geração; e
4. Indústria de 2ª geração.

Na Figura 3, apresenta-se o recorte utilizado para o inventário da cadeia petroquímica, sendo este

o mesmo recorte para a projeção das emissões e remoções desta cadeia até 2050.

A partir da divisão supracitada, verificaram-se as capacidades e necessidades de expansão da indústria petroquímica no estado do Rio Grande do Sul entre 2024 e 2050. Para isso, foram utilizadas projeções já existentes da taxa média nacional do crescimento desse setor, elaborados com base em modelos integrados (Pernambuco, 2022; Minas Gerais, 2022). Foram consideradas as taxas das indústrias de 1ª e 2ª geração, por serem estas as principais fontes de emissão deste setor. Como premissa, as emissões do refino de petróleo e do transporte da refinaria crescem a partir da taxa de crescimento médio das indústrias de primeira e segunda geração.

Figura 3: Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia petroquímica



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Cenário BAU

A projeção da produção petroquímica no Rio Grande do Sul teve como insumo inicial a projeção de crescimento das categorias mais representativas em emissões para a cadeia petroquímica, conforme o inventário estadual, nomeadamente as indústrias de 1ª e 2ª geração. Para estas, respectivamente, foram consideradas taxas de crescimento de 1,4% e 1,0%, com base nos modelos integrados citados anteriormente. Com isso, tomou-se como referência a emissão média de 2018 a 2022 para a projeção dos anos subsequentes, até 2050. O ano de 2023 foi desconsiderado por ter sido um ano de produção atípica para o setor, apresentando os níveis mais baixos de utilização da capacidade instalada da indústria química da série histórica, desde 1990, com apenas 64% de utilização (Rio Grande do Sul, 2025a).

Cenário Descarbonização

Para o cenário Descarbonização, mantiveram-se os níveis de produção petroquímica no estado projetados no cenário BAU. Porém, foram incluídas uma série de medidas de mitigação de emissões de GEE, listadas na sequência:

- **Aumento da produção de biopolímeros⁴ no estado para 1 milhão de toneladas até 2030, com incremento de 30% a cada 10 anos após este período;**

A ação estabelecida está alinhada com a meta definida pela Braskem de produção de um milhão de toneladas de biopolímeros por ano até 2030 (Braskem, 2023). A produção de biopolímeros promove remoções de GEE da atmosfera, pois utiliza biomassa renovável que captura CO₂ durante seu crescimento. O CO₂ estocado nos materiais plásticos produzidos, de origem biogênica permanece incorporado ao produto durante seu tempo de vida útil, contribuindo para a redução líquida das emissões. A Braskem estima que a cada 1 tonelada de biopolímero produzido, são removidos 2,1 tCO₂e

da atmosfera, parâmetro que foi utilizado para os cálculos (Braskem, 2025a).

- **Eficientização energética e operacional de plantas existentes e novas de refino de petróleo, alcançando 10% de aumento de eficiência até 2050;**

As ações para melhoria da eficiência incluem: modernização e controle de queima em fornos e caldeiras, sistemas de recuperação de energia, sistemas de automação, balanço termoelétrico, sistemas de controle de processo, esforços de otimização de cargas, gestão da produção e uso do hidrogênio, modernização dos sistemas de *flare*, dentre outros (EPE, 2024; IBP, 2022).

- **Implantação de captura e armazenamento de CO₂ nas refinarias, nas unidades de craqueamento catalítico fluido (FCC) e de geração de hidrogênio (UGH);**

A captura de carbono diretamente de processos que ocorrem nas refinarias de petróleo previne que o CO₂ gerado seja lançado na atmosfera. No caso das refinarias, esta captura pode ocorrer nas unidades de craqueamento catalítico fluido (FCC) e de geração de hidrogênio (UGH) (EPE, 2024). Estas emissões não são solucionadas por ações de eficiência energética ou por substituições por fontes de baixo carbono, por isso, a captura de carbono pode ser uma solução para estas fontes de difícil abatimento.

- **Transporte sem emissão direta de CO₂ fóssil da refinaria até as indústrias de 1ª geração, alcançando 95% de redução de emissões de GEE em 2050;**

Utilização de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissão direta de CO₂ fóssil para o transporte, com implementação linear a partir de 2035.

- **Eficientização energética e operacional de plantas existentes e novas da petroquímica de 1ª geração, chegando a 10% do aumento de eficiência em 2050;**

Esta ação está alinhada com as metas da Braskem de evolução da eficiência energética da empresa (Braskem, 2025b).

- **Compra de eletricidade renovável em plantas da petroquímica de 1ª geração, alcançando 100% em 2050;**

A compra da eletricidade renovável mitiga as emissões indiretas decorrentes da compra de eletricidade realizada pelas empresas de 1ª geração.

- **Implantação de captura e armazenamento de CO₂ em plantas petroquímicas de 1ª geração a partir de 2035, com a captura de até 90% do CO₂ emitido passível de captura até 2050;**

Semelhante ao refino, em razão destas serem fontes de emissão de difícil abatimento, a captura para posterior armazenamento do CO₂ passa a ser uma solução necessária para a redução de emissões.

- **Eletrificação de processos da indústria petroquímica de 2ª geração, alcançando a redução de 30% das emissões diretas até 2050;**

A combinação da eletrificação com a compra de energia de fontes renováveis possibilita que as emissões, antes diretas, sejam efetivamente eliminadas, uma vez que a eletricidade utilizada não gera emissões de GEE ao longo do processo produtivo.

- **Compra de eletricidade renovável em plantas da petroquímica de 2ª geração, alcançando 100% em 2050.**

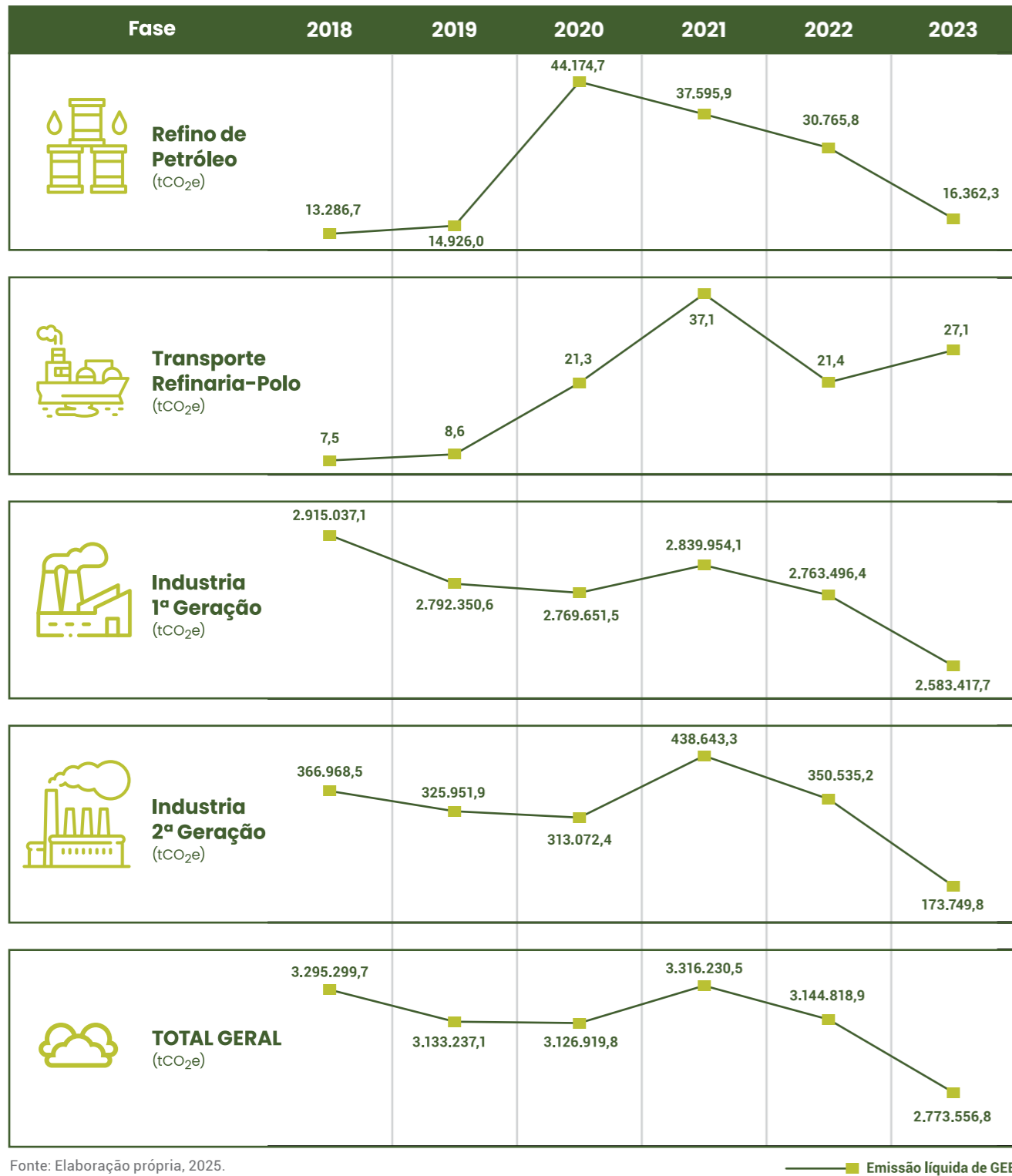
A compra dessa eletricidade renovável mitiga as emissões indiretas decorrentes da compra de eletricidade realizada pelas empresas de 2ª geração.

4.1.2. Resultados

Considerando o recorte realizado pelo inventário de emissões e remoções da cadeia petroquímica do estado do Rio Grande do Sul, a produção petroquímica do estado apresenta um perfil de emissões fortemente concentrado nas indústrias de 1ª e 2ª geração, que juntas responderam por quase 99% das emissões totais em todos os anos do inventário do período analisado (2018 a 2023). A indústria de primeira geração, por si só, representou em torno de 85% a 93% das emissões anuais do setor, com valores que variaram de 2,9 MM tCO₂e em 2018 para 2,6 MM tCO₂e em 2023. A segunda geração complementa esse quadro, oscilando entre 11% e 6% do total no período, enquanto o refino de petróleo para a produção dos insumos para esta indústria contribuiu com uma parcela menor das emissões totais (0,4% a 1,4%), ainda que em alguns anos tenha apresentado variações mais expressivas, como em 2020. As emissões relativas ao transporte associado ao refino, por sua vez, mantiveram-se residuais em todo o horizonte histórico. Em síntese, o setor petroquímico gaúcho evidencia uma forte dominância das indústrias de 1ª geração, sendo este o principal núcleo emissor da cadeia. Para um resumo das emissões desta cadeia, entre os anos de 2018 a 2023, ver Figura 4.

4. Biopolímeros são compostos produzidos a partir de material biodegradável, para a fabricação de plásticos recicláveis feitos com matéria prima 100% reciclável (Braskem, 2025c)

Figura 4: Emissões da cadeia petroquímica do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO₂e)

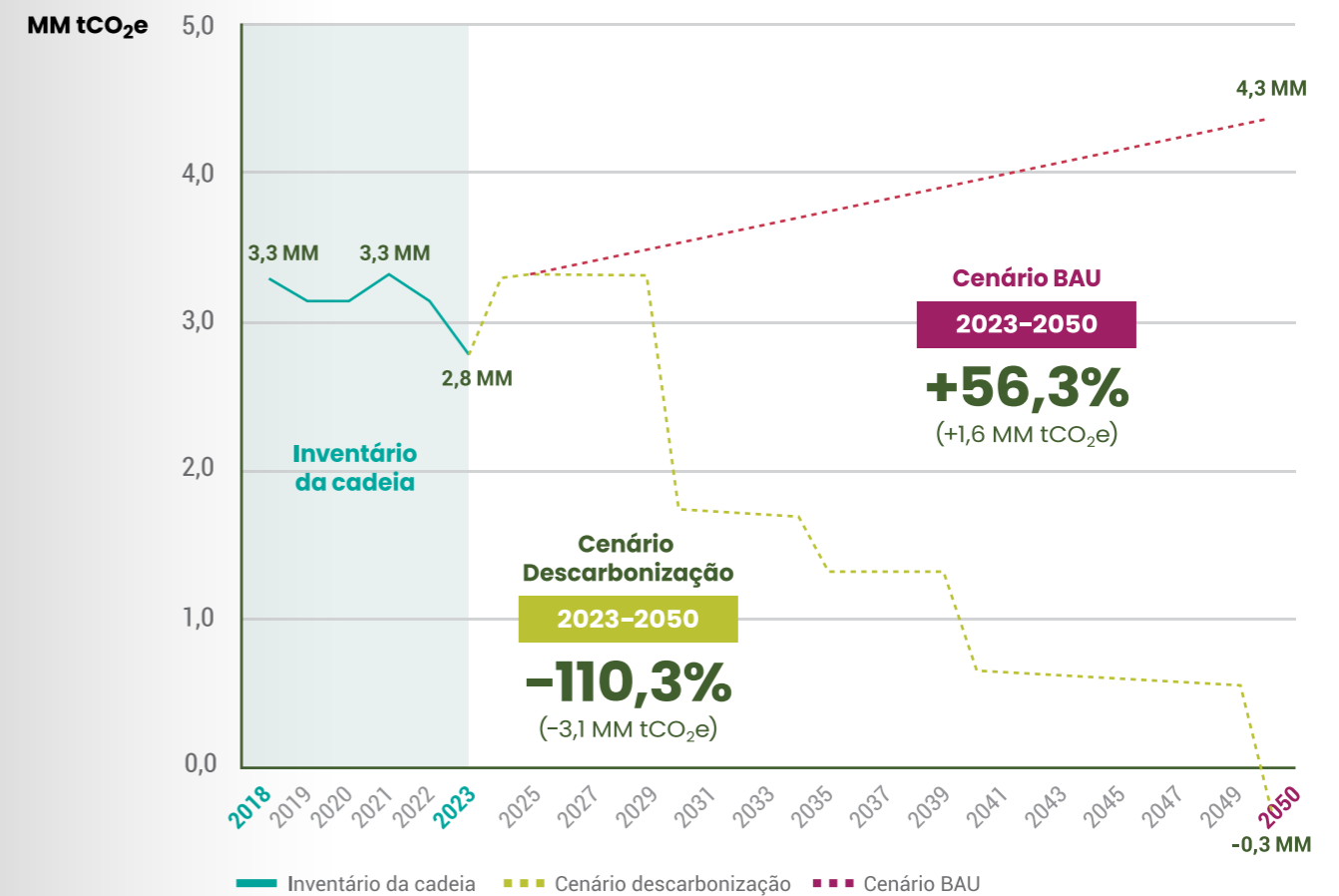


No cenário BAU, as emissões do setor petroquímico no Rio Grande do Sul mantêm trajetória crescente ao longo de todo o horizonte de análise, de 2024 a 2050, conforme a Figura 5. A indústria de 1ª geração continua sendo o principal polo emissor, respondendo por cerca de 90% das emissões totais do setor, com valores que se expandem gradualmente de 2,6 MM tCO₂e, em 2023, para mais de 3,8 MM tCO₂e em 2050. A indústria de segunda geração mantém participação próxima de 10%, crescendo de 0,17 MM tCO₂e para 0,45 MM tCO₂e no mesmo período, enquanto o refino de petróleo e seu transporte associado permanecem quase como emissores residuais. Como resultado, as emissões do setor aumentaram de 2,8 MM tCO₂e em 2023 para aproximadamente 4,3 MM tCO₂e em 2050, um acréscimo de cerca de 56,3% das emissões em um cenário sem considerar medidas de mitigação.

No cenário Descarbonização, a trajetória de emissões do setor começa a divergir de maneira significativa a partir de 2030. As emissões da cadeia petroquímica caem de cerca de 2,8 MM tCO₂e em 2023 para emissões líquidas negativas em 2050 (-0,28 MM tCO₂e). Uma redução de 110,3% em relação ao cenário BAU.

A indústria de 1ª geração, responsável pela maior parte das emissões históricas apresentadas no inventário, reduz seu total de 2,6 MM tCO₂e para aproximadamente -0,38 MM tCO₂e, enquanto a 2ª geração passa de 0,17 MM tCO₂e para menos de 0,07 MM tCO₂e no mesmo período. As emissões associadas ao refino e ao transporte se mantêm marginais, sendo quase nulas em 2050. As projeções das emissões dos cenários BAU e Descarbonização são apresentadas na Figura 5.

Figura 5: Projeção de emissões dos cenários BAU e Descarbonização da cadeia petroquímica, de 2024 a 2050 (MM tCO₂e)



O impacto de cada uma das ações propostas é apresentado na Tabela 1 para os anos 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050, com os resultados comparativos do cenário BAU com o cenário de Descarbonização.

Tabela 1: Impactos das ações de mitigação na cadeia petroquímica no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO₂e)

Ação de mitigação	2025		2030		2035	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Produção de Biopolímeros	0	0,0%	-1.554.000	87,0%	-1.554.000	65,1%
Implementação de CCS	0	0,0%	0	0,0%	-368.741	15,4%
Compra de eletricidade renovável	0	0,0%	-63.187	3,5%	-134.624	5,6%
Eficientização das plantas industriais	0	0,0%	-169.077	9,5%	-330.482	13,8%
Descarbonização do transporte	0	0,0%	-15	0,0%	-20	0,0%
Total (Descarbonização - BAU)	0	0,0%	-1.786.280	100%	-2.387.868	100%

Ação de mitigação	2040		2045		2050	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Produção de Biopolímeros	-2.184.000	66,7%	-2.184.000	61,8%	-3.003.000	65,0%
Implementação de CCS	-523.394	16,0%	-678.048	19,2%	-832.701	18,0%
Compra de eletricidade renovável	-214.877	6,6%	-304.208	8,6%	-395.694	8,6%
Eficientização das plantas industriais	-349.675	10,7%	-368.867	10,4%	-388.060	8,4%
Descarbonização do transporte	-29	0,0%	-32	0,0%	-38	0,0%
Total (Descarbonização - BAU)	-3.271.975	100%	-3.535.155	100%	-4.619.492	100%

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A representatividade de cada uma das ações propostas é apresentada a seguir. Compara-se o resultado do cenário BAU, em 2050, com o resultado do cenário Descarbonização.

1. Produção de Biopolímeros: A principal medida de mitigação ocorre com a ampliação da produção de biopolímeros, que gera redução direta nas emissões da indústria de 1ª geração. O incremento na produção de plásticos de origem biogênica permite contabilizar a estocagem de carbono nos materiais finais, convertendo parte

das emissões brutas em sumidouros de carbono. Essa produção reduz em cerca de 3 MM tCO₂e as emissões e possibilita ao setor se tornar um sumidouro de emissões de CO₂e.

2. Implementação de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS): Outra medida de destaque é a captura e armazenamento de carbono em unidades das refinarias e plantas petroquímicas. A tecnologia responde por uma redução de aproximadamente 21% nas emissões de escopo 1, principalmente no craqueamento catalítico e

na produção de hidrogênio nas refinarias. Essa estratégia representa um abatimento adicional de cerca de 0,83 MM tCO₂e para o setor petroquímico.

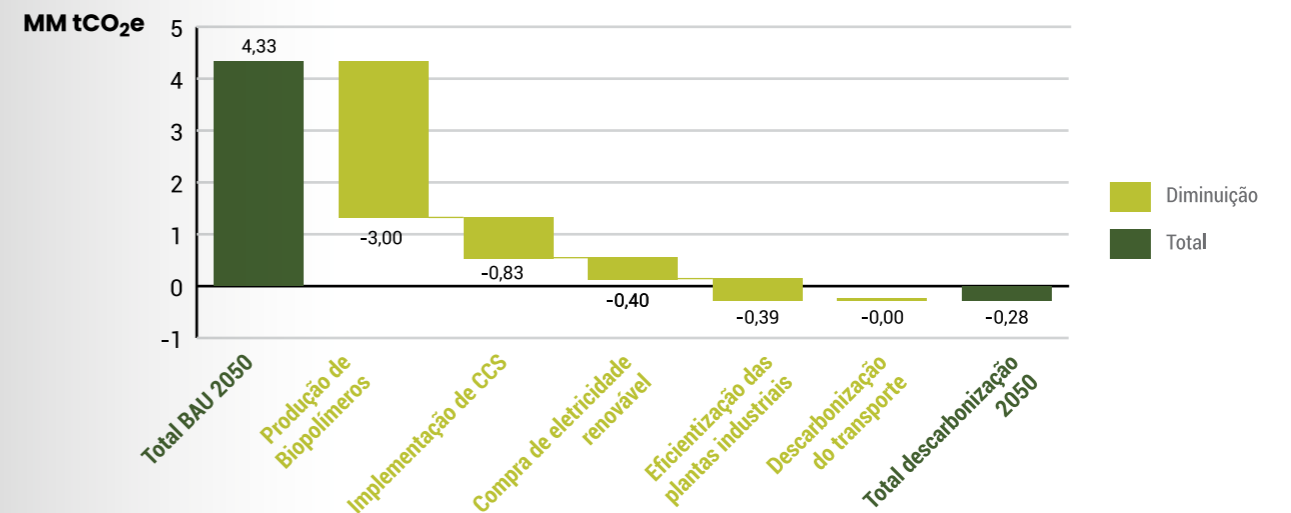
- 3. Compra de energia renovável:** A substituição integral da eletricidade adquirida por fontes renováveis até 2050 é responsável por eliminar as emissões de escopo 2, tanto na 1ª quanto na 2ª geração. Essa mudança resulta em uma redução próxima de 0,40 MM tCO₂e e garante que a eletrificação de processos industriais não seja acompanhada por emissões indiretas da matriz de geração elétrica.
- 4. Eficientização das plantas industriais:** A adoção de medidas de eficiência em plantas existentes e novas, tanto no refino quanto na petroquímica de 1ª geração, promove ganhos no longo prazo. Ao atingir o aumento de eficiência até 2050, o setor reduz em torno de 0,39 MM tCO₂e suas emissões, diminuindo a intensidade energética do processo produtivo e, conseqüentemente, as suas emissões de GEE.
- 5. Descarbonização do transporte:** As emissões de transporte contabilizadas no inventário de GEE, dentro das etapas consideradas, apresentaram

baixa representatividade. Conseqüentemente, a redução obtida também é limitada, somando apenas 38 toneladas de CO₂e.

Para um resumo e visualização dos impactos das ações que possibilitam a diferença entre o cenário BAU e descarbonização, ver Figura 6.

Em conjunto, essas medidas reduzem as emissões da petroquímica de 4,3 MM tCO₂e no cenário BAU para -0,3 MM tCO₂e em 2050 no cenário Descarbonização. Isso ocorre a partir de grandes mudanças estruturais, seja pelo aumento expressivo da produção de biopolímeros, como pela implementação de medidas ainda em desenvolvimento, como a captura e o armazenamento de carbono. Além disso, tornam-se necessárias medidas complementares, como as de eficiência, eletrificação e compra de energia renovável. No cenário Descarbonização, a petroquímica gaúcha deixa de ser um setor de emissões crescentes para se posicionar como um setor de emissões líquidas negativas, possibilitando a compensação de emissões de outros setores de mais difícil descarbonização.

Figura 6: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE, comparando cenário BAU e descarbonização na cadeia da petroquímica em 2050 (MM tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.1.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização

4.1.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia petroquímica

A melhoria da coleta de dados para a elaboração do inventário das cadeias é fundamental para aumentar a precisão das estimativas de emissões e remoções, permitir comparações consistentes entre períodos, medir o impacto das ações de descarbonização implementadas e subsidiar a definição de estratégias de mitigação mais eficazes. Para o setor petroquímico as seguintes medidas são propostas:

- Para a nafta e o propeno fornecidos pela REFAP, recomenda-se refinar a metodologia de alocação, obtendo dados específicos de nafta e propeno da REFAP enviados ao Polo Petroquímico de Triunfo.
- Para a nafta e o propeno adquiridos pelo Polo, mas produzidos fora do estado, sugere-se o desenvolvimento de estimativas específicas ou a obtenção de informações junto às unidades produtoras externas ou às unidades consumidoras.
- Recomenda-se que todas as indústrias de 2ª geração sejam engajadas de forma sistemática, garantindo a disponibilização de informações para o inventário.
- Sugere-se que os Órgãos Ambientais Locais passem a solicitar inventários de emissões às empresas do setor, incluindo também as indústrias de 3ª geração consideradas relevantes.

- Recomenda-se viabilizar o acesso a dados de produção do setor, de modo a permitir análises de intensidade de emissões (emissões por unidade de produção).

4.1.3.2. Estratégias para atingir o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais

A implementação do cenário descarbonização da cadeia petroquímica enfrenta desafios de ordem técnica, econômica e regulatória. Além disso, existem alguns desafios específicos para cada meta estabelecida. Com relação à expansão da produção de biopolímeros, cita-se a dependência da disponibilidade sustentável de biomassa e da competitividade frente aos polímeros fósseis. Já a adoção de tecnologias de CCS requer altos investimentos, infraestrutura adequada, marcos regulatórios claros e aceitação pública. Por sua vez, as medidas de eficiência energética e eletrificação demandam investimentos em modernização de plantas industriais e estabilidade no suprimento de energia renovável. Para a descarbonização do transporte, é necessário o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis em escala comercial e infraestrutura logística compatível.

A integração dessas ações ao longo de toda a cadeia produtiva requer o fortalecimento de políticas públicas de apoio e financiamento à descarbonização. Nesse contexto, as estratégias apresentadas no Quadro 1 configuram recomendações ao governo do Estado. Além disso, são indicados os planos e programas estaduais já existentes que se relacionam a essas estratégias e convergem para a construção de uma economia de baixo carbono.

Quadro 1: Estratégias para a cadeia petroquímica e alinhamento com planos e programas estaduais

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Aumento da produção de biopolímeros no Estado para 1 milhão de toneladas até 2030, com incremento de 30% a cada 10 anos após este período	<ul style="list-style-type: none"> • Incentivar a instalação e modernização de plantas industriais para produção de biopolímeros por meio de linhas de financiamento específicas, incentivos fiscais e apoio à inovação tecnológica; • Estimular parcerias entre universidades, centros de pesquisa e empresas para desenvolvimento de processos mais eficientes e de novos produtos derivados, como polímeros verdes e bioplásticos; • Implementar políticas de compras públicas que priorizem produtos de origem renovável e recicláveis, fortalecendo a demanda de mercado; • Promover a criação de polos industriais voltados à química verde no estado, com infraestrutura logística e energética adequada. 	Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável
Eficientização energética e operacional de plantas existentes e novas de refino de petróleo e petroquímicas de 1ª geração, alcançando 10% de aumento de eficiência até 2050	<ul style="list-style-type: none"> • Criar, avaliar e expandir programas voltados a inovações produtivas que promovam maior eficiência energética na indústria petroquímica; • Fomentar a cooperação entre instituições de pesquisa e a iniciativa privada para o desenvolvimento de processos operacionais mais eficientes; • Estimular a adoção de procedimentos industriais e soluções energéticas mais limpas e eficazes entre os atores do setor petroquímico; • Estabelecer regulamentações para monitorar e reduzir as emissões industriais relativas à energia; • Promover incentivos para a geração de empregos verdes, com mão de obra qualificada para conduzir operações inovadoras nas refinarias. 	Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Implantação de captura e armazenamento de CO₂ nas refinarias, nas unidades de craqueamento catalítico fluido (FCC) e de geração de hidrogênio (UGH), e nas plantas petroquímicas de 1ª geração	<ul style="list-style-type: none"> Fornecer incentivos para adoção de sistemas de captura e armazenamento de CO₂ pelas refinarias e indústrias petroquímicas; Desenvolver projetos-piloto de captura, utilização e armazenamento de carbono no setor de refino e petroquímico no Estado; Promover incentivos para adoção de tecnologias avançadas de descarbonização industrial; Conceder incentivos fiscais, criar linhas de crédito e implementar políticas públicas para o desenvolvimento da cadeia de hidrogênio de baixo carbono no estado, associado ao CCS; Promover programas de capacitação para a atuação de trabalhadores com as novas tecnologias de descarbonização nas refinarias e indústria petroquímica, incluindo captura de carbono; Promover e/ou incentivar mapeamento das formações geológicas com capacidade para armazenamento de CO₂ ou possíveis rotas de uso do gás. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta Programa H2V-RS</p>
Descarbonização do transporte, alcançando 95% de redução de emissões de GEE em 2050	<ul style="list-style-type: none"> Promover e incentivar projetos de infraestrutura logística sustentável nos modais rodoviário, ferroviário, aquaviário, e outros, reduzindo emissões no transporte; Conceder incentivos fiscais, linhas de crédito e apoio à capacitação de trabalhadores do setor logístico; Investir na modernização da infraestrutura portuária; Promover o diálogo e a cooperação entre os diferentes atores nacionais e internacionais para auxiliar na viabilização e no desenvolvimento de combustíveis renováveis e eletrificação da frota; Implementar as medidas/projetos definidas no Plano Estadual de Logística de Transportes; Implementar políticas públicas para o desenvolvimento da cadeia de hidrogênio de baixo carbono no Estado, viabilizando a produção, a transmissão, a armazenagem e o uso, direto ou como matéria-prima; Promover e incentivar a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação no setor de transportes. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p> <p>Programa H2V-RS</p> <p>Pró-Etanol</p> <p>Programa Biogás-RS</p> <p>Incentivos para fotovoltaica</p>

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Compra de eletricidade renovável em plantas da petroquímica de 1ª e 2ª geração, alcançando 100% em 2050	<ul style="list-style-type: none"> Alinhar políticas públicas de energia, planos de desenvolvimento econômico e políticas de inovação do estado; Aplicar um plano estadual unificado de Transição Energética e Descarbonização; Estabelecer uma estratégia integrada que alinhe os incentivos públicos às energias renováveis considerando especificidades regionais, ganhos de escala e o desenvolvimento estratégico do estado; Definir metas intermediárias de substituição da eletricidade convencional por fontes renováveis nas plantas petroquímicas; Criar linhas de financiamento e incentivos fiscais para empresas do setor petroquímico que priorizem o uso de eletricidade renovável; Implementar mecanismos de monitoramento e reporte anuais para acompanhar a evolução da participação das energias renováveis no setor. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Eletrificação de processos da indústria petroquímica de 2ª geração, alcançando a redução de 30% das emissões diretas até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar a eletrificação nas plantas industriais por meio de programas, linhas de financiamento específicas, incentivos fiscais, incentivos regulatórios e apoio à inovação tecnológica; Estimular parcerias entre universidades, centros de pesquisa e empresas focadas em eletrificação industrial; Promover a substituição gradual de equipamentos e sistemas movidos a combustíveis fósseis por tecnologias elétricas de alta eficiência; Integrar a eletrificação industrial com a expansão do uso de eletricidade renovável no estado; Desenvolver programas de capacitação profissional para operação e manutenção de maquinários eletrificados. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta</p>

Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.2. SILVICULTURA

4.2.1. Metodologia e premissas adotadas

Para a projeção da produção da Silvicultura até 2050, foram utilizados dados de produção histórica, de 1986 a 2023, advindos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024b) no Rio Grande do Sul, considerando a seguinte segmentação de produtos realizada pelo IBGE:

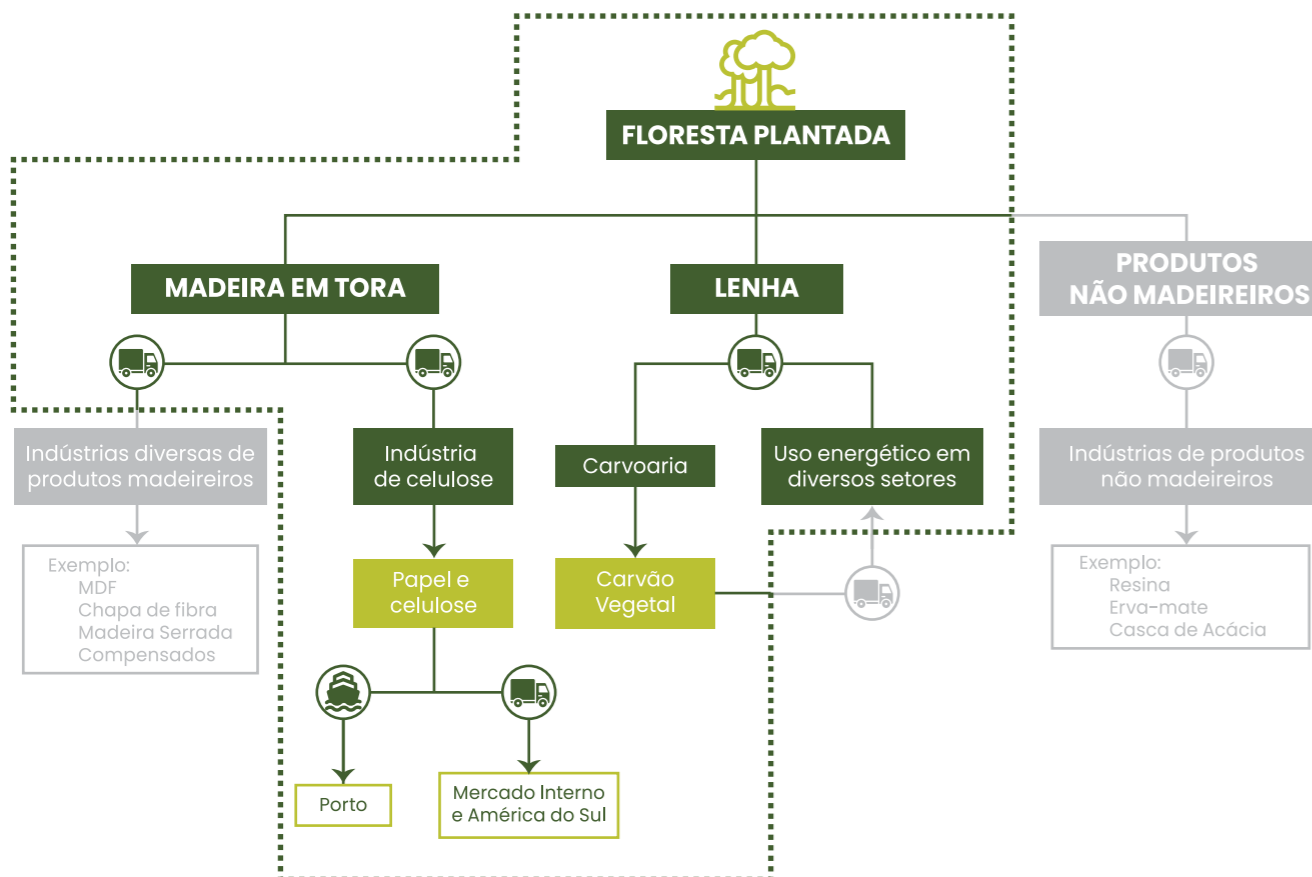
1. **Papel e Celulose;**
2. **Lenha;**
3. **Carvão; e**
4. **Outras finalidades.**

Dessa forma, a estimativa da produção de silvicultura no Rio Grande do Sul teve como insumo inicial a projeção do crescimento da silvicultura

no estado de 3,4% a.a. para a indústria do carvão; 0,3% a.a. para a indústria de papel e celulose e 2,5% para outras finalidades, enquanto foi projetada uma diminuição de 0,5% a.a. para a produção de lenha. Com isso, tomou-se a produção média de 2018 a 2023 como período-base para os anos subsequentes até 2050.

O inventário realizado subdividiu as emissões da cadeia em quatro grandes blocos, os quais também serviram de base para as projeções: (I) Floresta Plantada; (II) Madeira em tora (indústria de celulose); (III) Madeira em tora (outras indústrias); Lenha (uso energético). Na Figura 7, apresenta-se o recorte utilizado para o inventário (2018 a 2023) e projeções de emissões e remoções (2024 a 2050) desta cadeia.

Figura 7: Recorte adotado para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia da silvicultura



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Cenário BAU

Para o desenvolvimento do cenário BAU, foram utilizadas as taxas de crescimento supracitadas como premissa base da evolução das emissões de GEE para todas as etapas da cadeia de produção da silvicultura, partindo da intensidade de emissões do inventário de emissões e remoções previamente desenvolvido para a cadeia.

Cenário Descarbonização

No cenário de Descarbonização, os níveis de produção projetados no cenário BAU foram mantidos e foi adicionado um conjunto de medidas de mitigação de emissões de GEE, descritas a seguir:

- **Aumento da produtividade da silvicultura, com meta de aumento anual de 0,7% a.a;**

O aumento da produtividade da silvicultura permite que o setor supra as necessidades crescentes da cadeia por madeira, evitando expandir a plantação sobre área de vegetação nativa. Assim, foi estimado o incremento anual mínimo na produtividade necessário para suprir uma demanda crescente por produtos madeireiros até 2050 e ao mesmo tempo evitar essa expansão nestas áreas, resultando em uma taxa de 0,7% ao ano. Esse aumento de produtividade poderia ser feito através de melhoramentos dos sistemas de produção silvícola, como melhoramento nos níveis de fertilização e correção de pH do solo, aumento do adensamento florestal, aprimoramento genético de clones, dentre outros.

- **Limitar o avanço da Silvicultura sobre áreas de vegetação nativa, privilegiando a expansão para sistemas integrados;**

No caso em que há necessidade de expansão de área plantada, a expansão ocorre através de áreas de sistemas integrados em arranjos Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), proporcionando faixas florestais que fornecem sombrite e conforto térmico (ganhos zootécnicos e menor estresse), biomassa para caldeiras eficientes/biogás, barreira física à expansão sobre áreas nativas e, sobretudo,

remoções de carbono verificáveis. Bem desenhada, a carteira de florestas comerciais e restauração nativa permite compensar parte das emissões residuais dos sistemas agrícolas e pecuários enquanto cria fluxo de caixa adicional.

- **Descarbonização do transporte, alcançando 95% de redução de emissões de GEE em 2050;**

Utilização de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil para o transporte, com implementação linear a partir de 2035.

- **No setor de papel e celulose, substituição de fontes energéticas de fontes fósseis, como a desativação total de caldeiras a carvão mineral; a eficiência energética e operacional das plantas industriais, com o alcance de 30% de eficiência energética;**

As ações para melhoria da eficiência incluem: sistemas de cogeração, melhoria do isolamento de caldeiras, recuperação de calor e valor, manutenção de bombas e caldeiras, otimização dos sistemas de ar comprimido, dentre outros (Brasil, 2017b).

- **Maior eficiência na queima da lenha em caldeiras e implantação de queimadores de metano no processo de carbonização para a produção do carvão vegetal;**

Uma maior eficiência na queima da lenha em caldeiras pode ser obtida, por exemplo, com o controle de umidade e da granulometria do cavaco que entra na caldeira. Por sua vez, a queima do metano transforma este gás em CO₂, o qual é considerado biogênico (Costa et al., 2018).

4.2.2. Resultados

O setor de silvicultura do Rio Grande do Sul apresenta um perfil de emissões diversificado, distribuído entre a produção de madeira para a indústria de papel e celulose, o uso energético de lenha e carvão vegetal, e o transporte desses materiais, bem como da madeira colhida. Em 2023, desconsiderando as remoções e emissões da etapa da floresta plantada, o inventário totalizou aproximadamente

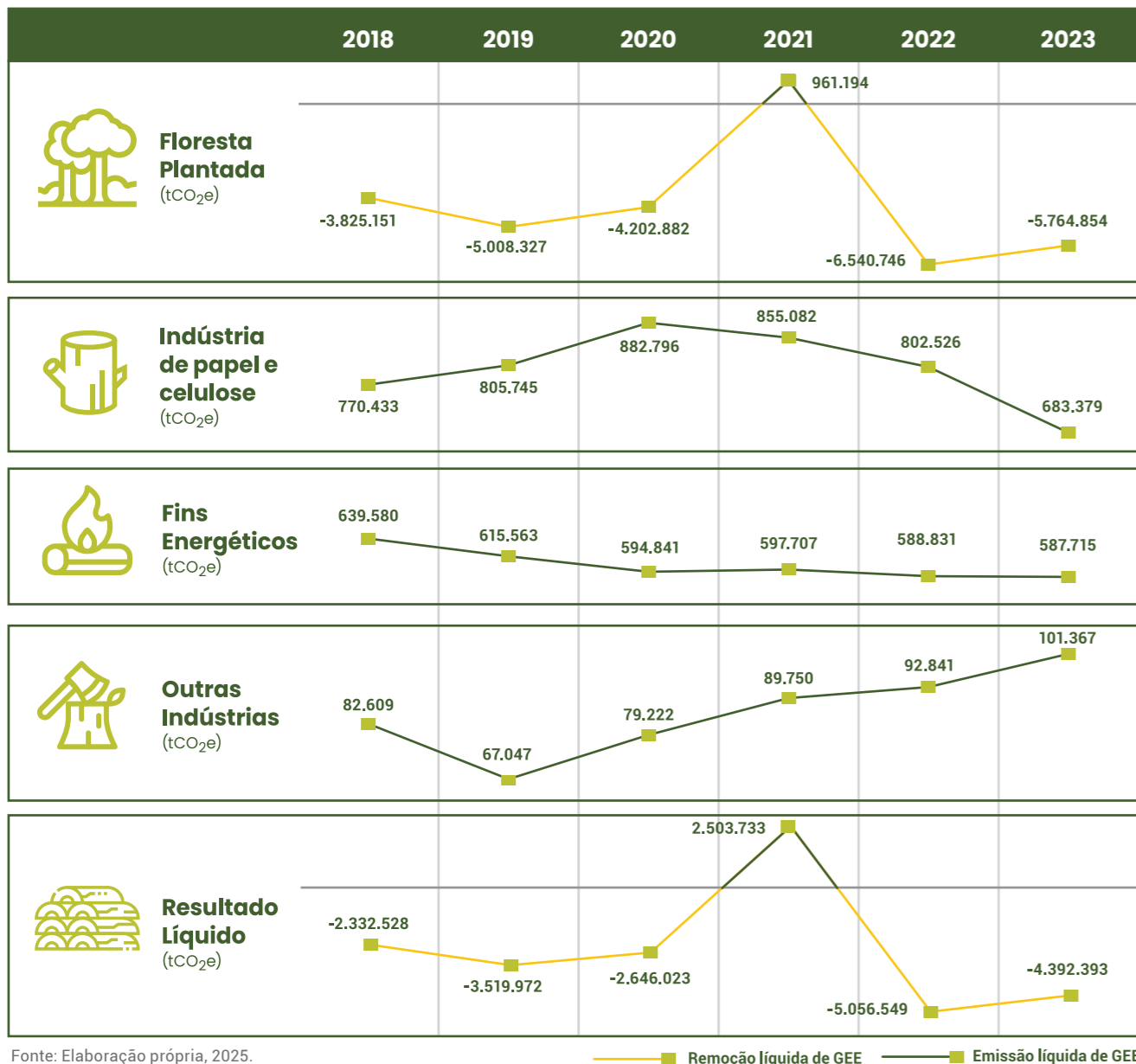
1,37 MM tCO₂e, uma queda de quase 8% em relação a 2018 (1,49 MM tCO₂e). Em 2021, ocorreu um pico de emissões, em razão, principalmente, do aumento das emissões de mudança do uso da terra no período, ponto de alerta para o setor.

A indústria de papel e celulose responde pela maior parcela do total das emissões, variando entre 50% e quase 57% das emissões no período, com 0,68 MM tCO₂e em 2023. A lenha, tanto pelo consumo energético quanto pelo carvoejamento, contribui de forma consistente com cerca de 32% a 38% das emissões, mantendo-se como uma fonte relevante e relativamente estável de emissões no período histórico analisado. O transporte de madeira colhida, tanto para

a cadeia da celulose quanto para outras indústrias, embora menos expressivo em termos proporcionais, representa entre 7% e 15% das emissões do inventário.

Quando estas etapas são somadas à etapa de florestas plantadas, que inclui as remoções decorrentes dos produtos florestais madeireiros e as emissões da mudança do uso da terra e do manejo florestal, na maioria dos anos, há uma remoção líquida de CO₂ da atmosfera. Considerando as florestas plantadas, as emissões líquidas do setor variaram entre -2,3 MM tCO₂e em 2018 e -4,4 MM tCO₂e em 2023. Para um resumo das emissões desta cadeia, entre os anos de 2018 a 2023, ver Figura 8.

Figura 8: Emissões e remoções da cadeia da silvicultura do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

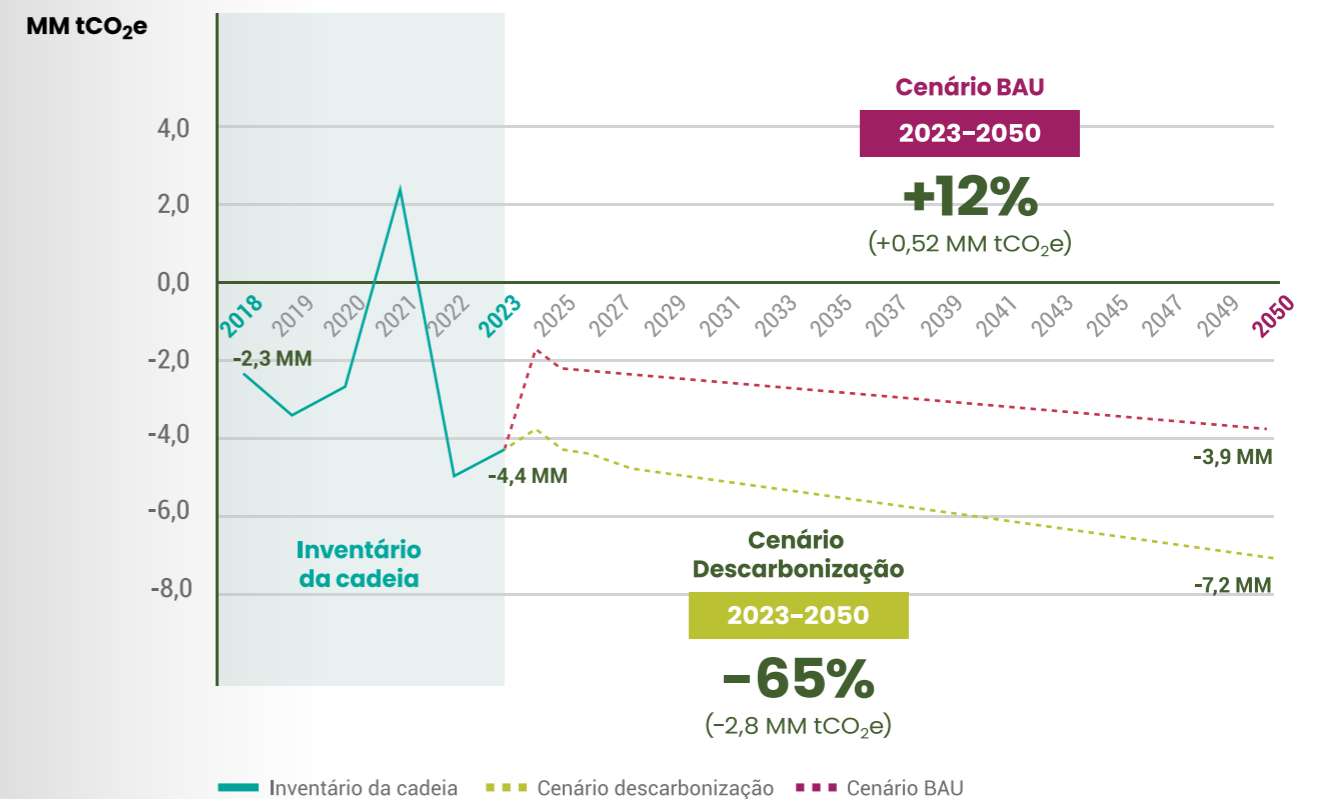
No cenário BAU, as emissões da silvicultura, excluindo as emissões e remoções provenientes da etapa da floresta plantada, mantêm relativa estabilidade ao longo do horizonte projetado, partindo de 1,37 MM tCO₂e em 2023 e alcançando cerca de 1,64 MM tCO₂e em 2050. A madeira em tora destinada à indústria de papel e celulose, incluindo transporte e indústria, segue como principal fonte de emissões, permanecendo próxima de 50% do total de emissões em todo o período analisado.

As emissões da indústria de papel e celulose mantêm-se ao redor de 40% das emissões totais, sendo boa parte das suas emissões provenientes das emissões diretas da indústria. O uso energético de lenha e carvão vegetal conserva sua participação em torno de um quarto das emissões totais. Já as remoções a partir das florestas plantadas se tornam ainda mais relevantes, saindo de 3,1 MM tCO₂e, em 2024, e chegando a 5,5 MM tCO₂e, em 2050. Com isso, as remoções líquidas totais do setor aumentaram de -1,7 MM tCO₂e, em 2024, para -3,9 MM tCO₂e, em 2050.

No cenário Descarbonização, o setor de silvicultura se torna um sumidouro líquido de emissões ainda maior. As emissões brutas, excluindo a etapa de florestas plantadas, que em 2024 somavam cerca de 1,42 MM tCO₂e, recuam para aproximadamente 0,68 MM tCO₂e em 2050, com quedas em todas as etapas da cadeia. As emissões de transporte de madeira colhida e de papel e celulose reduzem em mais de 90%, refletindo o crescente uso de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil.

Com relação à produção de papel e celulose, as emissões reduzem quase pela metade, passando de aproximadamente 0,57 MM tCO₂e em 2024 para 0,32 MM tCO₂e em 2050. As florestas plantadas ampliam sua capacidade de sequestro de carbono, com as suas remoções líquidas avançando quase -8 MM tCO₂e em 2050, compensando as emissões residuais das outras atividades desse setor. A projeção das emissões dos cenários BAU e Descarbonização são apresentadas na Figura 9.

Figura 9: Projeção de emissões dos cenários BAU e Descarbonização para a cadeia da silvicultura, de 2024 a 2050 (MM tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O impacto de cada uma das ações propostas é apresentado na Tabela 2, para os anos 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050, com os resultados comparativos do cenário BAU com o cenário de Descarbonização.

Tabela 2: Impactos das ações de mitigação na cadeia da silvicultura no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO₂e)

Ação de mitigação	2025		2030		2035	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Eliminação das emissões de MUT	-2.125.543	100%	-2.230.553	93,0%	-2.319.361	89,6%
Descarbonização do transporte	0	0%	0	0,0%	-9.347	0,4%
Redução de GEE na indústria de papel e celulose	0	0%	-127.195	5,3%	-177.228	6,8%
Redução de GEE na indústria de energéticos	0	0%	-39.960	1,7%	-82.365	3,2%
Total (Descarbonização - BAU)	-2.125.543	100%	-2.397.708	100%	-2.588.301	100%

Ação de mitigação	2040		2045		2050	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Eliminação das emissões de MUT	-2.397.820	83,2%	-2.430.813	77,3%	-2.404.115	71,5%
Descarbonização do transporte	-127.645	4,4%	-255.184	8,1%	-390.976	11,6%
Redução de GEE na indústria de papel e celulose	-230.098	8,0%	-285.807	9,1%	-344.353	10,2%
Redução de GEE na indústria de energéticos	-127.214	4,4%	-174.509	5,5%	-224.248	6,7%
Total (Descarbonização - BAU)	-2.882.777	100%	-3.146.312	100%	-3.363.692	100%

Fonte: Elaboração própria, 2025.

As ações de mitigação e seus impactos no ano de 2050, comparando-se o cenário BAU e Descarbonização, são apresentadas a seguir.

1. Eliminação das emissões de mudança de uso da terra: A maior produtividade por hectare, que cresce a uma taxa anual de 0,7%, permite atender à demanda sem necessidade de expansão em área de vegetação nativa, promovendo uma queda das emissões provenientes da mudança de uso da terra. Essa ação implica em 2,4 MM

tCO₂e a menos no cenário Descarbonização em comparação ao cenário BAU.

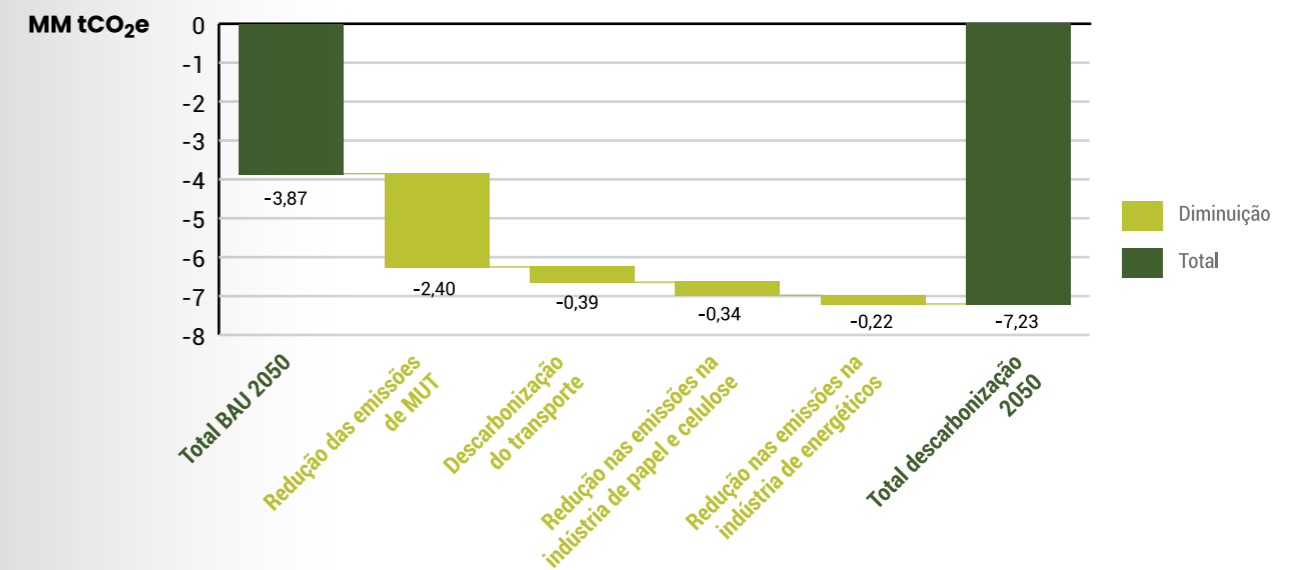
2. Descarbonização do transporte: A substituição da frota utilizada no transporte de madeira e no uso de derivados de petróleo por combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil garante que, em 2050, grande parte dessas emissões sejam nulas, o que elimina uma fonte relevante de emissões. Essa redução chega a quase 0,4 MM tCO₂e com as premissas do cenário Descarbonização.

3. Substituição de combustíveis e eficiência energética e operacional na indústria de papel e celulose: As emissões do setor são reduzidas em até 47% em 2050, resultado da desativação de caldeiras a carvão e da adoção de medidas de eficiência energética e eletrificação em alguns dos processos industriais desse setor. Essa medida se soma às outras presentes no setor, com uma redução pouco maior que 0,35 MM tCO₂e no cenário Descarbonização.

4. Maior eficiência na queima da lenha em caldeiras e implantação de queimadores de metano no processo de carbonização: Estas medidas proporcionam redução de emissões associadas à produção e queima destes dois insumos, totalizando redução de emissões na ordem de 0,2 MM tCO₂e.

Em conjunto, essas medidas ampliam o papel da silvicultura como sumidouro líquido de emissões, reduzindo as emissões, em 2050, de -3,9 MM tCO₂e no BAU para quase -7,2 MM tCO₂e no cenário Descarbonização como mostra a Figura 10. Esse resultado decorre principalmente da maior produtividade por hectare, que diminui a necessidade de novas áreas e reduz em quase 1,2 MM tCO₂e as emissões por mudança de uso da terra. Complementarmente, as medidas no transporte desse setor eliminam cerca de 0,4 MM tCO₂e, enquanto a desativação de caldeiras a carvão e a adoção de eficiência energética nas indústrias de papel, celulose e energéticos contribuem com 0,6 MM tCO₂e adicionais. No fim do período, o setor se consolida como um dos possíveis grandes sumidouros de carbono do Estado, capaz de compensar emissões de setores de mais difícil descarbonização e contribuir de forma relevante para o atendimento à meta estadual de neutralidade climática.

Figura 10: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE, comparando cenário BAU e descarbonização na cadeia da silvicultura em 2050 (MM tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.2.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização

4.2.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia da silvicultura

As seguintes medidas foram propostas para o setor da silvicultura a fim de aprimorar a coleta de dados para o inventário das cadeias:

Recomenda-se estudos locais sobre:

- Cobertura do solo, áreas convertidas em reflorestamento, idade do plantio e o carbono acumulado no solo (MUT);
- Levantamento de informações das indústrias de produtos madeireiros e de produtos não madeireiros não contempladas no inventário em razão da ausência de dados disponíveis, especialmente para o setor moveleiro do RS;
- Produção de produtos florestais madeireiros (PFM) de forma segmentada (madeira serrada, painéis de madeira, papel e papelão e outras madeiras em tora para fins industriais) para a contabilização do carbono estocado nestes PFM.
- Sugere-se que o estado passe a solicitar e sistematizar periodicamente as informações relevantes do setor.

4.2.3.2. Estratégias para atingir o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais

A implementação do cenário de Descarbonização da cadeia da silvicultura também apresenta desafios de caráter técnico, econômico e regulatório. Além disso, cada meta estabelecida envolve obstáculos específicos à sua efetiva execução. O aumento da produtividade florestal exige investimentos em pesquisa genética e manejo sustentável, além da superação de limitações relacionadas à variabilidade climática. A restrição da expansão sobre áreas de vegetação nativa requer políticas de ordenamento territorial, certificações e incentivos à adoção de sistemas integrados de produção. Já a descarbonização do transporte depende do desenvolvimento e da viabilidade econômica de combustíveis sustentáveis e de uma infraestrutura logística compatível.

No setor de papel e celulose, a substituição de fontes fósseis e a elevação da eficiência energética demandam modernização tecnológica e investimento do setor. Por fim, o aumento da eficiência na queima da lenha e o uso de queimadores de metano na carbonização exigem inovações tecnológicas, investimentos e adequações operacionais.

Diante disso, apresentam-se, no Quadro 2, as estratégias sugeridas para cada meta definida para o cenário de Descarbonização da cadeia da silvicultura.



Foto: Acervo Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura - SEMA-RS

Quadro 2: Estratégias para cadeia da silvicultura e alinhamento com planos e programas estaduais

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Aumento da produtividade da silvicultura, com meta de aumento anual de 0,7% a.a	<ul style="list-style-type: none"> • Promover incentivos para práticas de manejo florestal sustentável e técnicas avançadas de silvicultura para elevar a produtividade por hectare; • Propor, em colaboração com entidades do setor, métricas de sustentabilidade e resiliência ambiental nas propriedades rurais; • Incentivar a utilização de espécies de rápido crescimento e melhoramento genético florestal; • Promover incentivos para a produção de papéis, embalagens, madeiras engenheiradas e produtos derivados de tanino; • Fomentar pesquisa e desenvolvimento em biomateriais e bioquímicos a partir da celulose, novos produtos de madeira e novas aplicações de tanino, incluindo nanocristais e nanofibras; • Estimular cadeias de valor ligadas a novos usos da madeira e derivados, ampliando a competitividade do setor; • Integrar o crescimento da produção florestal com iniciativas de conservação. 	<p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p> <p>Programa Campos do Sul</p>
Limitar o avanço da Silvicultura para áreas de vegetação nativa, privilegiando a expansão para sistemas integrados.	<ul style="list-style-type: none"> • Oferecer aos produtores rurais certificação que comprove a adoção de melhores práticas e técnicas de produção ambientalmente sustentáveis; • Criar áreas de exclusão para proteger a vegetação nativa e conservar a biodiversidade; • Estimular a expansão da silvicultura em áreas já antropizadas ou de uso consolidado, priorizando sistemas integrados; • Promover a regularização ambiental das propriedades, incentivando produtores a seguir recomendações técnicas que aumentem a resiliência climática; • Criar programas de monitoramento para assegurar que a expansão da silvicultura ocorra de forma alinhada aos objetivos climáticos e de conservação. 	<p>PROVEG/RS</p> <p>Programa Campos do Sul</p> <p>PEPSA: Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Descarbonização do transporte, alcançando 95% de redução de emissões de GEE em 2050	<ul style="list-style-type: none"> • Ver estratégias detalhadas na Tabela 1. 	<p>Ver planos e programas estaduais detalhados na Tabela 1.</p>

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
No setor de papel e celulose, substituição de fontes energéticas de fontes fósseis, eficiência energética e operacional das plantas industriais, com o alcance de 30% de eficiência energética	<ul style="list-style-type: none"> Promover incentivos para a desativação gradual de caldeiras movidas a carvão mineral; Criar, avaliar e expandir programas voltados a inovações produtivas que promovam maior eficiência energética e uso de fontes renováveis no setor; Fomentar a cooperação entre instituições de ensino, pesquisa e a iniciativa privada para o desenvolvimento de processos operacionais mais eficientes; Criar linhas de financiamento e incentivos fiscais para modernização tecnológica e adoção de equipamentos de alto desempenho; Integrar o setor de papel e celulose a estratégias estaduais de transição energética e descarbonização. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Plano de Transição Energética Justa para as Regiões Carboníferas do Rio Grande do Sul</p> <p>Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p> <p>Programa H2V-RS</p> <p>Programa Pró-Etanol</p> <p>Biogás-RS</p> <p>Incentivos para fotovoltaica</p>
Maior eficiência na queima da lenha em caldeiras e implantação de queimadores de metano no processo de carbonização para a produção do carvão vegetal	<ul style="list-style-type: none"> Propor parâmetros e incentivos para controle de umidade e granulometria da lenha utilizada em caldeiras; Conceder incentivos fiscais, linhas de crédito e apoio para a implementação de queimadores de metano no processo de carbonização da madeira e para a modernização de caldeiras com tecnologias de combustão avançada; Criar linhas de financiamento e incentivos fiscais para modernização tecnológica e adoção de equipamentos de alto desempenho, como queimadores de metano; Desenvolver programas de capacitação profissional para operação e manutenção dos processos industriais; Desenvolver programas de monitoramento de ganhos de eficiência energética e redução de emissões na produção do carvão vegetal. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>

Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.3. ARROZ

4.3.1. Metodologia e premissas adotadas

A produção de arroz no estado do Rio Grande do Sul é amplamente tecnificada e apresenta produtividade superior à média brasileira, principalmente, devido à utilização do sistema de cultivo por inundação, em detrimento do sequeiro (EMBRAPA, 2025; IRGA, 2025).

Entretanto, dados obtidos junto ao setor orizícola gaúcho e à EMBRAPA (2022) indicam que os custos de produção vêm aumentando, enquanto as margens de lucro diminuem, o que tem desestimulado os produtores a ampliarem a área cultivada. Nesse contexto, adotou-se como premissa central das projeções a manutenção da área de rizicultura registrada em 2023, último ano considerado no inventário desenvolvido neste projeto.

O modelo BLUES foi utilizado como ferramenta para determinação das projeções (Angelkorte, 2023). O BLUES incorpora restrições ao avaliar cenários de produção, simulando, por exemplo, os limites de expansão impostos pela disponibilidade de água

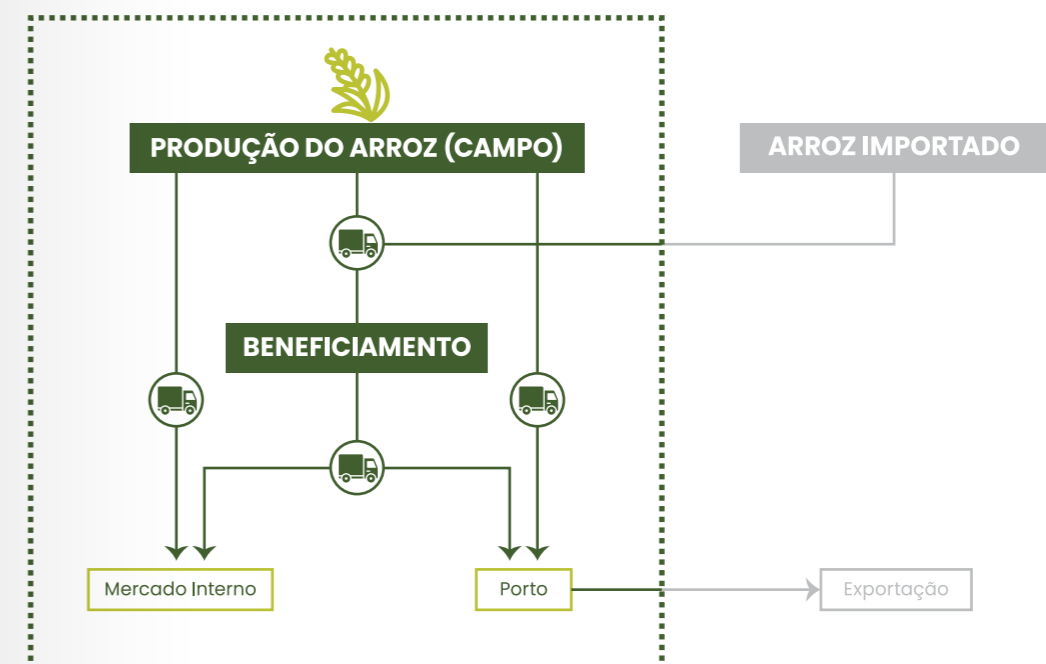
e pela pressão ambiental sobre áreas alagadas. Assim, a sustentabilidade do arroz no Rio Grande do Sul depende tanto da eficiência tecnológica quanto da integração com políticas de manejo hídrico, garantindo viabilidade econômica e ambiental para a cultura.

O inventário de emissões e remoções realizado, para os anos de 2018 a 2023, para a cadeia do arroz subdividiu as emissões da cadeia do arroz em cinco grandes blocos, os quais também serviram de base para as projeções:

1. Cultivo do Arroz;
2. Solos Manejados;
3. Mudança de Uso da Terra e Florestas;
4. Transporte do Arroz; e
5. Beneficiamento.

Na Figura 11, apresenta-se o recorte utilizado para o inventário (2018 a 2023) e projeções de emissões e remoções desta cadeia até 2050.

Figura 11: Recorte adotado para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia do arroz



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Cenário BAU

No desenvolvimento do cenário BAU, adotou-se a premissa de manutenção da intensidade de carbono da produção. Dessa forma, as emissões de GEE das etapas do cultivo, solos manejados e beneficiamento seguiram constantes, uma vez que o cenário considera a manutenção da produtividade e da área destinada ao cultivo de arroz. Em consequência, a taxa de crescimento da produção considerada foi de 0% ao ano.

As emissões associadas à mudança do uso da terra permanecem marginais em ambos os cenários, refletindo a premissa central da manutenção da área produtiva. Essa condição configura um efeito de contenção, na medida em que a ausência de novas conversões de uso da terra preserva os estoques de carbono já estabelecidos e evita emissões adicionais de GEE.

No transporte do arroz, como nas demais cadeias, adotou-se a premissa de implementação do programa Combustível do Futuro (BRASIL, 2023b), assumindo que a participação de combustíveis sem emissões diretas de CO₂ fóssil, estimada em 15% em 2024, evolua para 20% em 2030, mantendo-se nesse patamar até 2050.

Cenário Descarbonização

Para o cenário Descarbonização, considerou-se a expansão da produção de arroz no estado do Rio Grande do Sul, associada a sistemas de produção mais disruptivos e de menor intensidade de emissão de GEE.

Nesse contexto, a produtividade apresentou um crescimento constante de aproximadamente 0,7% ao ano, resultante de mudanças no sistema produtivo, aliado à manutenção da área cultivada no Estado. Assim, foram adotadas as seguintes medidas de mitigação de emissões de GEE:

- **Plantio Direto Consorciado em 50% da área plantada de arroz até 2050;**

De acordo com dados da safra 2022/23, o plantio direto está presente em cerca de 9,9% das lavouras de arroz do estado do Rio Grande do Sul (IRGA, 2025). Esse

sistema produtivo tem o potencial de mitigar até 21% em conversão de áreas de sistemas convencionais (Bayer et al., 2015).

- **Fixação biológica de nitrogênio (FBN) em 50% da área cultivada até 2050;**

Uma das vantagens de haver a produção de arroz em sistemas de plantio direto consorciado é a possibilidade de adoção de medidas de mitigação como a FBN, que faz com que não haja a necessidade de implementação de fertilização nitrogenada nas lavouras da região. No Rio Grande do Sul, cerca de 10% das lavouras já utilizam esse sistema produtivo (Brasil, 2017c).

- **Plantio em Cultivo Mínimo em 50% da área plantada de arroz até 2050;**

De acordo com Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2025), o cultivo mínimo está presente em cerca de 49,7% das lavouras de arroz do estado do Rio Grande do Sul (safra 2022/23). O sistema tem o potencial de mitigar até 24% em conversão de áreas de sistemas convencionais (Bayer et al., 2015).

- **Sistema de irrigação por inundação intermitente em 100% da área de arroz irrigado até 2050;**

A irrigação por inundação intermitente no cultivo de arroz consiste em alternar períodos de alagamento da lavoura, com lâmina de água de 5 a 10 cm, com fases em que o solo é deixado secar antes da próxima irrigação, em contraste com o método tradicional de inundação contínua. Esse manejo reduz significativamente o consumo de água, melhora a oxigenação do solo, contribui para o crescimento radicular e diminui a emissão de metano. Entretanto, exige monitoramento cuidadoso para evitar que o estresse hídrico afete negativamente o desenvolvimento das plantas. Esse sistema produtivo apresenta um potencial de até 52% de redução das emissões de metano proveniente do cultivo do arroz irrigado (Bayer et al., 2015; Scivittaro et al., 2023).

- **Utilização de inibidores de metano em 100% da área de arroz irrigado até 2050;**

A utilização de inibidores de metano no cultivo de arroz irrigado é uma estratégia promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa provenientes desse sistema agrícola, um dos principais emissores de CH₄ no setor. Esses compostos atuam limitando a atividade microbiana responsável pela metanogênese em condições anaeróbicas do solo, podendo reduzir entre 30% e 80% das emissões sem comprometer a produtividade da cultura. Além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, sua adoção em larga escala pode auxiliar no cumprimento de metas climáticas, diminuir a pegada de carbono do arroz e abrir oportunidades no mercado de créditos de carbono, fortalecendo a sustentabilidade da cadeia produtiva. Na projeção das emissões da cadeia, o potencial de mitigação estabelecido, de forma conservadora, corresponde a 40% do metano remanescente (Angelkorte, 2023).

- **Aprimoramento do manejo de resíduos, projetando-se um aumento anual de 5% até 2050 na taxa de aproveitamento dos resíduos agrícolas;**

A estratégia visa aumentar a eficiência de uso dos resíduos agropecuários para geração de biocombustíveis, biofertilizantes e demais aplicações, reduzindo em cerca de 70% as emissões associadas às emissões de carbono desses resíduos.

- **Eficiência energética e uso de combustíveis renováveis no processo de beneficiamento e irrigação, com projeção de redução anual de 5% nas emissões até 2050;**

As ações incluem adoção de sistemas de cogeração, melhoria do isolamento de caldeiras, recuperação de calor e valor, manutenção de bombas e caldeiras, otimização dos sistemas de ar comprimido, dentre outras medidas (Brasil, 2017b). No caso da irrigação, a redução das emissões está atrelada à redução no uso de bombas, proporcionada pela transição da irrigação por inundação contínua para a intermitente, aliada a migração para sistemas de geração elétrica a partir de fontes renováveis.

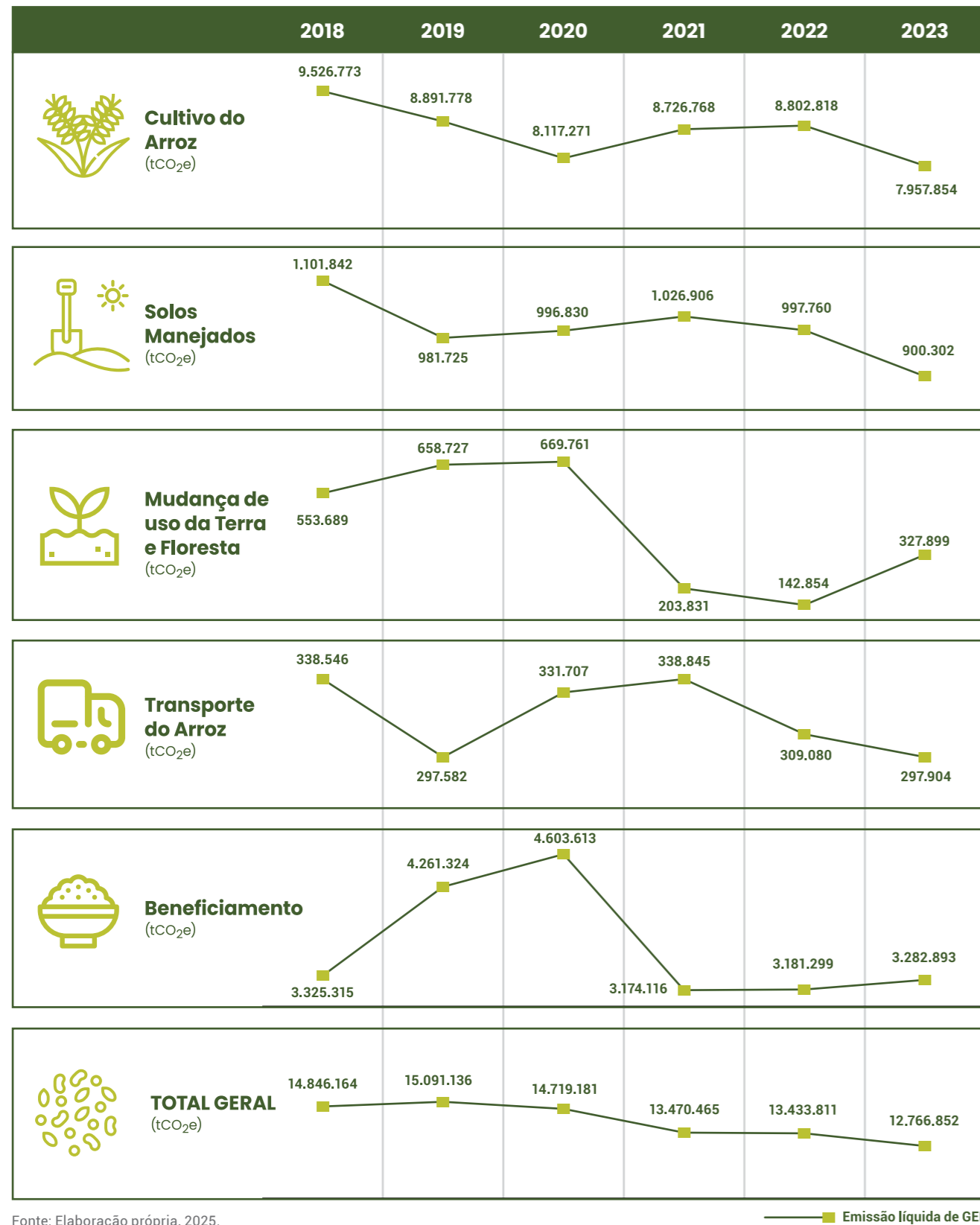
- **Nos transportes, considerou-se um avanço da descarbonização do setor em relação ao cenário BAU;**

Utilização de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil para o transporte, com implementação linear a partir de 2035, alcançando 95% em 2050.

4.3.2. Resultados

A rizicultura gaúcha apresenta um perfil de emissões muito concentrado no campo, sobretudo no metano (CH₄) gerado pelo cultivo irrigado. Em 2023, o inventário registrou aproximadamente 12,77 MM tCO₂e, sendo a fase do cultivo responsável por cerca de 62% desse total. O beneficiamento contribuiu com aproximadamente 26%, solos manejados com 7%, mudança de uso da terra 3% e o transporte do arroz com 2%. Dentro do cultivo, as emissões diretas de CH₄, decorrentes da decomposição anaeróbica de matéria orgânica presente na água, são a principal fonte. Apenas esse item representa cerca de 7,65 MM tCO₂e das emissões do ano de 2023 (60%). A Figura 12 consolida de forma gráfica as emissões e remoções por etapa da cadeia do arroz no período analisado (2018 a 2023).

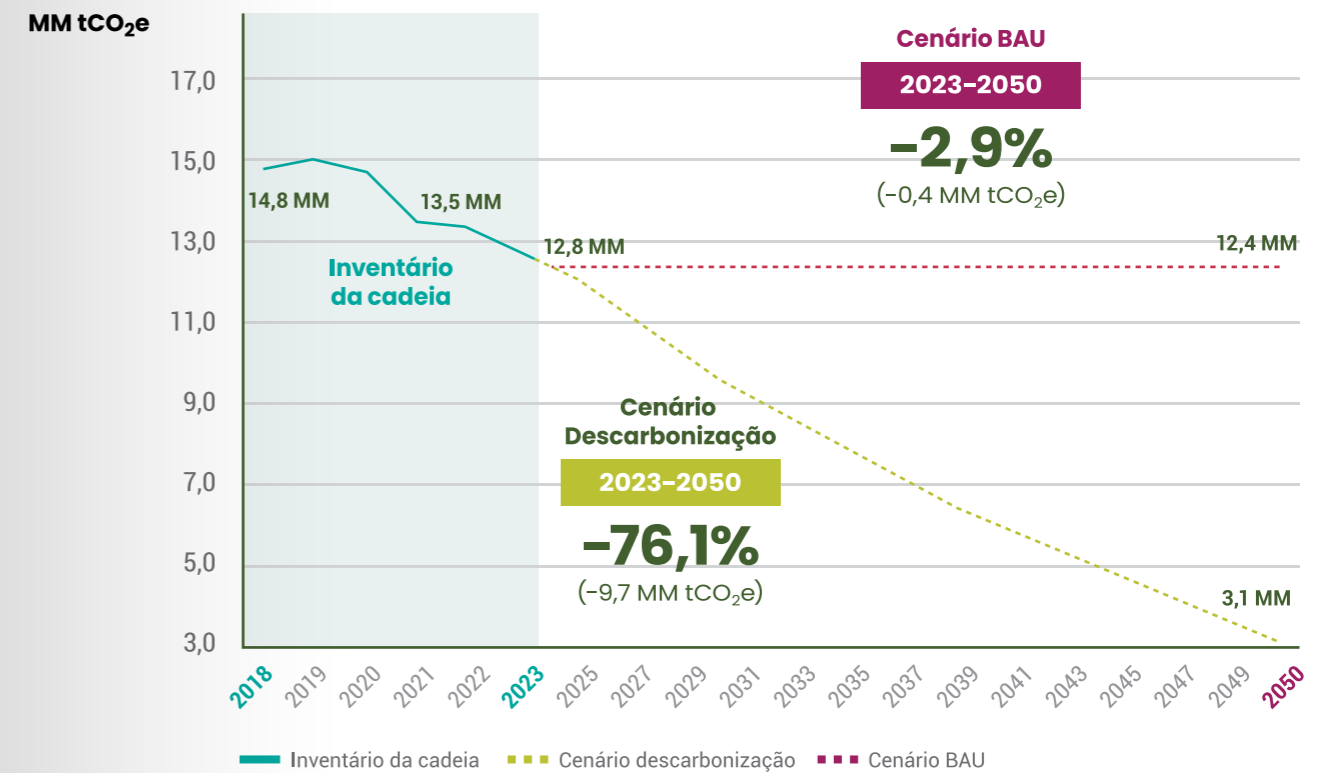
Figura 12: Emissões e remoções da cadeia do arroz no Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO₂e)



Esse retrato ajuda a entender por que a trajetória em BAU quase não se apresenta variações e porque a combinação correta de tecnologias no cenário Descarbonização promove uma inflexão da curva

de forma contundente. A projeção das emissões do cenário BAU e cenário Descarbonização são apresentadas na Figura 13.

Figura 13: Projeção de emissões da cadeia do arroz no cenário BAU e Descarbonização, de 2024 a 2050 (MM tCO₂e)



O impacto de cada uma das ações propostas é apresentado na Tabela 3, para os anos 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050, com os resultados comparativos do cenário BAU com o cenário de Descarbonização.

Tabela 3: Impactos das ações de mitigação na cadeia do arroz no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO₂e)

Ação de mitigação	2025		2030		2035	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Redução de metano no cultivo irrigado	-319.021	94,6%	-1.797.633	66,6%	-3.089.004	65,7%
Eficiência e energia renovável na irrigação e no beneficiamento	-0,39	0,0%	-746.719	27,6%	-1.324.515	28,2%
Descarbonização do transporte e fontes móveis cultivo	-0,03	0,0%	-0,03	0,0%	-13.655	0,3%
Gestão de resíduos da lavoura	0	0,0%	-92.722	3,4%	-164.468	3,5%
Arquitetura do sistema de plantio e nitrogênio	-18.164	5,4%	-63.574	2,4%	-108.983	2,3%
Total (Descarbonização - BAU)	-337.185	100%	-2.700.647	100%	-4.700.626	100%

Ação de mitigação	2040		2045		2050	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Redução de metano no cultivo irrigado	-4.199.642	64,4%	-5.136.652	63,7%	-5.908.200	63,2%
Eficiência e energia renovável na irrigação e no beneficiamento	-1.771.603	27,2%	-2.117.551	26,3%	-2.385.239	25,5%
Descarbonização do transporte e fontes móveis cultivo	-179.557	2,8%	-346.143	4,3%	-512.046	5,5%
Gestão de resíduos da lavoura	-219.984	3,4%	-262.942	3,3%	-296.181	3,2%
Arquitetura do sistema de plantio e nitrogênio	-154.393	2,4%	-199.803	2,5%	-245.212	2,6%
Total (Descarbonização - BAU)	-6.525.180	100%	-8.063.091	100%	-9.346.879	100%

Fonte: Elaboração própria, 2025.

No cenário BAU, parte-se da premissa de estagnação da produção (manutenção da área cultivada e produtividade constante), que resulta em intensidade de carbono estável. O resultado é um inventário praticamente constante, as emissões anuais ficam estacionadas em cerca de 12,40 MM tCO₂e até 2050, com pequenas variações de segunda ordem. O fator de emissão acompanha essa inércia

e permanece na casa de 1,736 tCO₂e por tonelada de arroz ao longo de todo o horizonte. Assim, sem mudanças de sistema (especialmente no manejo hídrico e na química do solo), o metano gerado pelo arroz irrigado mantém o inventário ancorado no mesmo patamar.

O cenário de Descarbonização altera essa dinâmica em duas frentes:

1. Ganho de produtividade, produção crescendo 0,7% a.a., com área cultivada estável; e,

2. Mitigação direta nas maiores fontes.

Assim, as emissões totais caem de 12,8 MM tCO₂e (2023) para aproximadamente 3,1 MM tCO₂e (2050), uma redução de 76%, enquanto a produção sobe de 7,14 MMt (2023) para 8,49 MMt (2050). O fator de emissão diminui consideravelmente, de 1,79 tCO₂e/t (2023) para 0,36 tCO₂e/t (2050). Uma queda de 80% na intensidade de emissão de GEE. Essa mudança de patamar é explicada, essencialmente, por cinco grandes medidas que atingem as principais emissões do inventário que são apresentadas a seguir. Os resultados apresentados representam a comparação do cenário BAU, em 2050, com o resultado do cenário Descarbonização no mesmo ano.

1. Metano do cultivo irrigado: Duas decisões estruturantes aparecem como as maiores alavancas de redução de emissões: a inundação intermitente em 100% da área irrigada até 2050 e o uso de inibidores de metano também em 100% da área irrigada. A alternância de lâmina com períodos de solo aerado quebra as condições anaeróbicas que favorecem a metanogênese, enquanto os inibidores atacam o remanescente. Juntas, as medidas reduzem as emissões diretas de CH₄, em 2050, de 7,65 MM tCO₂e no BAU para 1,74 MM tCO₂e no cenário Descarbonização, ou seja, uma queda de 77%. O resultado é consistente com a soma dos efeitos: redução estrutural pela inundação intermitente e abatimento adicional pelo aditivo. Dado que o CH₄ do cultivo é a maior peça do inventário, a mitigação nesta ordem de grandeza muda o nível do sistema.

2. Arquitetura do sistema de plantio e nitrogênio: Até 2050, metade da área cultivada permanece sob cultivo mínimo, enquanto a outra metade migra para plantio direto consorciado. Essas conversões (já em difusão no Rio Grande do Sul) reduzem emissões do manejo do solo e, sobretudo no caso do consórcio, viabilizam a

fixação biológica de nitrogênio (FBN) em 50% da área, contendo as emissões associadas ao uso de ureia e fertilizantes sintéticos. No inventário, o setor de solos manejados apresenta uma queda de 0,90 MM tCO₂e (BAU 2050) para 0,36 MM tCO₂e (Descarbonização 2050), com emissões diretas e de fertilizantes em trajetória descendente ano a ano. Paralelamente, o uso de resíduos agrícolas no solo perde peso relativo, em função do melhor aproveitamento da palha para produção de bioinsumos e bioenergia.

3. Gestão de resíduos da lavoura: A utilização de resíduos cresce de forma incremental (+5% a.a.), até perfazer cerca de 70% de redução das emissões associadas em 2050. Na prática, a palha e subprodutos deixam de ser passivo emissor e passam a alimentar rotas de biocombustíveis e biofertilizantes, reduzindo metano e óxido nitroso no campo e as emissões indiretas na cadeia de insumos.

4. Energia na irrigação e no beneficiamento: Há dois movimentos simultâneos. No campo, a troca da inundação contínua pela intermitente diminui o número de horas-bomba, e a eficiência/repotenciação elétrica (com redução de 5% a.a. das emissões) reduz ainda mais a pressão. E no pós-colheita, o beneficiamento, que no cenário BAU em 2050 somava 3,28 MM tCO₂e, é alvo de efficientização e troca de fonte energética (-5% a.a.). O efeito composto reduz as emissões de 3,28 MM tCO₂e para 0,91 MM tCO₂e em 2050, uma queda superior a 70% nessas duas frentes. Como o beneficiamento respondia por cerca de 26% do inventário, esse bloco de medidas tem impacto decisivo na segunda metade da trajetória.

5. Descarbonização dos transportes: A partir de 2035, o uso de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil cresce linearmente até 95% em 2050. Com isso, em 2050, as emissões do transporte do arroz recuam de 0,28 MM tCO₂e para 0,017 MM tCO₂e, 94% de redução.

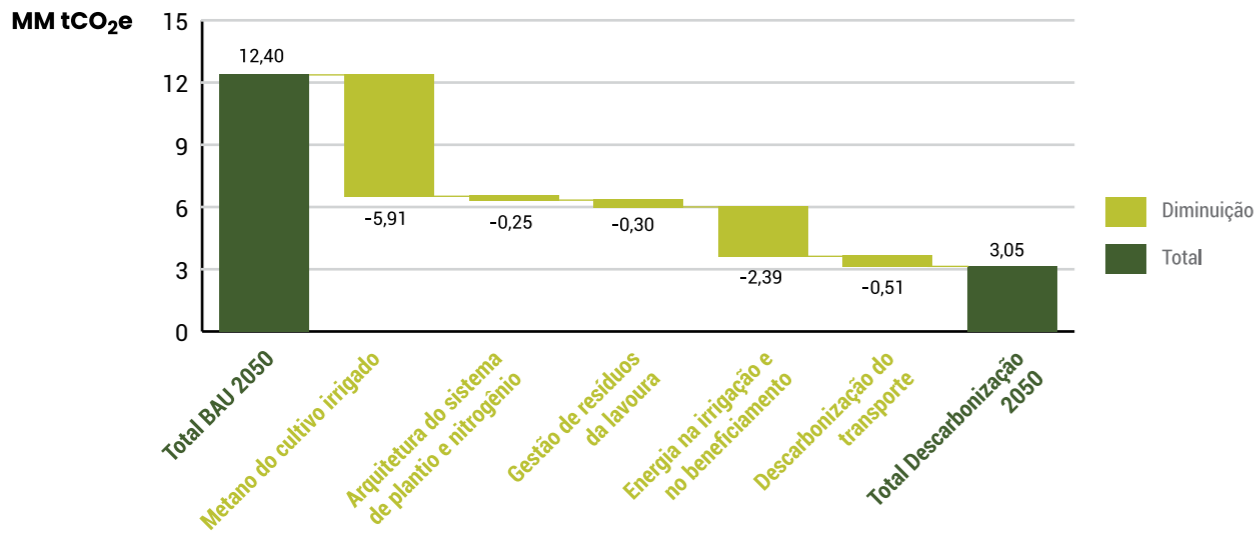
Do lado da mudança de uso da terra, as emissões permanecem marginais em ambos os cenários, refletindo a manutenção da área como premissa central. Em termos de desenho de política, isso significa que o grande ganho climático da rizicultura no RS não depende de ampliar ou reduzir áreas, mas sim de como se maneja a água, o nitrogênio, a palha e a energia na mesma área já utilizada.

A Figura 14 apresenta o impacto das ações do cenário Descarbonização em relação ao cenário BAU, em 2050.

Em síntese, o retrato que emerge é o de uma cadeia altamente sensível a medidas que busquem

redução no metano do cultivo e na energia do pós-colheita. A combinação de irrigação intermitente com inibidor de metano ataca a principal causa do problema, enquanto cultivo mínimo/Plantio Direto consorciado com fixação biológica de nitrogênio e a eficiência energética completam, derrubando a intensidade para 0,36 tCO₂e/t e levando o total setorial para 3,05 MM tCO₂e em 2050. O resultado é um sistema que sustenta crescimento moderado da produtividade, estabilidade da área e impulsiona uma redução robusta da intensidade de carbono.

Figura 14: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE, comparando cenário BAU e Descarbonização na cadeia do arroz em 2050 (MM tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.3.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização

a cultura do arroz cultivado em solo inundado no RS;

4.3.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia do arroz

A seguir, são apresentadas sugestões de iniciativas para a melhoria da coleta de dados a fim de elaborar com maior precisão das estimativas de emissões e remoções da cadeia do arroz.

Recomenda-se estudos locais sobre:

- Emissões e remoções associadas a áreas de (I) ILP(F), (II) e métodos de cultivo (SPD, PD e PC) para

- Emissões pelo uso de adubos orgânicos no cultivo de arroz irrigado;
- Emissões das empresas de beneficiamento;
- Estudos amostrais sobre a movimentação do arroz dentro do estado do RS.
- Sugere-se que os Órgãos Ambientais Locais passem a solicitar de forma sistematizada inventários de emissões às empresas do setor.

4.3.3.2. Estratégias para o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais

A descarbonização da cadeia produtiva do arroz também encontra obstáculos de natureza técnica, econômica e operacional, com barreiras para cada meta proposta. A adoção do plantio direto consorciado, do cultivo mínimo e da fixação biológica de nitrogênio requer capacitação técnica, adaptação de maquinário e investimentos em pesquisa para compatibilizar produtividade e conservação do solo. A implantação de sistemas de irrigação por inundação intermitente e o uso de

inibidores de metano demandam investimentos em infraestrutura, assistência técnica e monitoramento das emissões. O aprimoramento do manejo de resíduos e a transição para o uso de combustíveis renováveis nos processos de beneficiamento e irrigação exigem suporte financeiro e tecnológico. Por fim, a descarbonização dos transportes requer a ampliação do acesso a combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil e infraestrutura de distribuição adequada.

A partir destes desafios, estratégias para o alcance das metas definidas no cenário de Descarbonização da cadeia do arroz, focando em recomendações para o governo do Estado, são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Estratégias para a cadeia do arroz e alinhamento com planos e programas estaduais

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Plantio em Cultivo Mínimo em 50% da área cultivada, Plantio Direto Consorciado em 50% da área plantada, e Fixação biológica de nitrogênio (FBN) em 50% da área cultivada, até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar a adoção do cultivo mínimo, plantio direto consorciado e uso de FBN por meio de assistência técnica com cooperação com instituições especializadas, a academia, empresas e entidades de órgãos públicos; Promover ações de sensibilização e capacitação de técnicos e produtores em práticas de cultivo mínimo, plantio direto consorciado e uso de FBN; Desenvolver linhas de crédito específicas e políticas de incentivo econômico para produtores que adotem essas práticas; Estimular a pesquisa e a disseminação de tecnologias adaptadas ao cultivo mínimo, plantio direto consorciado e FBN em arroz; Implementar programas de fomento, monitoramento e avaliação para acompanhar a expansão das práticas. 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p> <p>Operação Terra Forte</p>
Sistema de irrigação por inundação intermitente em 100% da área de arroz irrigado até 2050.	<ul style="list-style-type: none"> Implementar programas de apoio a projetos de implantação ou ampliação de sistemas de irrigação por inundação intermitente; Construir, adequar ou ampliar reservatórios de água para fins de irrigação por inundação intermitente; Incentivar a reserva de água nas propriedades rurais, de forma adequada, sob o ponto de vista técnico e ambiental; Proporcionar condições aos agricultores para modernizar suas atividades, obter mais renda e estabilidade financeira. 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Programa de Irrigação</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Utilização de inibidores de metano em 100% da área de arroz irrigado até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Apoiar produtores rurais na adoção de inibidores de metano em áreas de arroz irrigado; Oferecer assistência técnica e capacitação sobre tecnologias de agricultura de baixa emissão de carbono de forma geral; Disponibilizar incentivos financeiros para agricultores familiares implementarem inibidores de metano; Estabelecer parcerias institucionais para execução e monitoramento das ações. 	<p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p> <p>Operação Terra Forte</p>
Aprimoramento do manejo de resíduos, projetando-se um aumento anual de 5% até 2050 na taxa de aproveitamento dos resíduos agrícolas.	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar a implantação e expansão da cadeia de biodigestores no estado; Promover a gestão adequada de resíduos, reduzindo riscos de contaminação de solo e água nas regiões produtoras e gerando biogás e biofertilizantes; Garantir o tratamento eficiente de resíduos orgânicos, em especial os provenientes do agronegócio; Ampliar a participação de energias renováveis oriundas de resíduos, como biogás e biometano, na matriz energética estadual; Estimular a geração de empregos e renda adicional para agricultores por meio do manejo sustentável de resíduos. 	<p>Programa Biogás-RS</p>
Eficientização e troca de fonte energética dos processos de beneficiamento de 5% a.a. até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Implementar programas de eficiência energética nas indústrias de beneficiamento de arroz; Estimular a substituição gradual do uso do óleo combustível e fontes fósseis em geral por fontes renováveis; Criar linhas de crédito e incentivos fiscais para modernização de maquinário na cadeia; Promover pesquisas sobre cogeração de energia a partir da casca de arroz; Monitorar o crescimento das taxas de eficiência e descarbonização nos processos de beneficiamento no Estado. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Descarbonização do RS: A Estratégia do Rio Grande do Sul para Reduzir os Impactos Ambientais no Planeta</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Descarbonização do transporte, alcançando 95% de redução de emissões de GEE em 2050	<ul style="list-style-type: none"> Ver estratégias detalhadas na Tabela 1. 	<p>Ver planos e programas estaduais detalhados na Tabela 1.</p>

Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.4. PECUÁRIA

4.4.1. Metodologia e premissas adotadas

A projeção da produção de carne bovina e leite bovino no Rio Grande do Sul teve como insumo inicial a projeção do crescimento de carne de gado de 2,1% a.a. e de leite bovino de 1,5% a.a. (Angelkorte, 2023). O modelo BLUES foi utilizado como ferramenta para determinação das projeções. A pecuária bovina ocupa extensas áreas no RS, muitas vezes em pastagens de baixa produtividade, o que abre espaço para ganhos de eficiência. O potencial de expansão identificado por modelos integrados, como o BLUES, não está somente na ampliação da área, mas sim na intensificação produtiva, por meio de práticas como manejo rotacionado, integração lavoura-pecuária (ILP), suplementação alimentar e melhoramento genético.

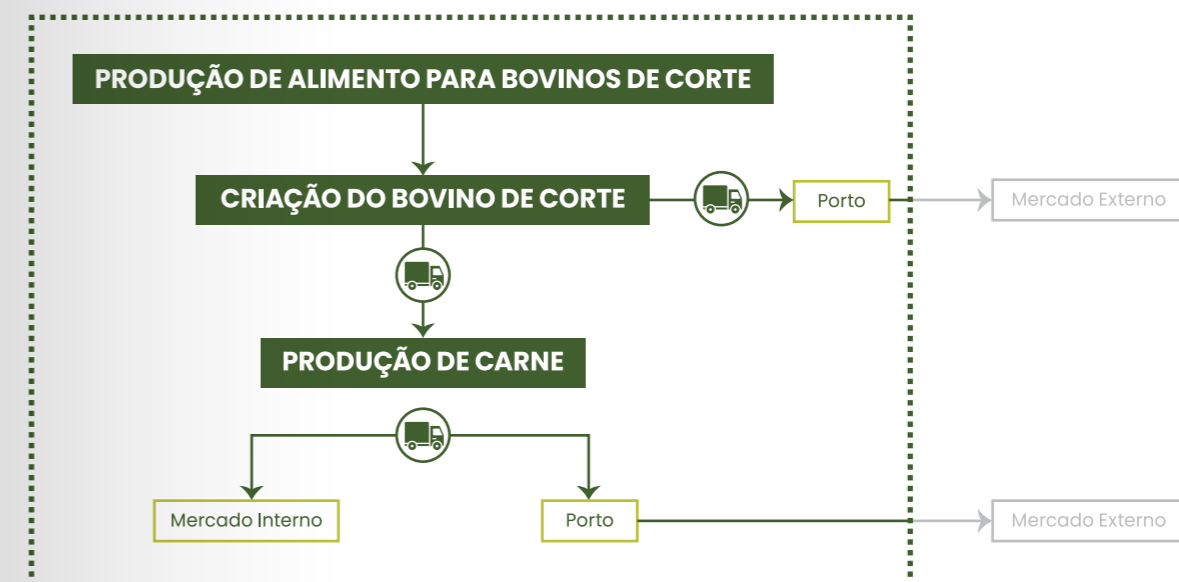
Para esse setor, foram utilizadas as seguintes classificações do inventário das cadeias:

1. Bovinos de Corte;
2. Bovinos Leiteiros;
3. Pastagens.

Nas Figuras 15 e 16, apresenta-se o recorte utilizado para o inventário (2018 a 2023) e projeções de emissões e remoções (2024 a 2050) das cadeias dos bovinos de corte e leiteiros.

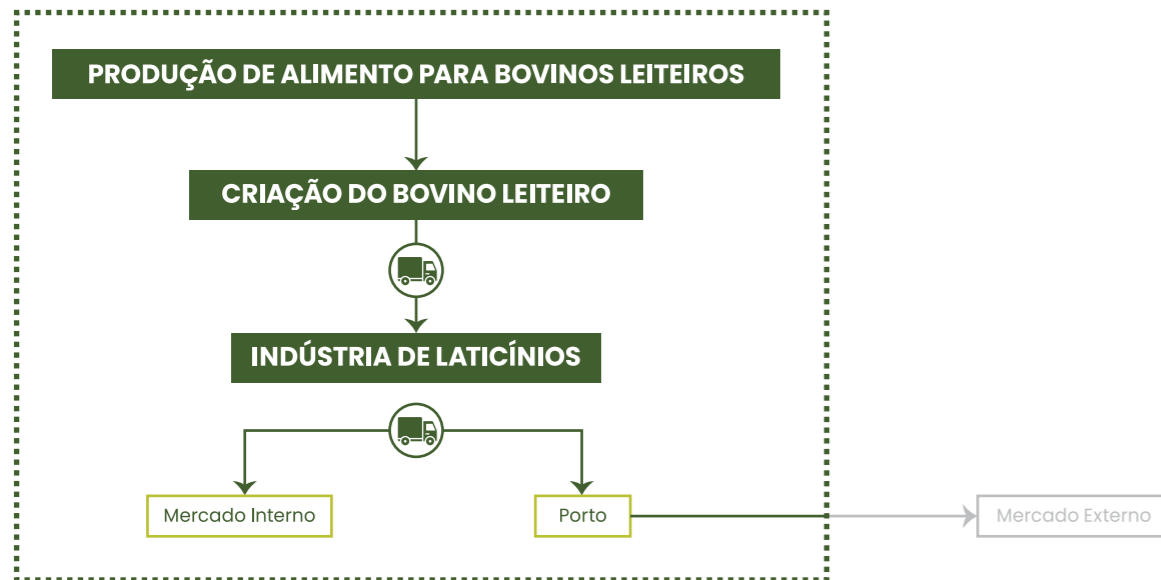
Adotou-se a produção de 2023, último ano de análise do inventário do setor, como ano-base para a projeção dos anos subsequentes, até 2050. Contudo, também foi necessário observar que o estado do Rio Grande do Sul já vem observando ganhos significativos de produtividade animal nas últimas décadas e, assim, conseguindo produzir maiores quantidades de leite e carne bovina com um rebanho menor (IBGE, 2024a; Rio Grande do Sul, 2025c). Assim, utilizou-se uma projeção também da quantidade de rebanho animal no Rio Grande do Sul de acordo com dados do IBGE, que apontou uma diminuição do rebanho de bovinos de corte de -0,6% a.a. e de bovinos leiteiros de -0,7% a.a.

Figura 15: Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia dos bovinos de corte



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 16: **Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia dos bovinos leiteiros**



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Cenário BAU

Para o desenvolvimento do cenário BAU, utilizou-se o crescimento inicial de 2,1% a.a. para carne bovina e de 1,5% a.a. para leite bovino como premissa principal para a expansão das emissões de GEE para as etapas de produção, distribuição e processamento de carnes e laticínios. Enquanto isso, utilizou-se a diminuição de rebanho inicial de -0,6% a.a. para bovinos de corte e de -0,7% a.a. para bovinos leiteiros para as etapas de alimentação animal e criação, de acordo com o inventário previamente desenvolvido, o qual demonstrou uma maior eficiência da produção de carne e leite no período. Para a categoria de "Mudança do Uso da Terra" foi considerada a média dos anos do inventário seguida por uma diminuição progressiva da necessidade de expansão de área decorrente da redução dos rebanhos bovinos.

Cenário Descarbonização

Para o cenário Descarbonização, considerou-se que essa mesma expansão da produção pecuária no estado do Rio Grande do Sul poderia vir associada a sistemas de produção mais disruptivos e com menores níveis de emissão GEE. Assim, foi considerada a implementação das seguintes medidas:

- **Adoção de 25% de sistemas integrados nas áreas de produção de bovinos de leite e de corte até 2050 em áreas não degradadas;**

Esse sistema consiste na produção combinada entre diferentes sistemas produtivos, como lavoura, pecuária e florestas (ou silvicultura) em uma mesma região e pode gerar benefícios econômicos e para redução da pegada de carbono (Rio Grande do Sul, 2025b). Atualmente, não se têm dados precisos do percentual de participação dos sistemas integrados na pecuária do Estado, mas estima-se que no Rio Grande do Sul existam cerca de 2,2M de hectares de sistemas integrados, sem especificação das áreas com integração com pecuária (Rede ILPF, 2025, Rio Grande do Sul, 2023). Esse sistema gera benefícios significativos tanto para o aumento da produtividade do gado, como para a diminuição dos GEE decorrentes da redução da fermentação entérica advinda por melhores níveis de alimentação e aumento do conforto térmico do animal, além da estocagem de CO₂ tanto abaixo quanto acima do solo. Estima-se que, além da redução da fermentação entérica, o sistema proporcione um aumento de carbono no solo de cerca de 3,4 tCO₂e/ha, sendo 50% deste fator alocado para a cadeia da pecuária (Angelkorte, 2023; BRASIL, 2023a).

- **Recuperação de 40% da área de pastagens degradadas até 2050;**

A recuperação de pastagem apresenta um potencial importante tanto para possibilitar o aumento da taxa de lotação animal, quanto para o aumento do estoque de carbono no solo, visto que as gramíneas passam a apresentar um maior vigor e assim, aumentam a profundidade e a distribuição do sistema radicular. Dentre outras estratégias, a recuperação de pastagens pode ser realizada com a adoção da rotação de pastagens, sistema produtivo que permite que haja um aumento na taxa de lotação animal. A recuperação de pastagens degradadas tem o potencial de aumentar o estoque de carbono no solo em 3,8 tCO₂e/ha/ano (BRASIL, 2023a).

- **Adoção de 60% dos bovinos de corte sendo produzidos em sistemas de terminação intensiva até 2050;**

A terminação intensiva é uma estratégia importante para reduzir a intensidade de emissão de GEE na pecuária, sobretudo quando os animais são abatidos mais jovens. Ao encurtar o ciclo produtivo, diminui-se o tempo de emissão de metano entérico, já que o gado passa menos tempo vivo produzindo este gás. Além disso, as dietas de alta densidade energética típicas do período em que o gado está sendo produzido no sistema de terminação intensiva aumentam a eficiência alimentar, resultando em maior ganho de peso por unidade de alimento e, conseqüentemente, menor emissão por quilo de carne produzida. Outro benefício é a possibilidade de manejar dejetos de forma controlada, com potencial para reduzir emissões de metano e óxido nitroso e até gerar energia renovável via biodigestores. Dessa forma, embora a terminação intensiva demande maior uso de insumos, ela se mostra eficaz em reduzir a pegada de carbono por quilo de carne quando comparada a sistemas extensivos de engorda a pasto de ciclo longo. Foi considerado um potencial de mitigação de 35% do CO₂e (Angelkorte, 2023).

- **Adoção de melhoramento genético de 25% de todo o rebanho do Rio Grande do Sul;**

A adoção do melhoramento genético de 25% do rebanho bovino do Rio Grande do Sul é de extrema importância para aumentar a eficiência produtiva, a rentabilidade e a sustentabilidade da pecuária no Estado. Animais geneticamente superiores apresentam maior ganho de peso, melhor conversão alimentar, precocidade sexual e qualidade de carne, atendendo tanto às demandas do mercado interno quanto externo. Além disso, rebanhos mais eficientes geram menor emissão de GEE por quilo de carne produzida. Quando implementado em larga escala, o melhoramento genético potencializa resultados de forma coletiva, tornando a pecuária gaúcha mais competitiva, moderna e alinhada às exigências econômicas e ambientais atuais. O melhoramento genético tem o potencial de mitigar 18% das emissões de GEE (Rosa et al., 2013; BRASIL, 2017a).

- **Manejo de 50% dos dejetos dos animais em sistemas de confinamento ou semiconfinamento até 2050;**

Esse tipo de manejo é fundamental para tornar a pecuária mais sustentável e alinhada às metas de redução de GEE. Ao adotar práticas como biodigestão, compostagem e separação sólido-líquido, é possível diminuir significativamente as emissões de metano e óxido nitroso, transformar resíduos em biofertilizantes e gerar biogás como fonte de energia renovável. Além de reduzir impactos ambientais, essa estratégia promove a economia circular, melhora a saúde e o bem-estar animal e contribui para a competitividade da atividade pecuária, tornando-a mais eficiente e resiliente diante dos desafios climáticos e de mercado. Foi considerado um potencial de mitigação de 1,3 tCO₂e/ha (BRASIL, 2023a).

- **Utilização de tecnologias de fixação biológica de nitrogênio em 30% das pastagens em consórcio com o cultivo de soja até 2050;**

A FBN tem importância para a sustentabilidade da pecuária e da agricultura. A FBN reduz a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos, cuja produção e aplicação estão associadas a elevadas emissões de GEE e altos custos de produção. Em pastagens consorciadas, leguminosas fixadoras de nitrogênio

enriquecem o solo de forma natural, melhorando a fertilidade, aumentando a produtividade da forragem e reduzindo a degradação dos campos. Além disso, a integração com a soja potencializa os benefícios, já que essa cultura é altamente eficiente na simbiose com bactérias fixadoras, favorecendo a ciclagem de nutrientes e diminuindo a necessidade de insumos químicos. Adotou-se a implementação dessa tecnologia em toda a área de sistemas integrados, logo, o valor de 30% segue a premissa inicial de implementação dessa tecnologia. A esta ação, soma-se a agricultura de precisão, com a utilização de sensores, drones e softwares para monitoramento das variações do solo e otimização do uso de fertilizantes, possibilitando a redução de emissões decorrentes da utilização destes insumos.

- **Utilização de inibidores de metano em 50% dos animais em sistema de confinamento ou semiconfinamento até 2050;**

Os inibidores de metano são uma estratégia importante para reduzir significativamente a pegada de carbono da pecuária. Esses aditivos atuam diretamente no processo de fermentação entérica, diminuindo a produção de metano no rúmen sem comprometer a saúde ou o desempenho produtivo dos bovinos. Estudos apontam reduções expressivas, que podem chegar a 40% das emissões entéricas, tornando-se uma das soluções mais eficazes para mitigação de GEE no setor (Angelkorte, 2023).

- **Redução de 100% da supressão de áreas de vegetação nativa até 2050;**

A supressão de vegetação nativa implica a remoção de estoques de carbono presentes na biomassa e no solo, resultando em emissões permanentes de GEE para a atmosfera e na perda de serviços ecossistêmicos essenciais, como a

regulação climática, a proteção da biodiversidade e a manutenção da qualidade do solo e da água. Por isso, é fundamental que a expansão ou modificação das áreas de pecuária, caso aconteça, não ocorra sobre áreas de vegetação nativa.

- **Melhoramento do Pampa nativo em áreas produção de bovinos ou em áreas de produção devido ao aumento da produtividade e da taxa de lotação;**

É importante destacar que no estado do Rio Grande do Sul, já há uma adoção de práticas de pastejo de bovinos em áreas de Pampa, contudo, a medida proposta é uma melhoria dessa área, de modo que ela possa ser comparada com o Pampa nativo, com ou sem a adição de bovinos na área. Foi adotado o mesmo fator de remoção associado a recuperação de pastagens degradadas, 3,8 tCO₂e/ha/ano (BRASIL, 2023a).

- **Eficientização e descarbonização da produção de carne e leite;**

Medidas de efficientização e descarbonização nos processos industriais incluem: eletrificação de processo, combinado com a obtenção de energia de fontes renováveis, recuperação de calor, caldeiras a biomassa/biogás e modernização de frigoríficos/laticínios.

- **Nos transportes, considerou-se um avanço na descarbonização do setor, alcançando 95% em 2050;**

Utilização de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil para o transporte, com implementação linear a partir de 2035.

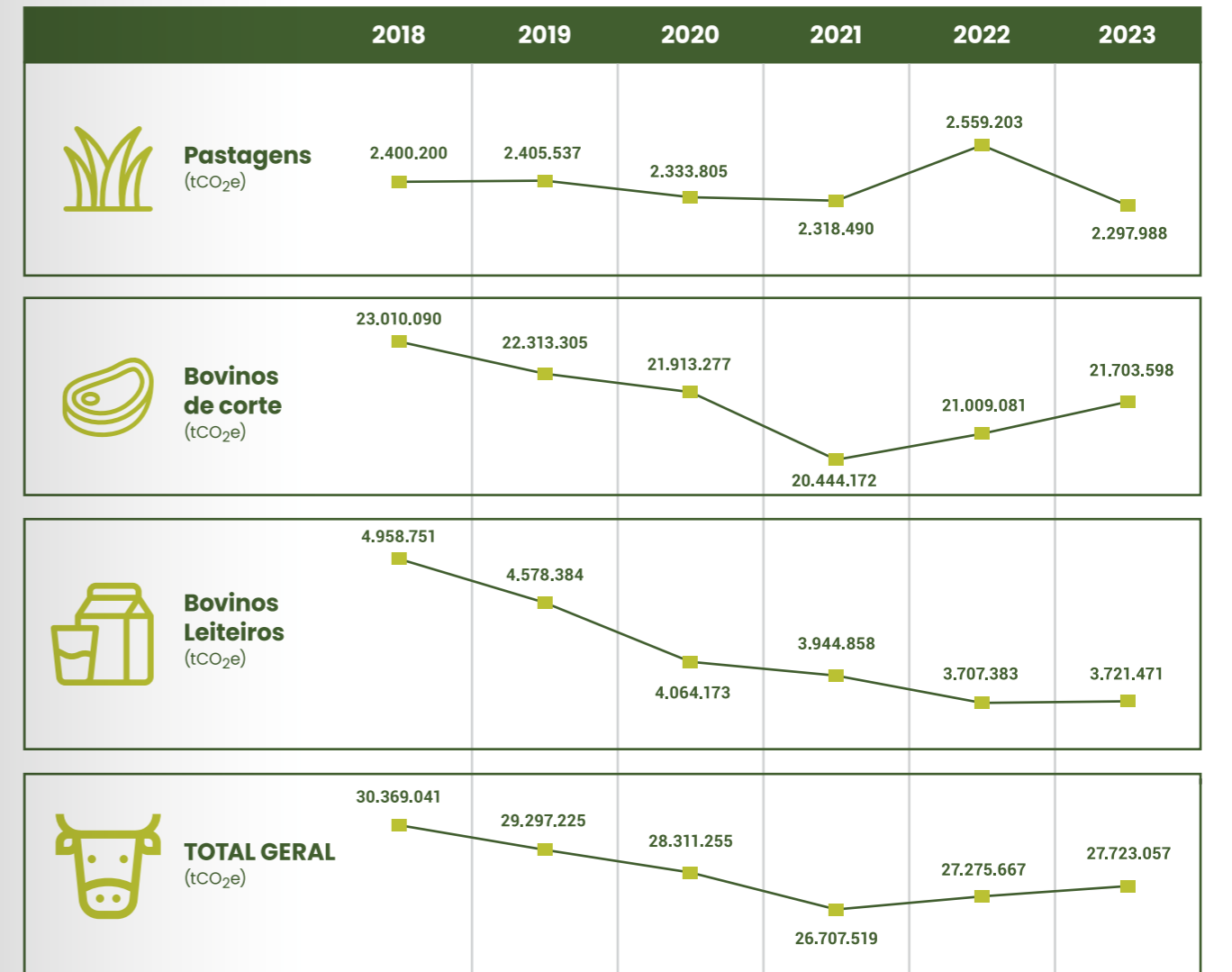
4.4.2. Resultados

O inventário da pecuária no Rio Grande do Sul foi estruturado em três segmentos: bovinos de corte, bovinos leiteiros e pastagens. As emissões da cadeia concentram-se na criação (especialmente fermentação entérica), responsável pela maior parcela de emissões nos bovinos de corte e leite. Em 2023, por exemplo, na cadeia de corte, a criação representa 99% das emissões do segmento. A fermentação entérica é a maior parcela, seguida por emissões de dejetos. As etapas de movimentação, frigoríficos e transporte têm peso menor, mas são relevantes para a trajetória

de queda, dado o potencial de descarbonização via eficiência e combustível limpo.

A etapa de pastagens se mostra decisiva, uma vez que ela inclui tanto as emissões e remoções por mudança do uso da terra (MUT), quanto as emissões associadas a fertilizantes e resíduos agrícolas aplicados às áreas forrageiras. Por isso, há um potencial, com integração lavoura-pecuária (ILP/ILPF), rotação, recuperação de áreas e melhora do Pampa nativo, com esta categoria deixando de ser emissora para se tornar um sumidouro significativo ao longo do horizonte. As emissões das grandes etapas do inventário são apresentadas na Figura 17.

Figura 17: Emissões e remoções da cadeia da pecuária do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023 (tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

■ Emissão líquida de GEE

No cenário BAU, a produção cresce nas taxas setoriais, a intensidade de carbono cai lentamente, e as medidas de mitigação ficam restritas ao que já está em curso. No transporte, assume-se o transporte sem emissão direta de CO₂ fóssil em 20% em 2030 e estabilidade neste patamar até 2050. O resultado agregado é uma trajetória quase estável de emissões totais, com quedas marginais por unidade de produto. A fermentação entérica permanece como a principal fonte emissora do inventário; o solo não se torna sumidouro de carbono e o bloco de pastagens mantém-se ligeiramente emissor. Frigoríficos e laticínios reduzem pouco pela via da eficiência incremental.

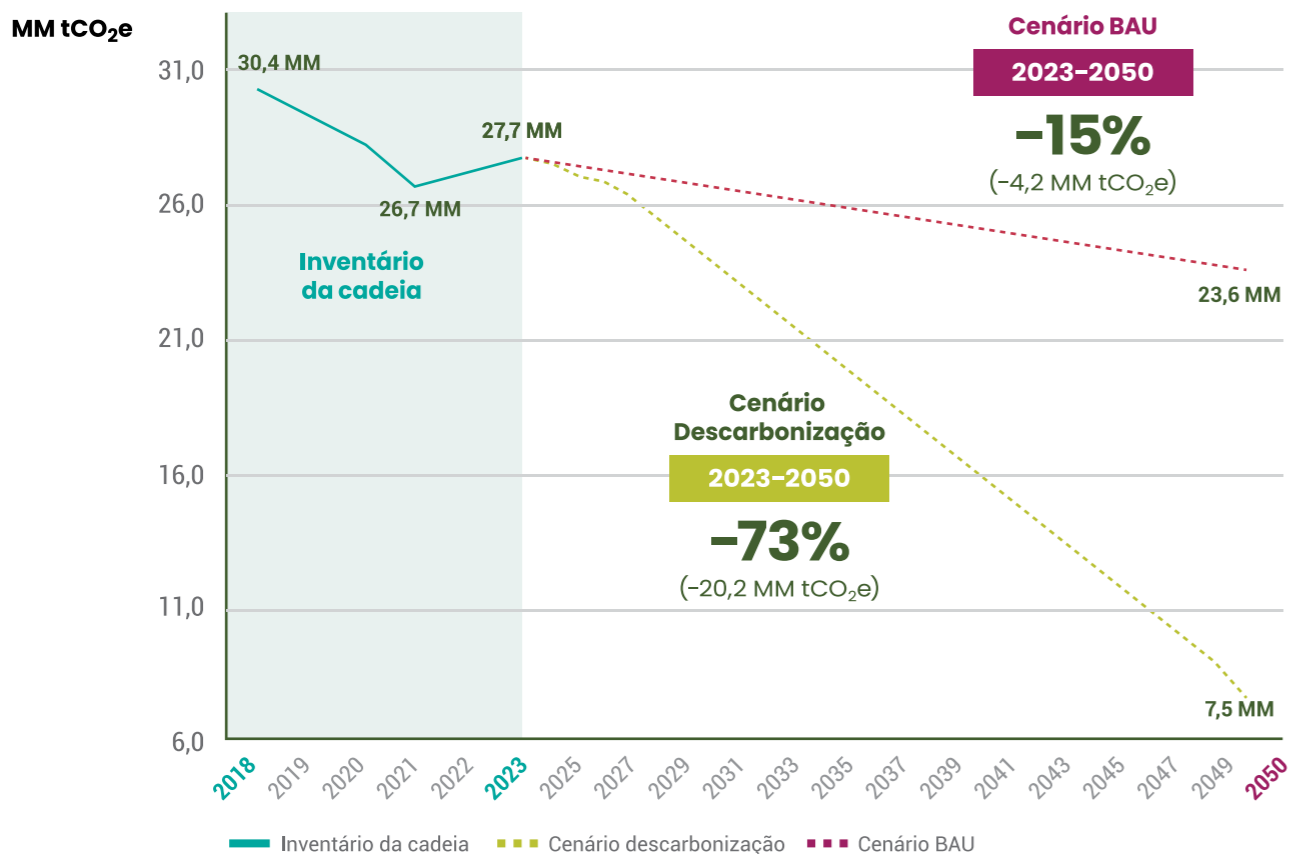
O cenário de Descarbonização combina intensificação produtiva e alavancas tecnológicas. A área de referência de 2023 é mantida e ajustada via ILP/ILPF (25%), rotação de pastagens e recuperação de pastagens degradadas (40%), terminação intensiva (60% do abate de corte), melhoramento genético (25% do rebanho), manejo de dejetos (50%

no (semiconfinamento), FBN em 30% das pastagens consorciadas, inibidores de metano (50% dos animais confinados/semiconfinados), supressão zero de vegetação nativa e melhoria do Pampa nativo. Além disso, o uso de transporte sem emissão direta de CO₂ fóssil cresce linearmente desde 2035 até 95% em 2050.

Com a implementação dessas medidas, o total agregado cai de 27,73 MM tCO₂e (2023) para 7,48 MM tCO₂e (2050), ou seja, redução de cerca de 73%. As emissões da cadeia de corte recuam de 21,70 MM tCO₂e (2023) para cerca de 14,1 MM tCO₂e (2050). Já a cadeia leiteira, de 3,72 MM tCO₂e para 2,45 MM tCO₂e. Por sua vez, as pastagens se tornam um grande sumidouro que promove a captura de 9,03 MM tCO₂e em 2050. O fator de emissão por cabeça reduz de 2,31 tCO₂e/cabeça (2023) para 0,74 tCO₂e/cabeça (2050), refletindo ciclo mais curto, dieta, genética e manejo.

As projeções do cenário BAU e Descarbonização são apresentadas na Figura 18.

Figura 18: **Projeção de emissões da cadeia da pecuária no cenário BAU e Descarbonização, de 2024 a 2050 (MM tCO₂e)**



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O impacto de cada uma das ações propostas é apresentado na Tabela 4, para os anos 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050, com os resultados comparativos do cenário BAU com o cenário de Descarbonização.

Tabela 4: **Impactos das ações de mitigação na cadeia da Pecuária no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO₂e)**

Ação de mitigação	2025		2030		2035	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Melhoramento de pastagens e FBN	-292.998	91,8%	-1.910.433	70,7%	-4.219.442	71,3%
Redução do metano entérico	0	0,0%	-485.724	18,0%	-1.054.488	17,8%
Manejo de dejetos e bioenergia	0	0,0%	-216.802	8,0%	-483.873	8,2%
Eficientização na produção de carne e leite	-26.171	8,2%	-91.889	3,4%	-159.982	2,7%
Descarbonização do transporte	0	0,0%	0	0,0%	-5.092	0,1%
Total (Descarbonização - BAU)	-319.168	100%	-2.702.819	100%	-5.920.841	100%

Ação de mitigação	2040		2045		2050	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Melhoramento de pastagens e FBN	-6.520.551	70,9%	-8.840.672	70,6%	-10.951.343	68,1%
Redução do metano entérico	-1.631.234	17,7%	-2.235.919	17,9%	-3.287.625	20,4%
Manejo de dejetos e bioenergia	-746.575	8,1%	-1.004.907	8,0%	-1.258.871	7,8%
Eficientização na produção de carne e leite	-227.742	2,5%	-295.315	2,4%	-365.800	2,3%
Descarbonização do transporte	-69.954	0,8%	-140.628	1,1%	-216.572	1,3%
Total (Descarbonização - BAU)	-9.194.015	100%	-12.515.397	100%	-16.078.161	100%

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Assim, pode-se destacar cinco grandes blocos de mitigação:

1. **Melhoramento de pastagens e FBN:** ILP/ILPF (25%), rotação e recuperação de pastagens (40%) elevam forragem/ha, aumentam carbono (C) no solo e liberam áreas sem abrir novas fronteiras. Com FBN em pastagens consorciadas, cai a dependência de nitrogênio (N) sintético (e o N₂O associado). O bloco de pastagens sai do positivo no cenário BAU (1,92 MM tCO₂e) e torna-se sumidouro líquido (até

9,01 MM tCO₂e de captura em 2050), sustentando grande parte do salto de produção do sistema.

2. **Metano entérico:** Três ações possibilitam a redução destas emissões: (i) inibidores de CH₄ no semiconfinamento; (ii) ciclo mais curto com 60% de abate em terminação intensiva e melhora de dieta/manejo; (iii) melhoramento genético em 25% do rebanho, aumentando ganho de peso e conversão. No agregado, a fermentação entérica (corte + leite) reduz de 17,72 MM tCO₂e (cenário BAU) para 14,43

MM tCO₂e (cenário Descarbonização) (-18,6%), com forte redução da intensidade por kg de produto.

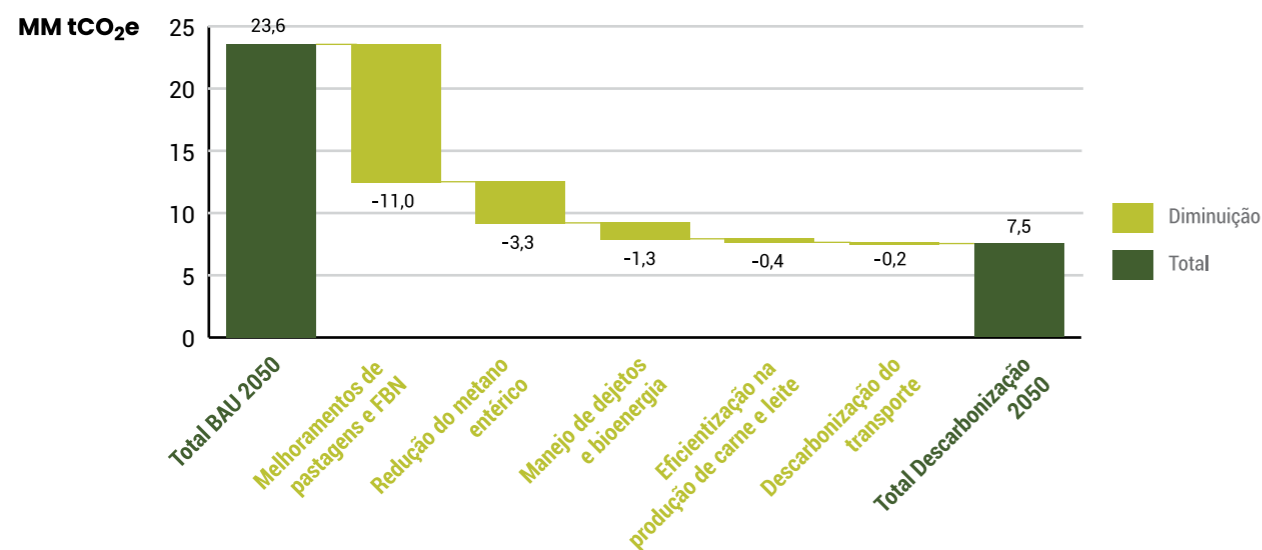
3. **Manejo de dejetos e bioenergia:** Em semiconfinamento, biodigestores/compostagem reduzem CH₄/N₂O e geram biogás/biometano, que substitui diesel/GLP em equipamentos ou calor de processo (incluindo em frigoríficos e laticínios), enquanto o biofertilizante fecha o ciclo de nutrientes. As ações tratadas reduzem as emissões associadas a dejetos de 2,97 MM tCO₂e, no cenário BAU, para 1,71 MM tCO₂e, no Descarbonização, uma redução de 42%, além do cobenefício energético.
4. **Energia na produção e processamento:** As medidas de eletrificação e eficiência dos processos possibilita uma redução de 54,9% das emissões da indústria, reduzindo as emissões de 0,67 MM tCO₂e no cenário BAU para 0,30 MM tCO₂e no cenário Descarbonização.
5. **Descarbonização do transporte:** Entre 2035 e 2050, a participação de combustíveis/veículos sem emissões diretas de CO₂ fóssil sobe linearmente até 95%, com as emissões de transporte alcançando níveis residuais. A redução totaliza 0,22 MM tCO₂e.

Para um resumo e visualização das ações que possibilitam a diferença entre o cenário BAU e descarbonização, em 2050, ver Figura 19.

A pecuária gaúcha tem uma trilha de descarbonização factível quando a produtividade animal e de pastagens se convertem em ciclos curtos, dietas mais densas, genética, ILP/ILPF e FBN, com a paisagem do Pampa passando a remover carbono. Assim, duas alavancas respondem pela maior parte do abatimento: reduzir metano na fonte animal e transformar pastagens de passivo marginal em ativo produtivo e de carbono.

Do lado do rebanho, o arranjo de Descarbonização combina encurtamento de ciclo e terminação intensiva, melhoramento genético em escala e utilização de inibidores de metano. Em paralelo, o manejo de dejetos (biodigestão, compostagem, separação sólido-líquido) nos sistemas intensivos amplia a redução de emissões e ainda gera biogás/biofertilizantes. Do lado das áreas, a melhoria das pastagens e do Pampa nativo fornece remoções adicionais por um período relevante. Com essas ações, e uma logística que também reduz as suas emissões diretas para quase zero até 2050, a pecuária consegue dissociar produção e emissões: menos tCO₂e por kg de carne/leite, menos pressão territorial e melhor posição competitiva.

Figura 19: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE da cadeia da pecuária, comparando cenário BAU e descarbonização, em 2050 (MM tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.



Foto: Acervo Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura - SEMA-RS

4.4.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização

4.4.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia da pecuária

O aprimoramento da coleta de dados para a elaboração do inventário da cadeia da pecuária pode ocorrer com a adoção das seguintes estratégias sugeridas:

Recomenda-se estudos locais sobre:

- Uso local de fertilizantes nas pastagens;
- Fermentação entérica dos bovinos do RS;
- Consumo de ração pelos bovinos e emissões da cadeia dos insumos que compõem a ração;
- Emissões dos frigoríficos e produção de laticínios;
- Emissões e remoções associadas a áreas de (I) ILP(F), (II) vigor das pastagens e (III) conversão de áreas de mosaicos de agricultura e pastagem, considerando o cultivo de pastagens e os biomas e características do RS.
- Sugere-se que os Órgãos Ambientais Locais passem a solicitar inventários de emissões aos frigoríficos e indústria de laticínios para uma estimativa mais precisa das emissões destas instalações.

4.4.3.2. Estratégias para o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais

A descarbonização da cadeia pecuária também encontra desafios técnicos, econômicos e regulatórios, que acarretam dificuldades para a consecução das metas estabelecidas. Dentre os desafios, cita-se a necessidade de alto investimento inicial, capacitação técnica e políticas de incentivo para promover a adoção dos sistemas integrados e a recuperação de pastagens degradadas por produtores de diferentes portes. A demanda por investimento, infraestrutura e assistência técnica para a intensificação da terminação e melhoramento genético. Monitoramento de emissões, capacitação e investimento em inovação para o manejo de dejetos e o uso de inibidores de metano. Já a eliminação da supressão de vegetação nativa e o melhoramento do Pampa nativo dependem de políticas robustas de conservação e restauração desta vegetação. Por fim, a eficiência e a descarbonização da produção de carne e leite requerem inovação tecnológica e uma estabilidade de suprimento de energia renovável.

Apoiadas nestes e outros desafios e limitações, as estratégias para a cadeia da pecuária, referente às metas definidas no cenário de Descarbonização, com recomendações ao governo do estado, são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4: **Estratégias para a cadeia da pecuária e alinhamento com planos e programas estaduais**

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Adoção de 25% de sistemas integrados nas áreas de produção de bovinos de leite e de corte até 2050 em áreas não degradadas	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar a adoção de sistemas integrados por meio de linhas de crédito específicas e incentivos fiscais; Promover a sensibilização e capacitação técnica de produtores rurais sobre boas práticas de integração de sistemas produtivos; Estimular a recuperação de pastagens degradadas através dos sistemas integrados; Apoiar projetos de pesquisa e desenvolvimento que adaptem modelos de ILPF às condições do estado; Implementar programas de certificação e rastreabilidade para valorizar carne e leite produzidos em sistemas sustentáveis. 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Recuperação de 40% da área de pastagens degradadas até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Mapear e monitorar áreas de pastagens degradadas no estado, identificando prioridades para recuperação; Criar e implementar programas de fomento à adoção de práticas de rotação de pastagens; Criar linhas de crédito e subsídios específicos para recuperação de pastagens, integrando práticas de conservação; Incentivar o uso de técnicas de recuperação como plantio direto; Promover capacitação de produtores rurais em manejo sustentável de pastagens e boas práticas de recuperação; Desenvolver o uso de indicadores de sustentabilidade no monitoramento das práticas; Fomentar a integração de pastagens recuperadas com sistemas de agricultura de baixo carbono, como ILPF. 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>PROVEG/RS</p> <p>Operação Terra Forte</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Adoção de 60% dos bovinos de corte sendo produzidos em sistemas de terminação intensiva até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Estimular investimentos em infraestrutura adequada para terminação intensiva; Criar linhas de crédito e incentivos fiscais para produtores rurais que adotem terminação intensiva; Promover capacitação técnica nas práticas sustentáveis que envolvem terminação intensiva; Integrar práticas de terminação intensiva com estratégias de agricultura de baixo carbono, como a produção de biogás; Apoiar pesquisas e difusão de tecnologias na temática; Estabelecer protocolos de bem-estar animal e certificação. 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Adoção de melhoramento genético de 25% de todo o rebanho do Rio Grande do Sul	<ul style="list-style-type: none"> Expandir a certificação de produtos premium como estratégia de valorização econômica e ambiental da pecuária estadual; Incentivar programas de melhoramento genético voltados para aumento da produtividade; Fortalecer programas de fomento à produção de alimentos certificados, com rastreabilidade e selo premium; Financiar pesquisas em biotecnologia e genética animal. 	<p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Manejo de 50% dos dejetos dos animais em sistemas de confinamento ou semiconfinamento até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar a instalação de biodigestores e tecnologias de aproveitamento energético dos dejetos (biogás e biofertilizantes); Estabelecer normas técnicas e protocolos para o armazenamento, transporte e uso dos dejetos; Capacitar produtores rurais sobre o manejo e aproveitamento de dejetos como insumo agrícola; Promover projetos-piloto e parcerias para o desenvolvimento de sistemas bioenergéticos a partir de dejetos animais. 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Embrapa Pecuária Sul</p>
Utilização de tecnologias de fixação biológica de nitrogênio (FBN) em 30% das pastagens em consórcio com o cultivo de soja até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar o uso da fixação biológica de nitrogênio em sistemas integrados de pastagens e soja como alternativa aos fertilizantes sintéticos; Promover capacitação técnica de produtores em manejo de consórcios de pastagens com a soja; Desenvolver linhas de crédito específicas e políticas de incentivo econômico para produtores que adotem essas práticas; Estimular parcerias entre universidades, cooperativas e setor produtivo para ampliar a escala de adoção de FBN; Criar mecanismos de certificação e valorização de produtos oriundos de sistemas que utilizam tecnologias de FBN; 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Utilização de inibidores de metano em 50% dos animais em sistema de confinamento ou semiconfinamento até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Apoiar produtores na adoção de inibidores de metano; Oferecer assistência técnica e capacitação sobre tecnologias de agricultura de baixa emissão de carbono de forma geral; Disponibilizar incentivos financeiros para produtores implementarem inibidores de metano; Estabelecer parcerias institucionais para execução e monitoramento das ações. 	<p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Redução de 100% da supressão de áreas de vegetação nativa até 2050	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar a adoção de sistemas integrados, promovendo recuperação de áreas degradadas e conservação da vegetação nativa; Criar áreas de exclusão para proteger a vegetação nativa e conservar a biodiversidade; Oferecer aos produtores rurais certificação que comprove a adoção de melhores práticas e técnicas de produção ambientalmente sustentáveis; Estimular a expansão de pastagens em áreas já antropizadas ou de uso consolidado; Ampliar programas de rastreamento e certificação da carne que comprovem origem em áreas livres de desmatamento; Apoiar financeiramente e tecnicamente pecuaristas na recuperação de Áreas de Preservação Permanente e Reservas Legais; 	PROVEG/RS Programa Campos do Sul PEPSA: Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais
Melhoramento do Pampa nativo em áreas de produção de bovinos ou áreas liberadas, devido ao aumento da produtividade e da taxa de lotação	<ul style="list-style-type: none"> Estimular a adoção de sistemas de manejo rotacionado de pastagens; Incentivar práticas de restauração e manejo sustentável do Pampa nativo; Oferecer assistência técnica e capacitação para pecuaristas sobre intensificação sustentável e conservação do bioma; Desenvolver linhas de crédito específicas para recuperação e conservação de áreas nativas; Implantar sistemas de monitoramento e georreferenciamento para acompanhar as atividades da pecuária no Pampa; 	PLANO ABC+ (2020-2030) Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável
Eficientização e descarbonização da produção de carne e leite	<ul style="list-style-type: none"> Implementar programas de eficiência energética nas indústrias de produção de carne e leite; Estimular a substituição gradual do uso do óleo combustível e fontes fósseis em geral por fontes renováveis; Criar linhas de crédito e incentivos fiscais para modernização de maquinário na cadeia; Monitorar o crescimento das taxas de eficiência e descarbonização nos processos de beneficiamento no estado 	Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas Programa H2V-RS Pró-Etanol Programa Biogás-RS Incentivos para fotovoltaica
Descarbonização do transporte, alcançando 95% de redução de emissões de GEE em 2050	<ul style="list-style-type: none"> Ver estratégias detalhadas na Tabela 1. 	Ver planos e programas estaduais detalhados na Tabela 1.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.5. SOJA

4.5.1. Metodologia e premissas adotadas

Para o setor de sojicultura, foi utilizada a taxa constante de crescimento de 1,2% para projetar o aumento de produção de soja no estado (Angelkorte, 2023). A construção desta taxa utilizou o modelo BLUES como ferramenta para determinação das projeções. O modelo BLUES, ao simular a expansão dessa cultura, considera variáveis como o custo de conversão de terras e da produtividade esperada em cada região para determinar o quanto será demandado a mais de cada uma dessas regiões. Assim, o potencial de crescimento da soja não somente se limita à disponibilidade de área, mas

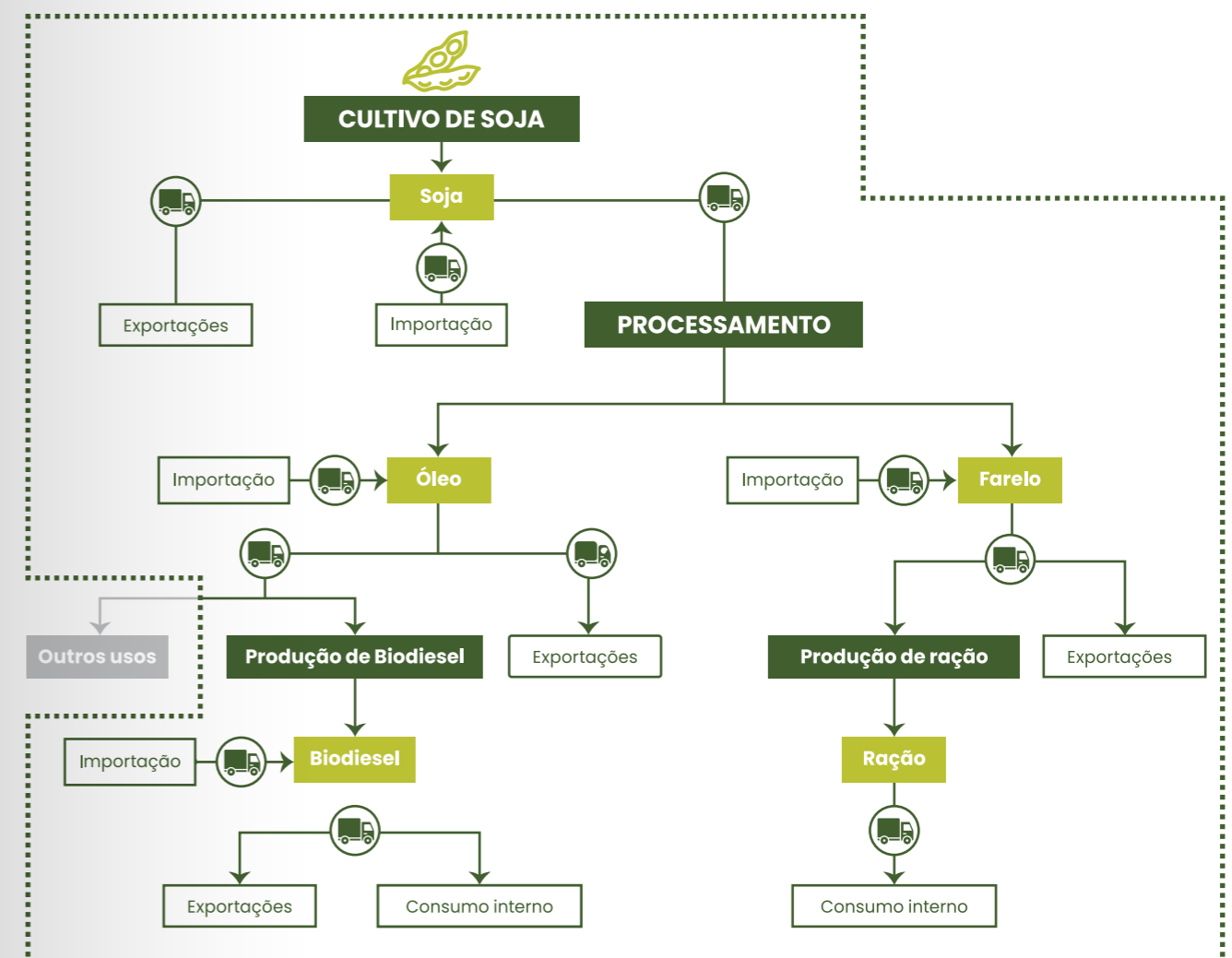
também à viabilidade econômica e às projeções de crescimento tecnológico das lavouras ao longo do tempo.

Para esse setor, considerou-se, conforme inventário, as seguintes etapas da cadeia:

1. Cultivo da Soja;
2. Processamento da Soja;
3. Exportação; e,
4. Importação.

Na Figura 20, apresenta-se o recorte utilizado para o inventário (2018 a 2023) da cadeia da soja.

Figura 20: Recorte para contabilização das emissões e remoções de GEE da cadeia da soja



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Com isso, tomou-se a produção de 2021 como ano base para a projeção dos anos subsequentes, até 2050, visto que os anos 2020, 2022 e 2023 foram anos de perdas significativas oriundas dos impactos climáticos sobre a produção de soja no estado do Rio Grande do Sul.

É importante salientar que o setor da sojicultura é um setor que tem sido demasiadamente atingido por interferências das mudanças climáticas e, com isso, perdido grandes quantidades de produto para eventos extremos e pragas. Por isso, foram considerados apenas anos em que esses efeitos foram mais reduzidos para o estado do Rio Grande do Sul.

Cenário BAU

Para o desenvolvimento do cenário BAU, foi assumida a premissa de manutenção da intensidade de carbono da produção, de maneira que as emissões de GEE seguiram a mesma taxa de crescimento da produção, de 1,2% ao ano. A exceção foi a categoria de "Mudança do Uso da Terra", para a qual se assumiu como premissa a manutenção das emissões anuais para os anos projetados em um valor constante, obtido como a média das emissões dos anos de 2018, 2019 e 2021 (anos não impactados por eventos extremos).

Adicionalmente, para as etapas que envolvem transporte, considerou-se a implementação planejada do programa Combustível do Futuro, assumindo-se que, partindo de 15% em 2024, o uso de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil no setor de transportes chegará a um valor de 20% em 2030, mantendo-se nesse patamar até 2050.

Cenário Descarbonização

Para o cenário Descarbonização, considerou-se um nível de crescimento da produção de soja no estado do Rio Grande do Sul no mesmo nível do cenário BAU, de 1,2% a.a. Este aumento de produção foi combinado com um aumento de produtividade no mesmo patamar (1,2% a.a.), o qual pode ocorrer principalmente devido a ganhos de produtividade inerentes à utilização de sistemas de produção mais disruptivos e com menores níveis de emissão de

GEE, conforme o levantamento prévio de opções de descarbonização para o setor.

Além disso, tomou-se como premissa que, apesar do aumento da produtividade do setor, o produtor rural não reduziria a área de produção de soja no Rio Grande do Sul até 2050. Assim, há a oportunidade de aumentar a produção de soja sem diminuir ou aumentar a quantidade de área plantada. Para este cenário, foi considerada a implementação das seguintes medidas:

- **Aumento da produtividade da soja, com meta de aumento anual de 1,2% a.a., alcançando 4,2 t/ha, em média, até 2050;**

Atualmente, a produtividade da cultura da soja está em torno de 3,1 t/ha (Rio Grande do Sul, 2024b), contudo, algumas regiões, principalmente com níveis de irrigação adequados, possuem produtividades atuais de 4,5 t/ha (Oliveira et al., 2021; Pigatto et al., 2023). Assim, torna-se plausível a expectativa de que até 2050 o estado consiga aumentar a sua produtividade média a níveis mais elevados. Esse ponto é importante em razão da possibilidade de não ampliar as áreas de produção de soja no Estado, visto que a produtividade cresce no mesmo nível da demanda.

- **Implementação de 100% da área da soja no estado do Rio Grande do Sul com a adoção da fixação biológica de nitrogênio e adubação de precisão no cultivo;**

Atualmente, de acordo com dados do Inventário, cerca de 85% da área de soja atualmente produzida utiliza sistemas de produção com FBN. O alcance dos 100% reduziria a necessidade de aplicação do nitrogênio sintético no cultivo. A esta ação, soma-se a adubação de precisão, com a utilização de sensores, drones e softwares para monitoramento das variações do solo e otimização do uso de fertilizantes, possibilitando a redução de emissões decorrentes da utilização destes insumos.

- **Aumento da participação de sistemas integrados na produção de soja no estado do Rio Grande do Sul, totalizando 25% da área até 2050;**

Esta ação é importante tanto para auxiliar no aumento da produtividade, quanto para aumentar o estoque de carbono abaixo e acima do solo na região. Estima-se que o sistema proporcione um aumento de carbono no solo de cerca de 3,4 tCO₂e/ha, sendo 50% deste fator foi alocado para a cadeia da soja (Angelkorte, 2023; BRASIL, 2023a).

- **Redução de 100% da supressão de áreas de vegetação nativa até 2050;**

A supressão de vegetação nativa leva à liberação dos estoques de carbono armazenados na biomassa e no solo, ocasionando emissões permanentes de GEE e comprometendo serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação climática, a conservação da biodiversidade e a qualidade do solo e da água. Por isso, é fundamental evitar a supressão desta vegetação.

- **Aprimoramento do manejo de resíduos, projetando-se um aumento anual de 5% até 2050 na taxa de aproveitamento dos resíduos agrícolas;**

A estratégia visa aumentar a eficiência de uso dos resíduos agropecuários para geração de biocombustíveis, biofertilizantes e demais aplicações, reduzindo em cerca de 70% as emissões associadas às emissões de carbono desses resíduos.

- **Descarbonização do transporte e combustível sem emissão direta de CO₂ fóssil no cultivo, alcançando 95% em 2050;**

Utilização de combustíveis ou outras fontes energéticas sem emissões diretas de CO₂ fóssil no transporte, com implementação linear a partir de 2035. Além do transporte, a mesma ação é implementada na utilização de combustível para o cultivo.

- **Eficiência energética e uso de combustíveis renováveis no processamento da soja e produção de ração, com projeção de redução anual linear até o alcance do zero líquido em 2050;**

As ações incluem adoção de sistemas de cogeração, melhoria do isolamento de caldeiras,

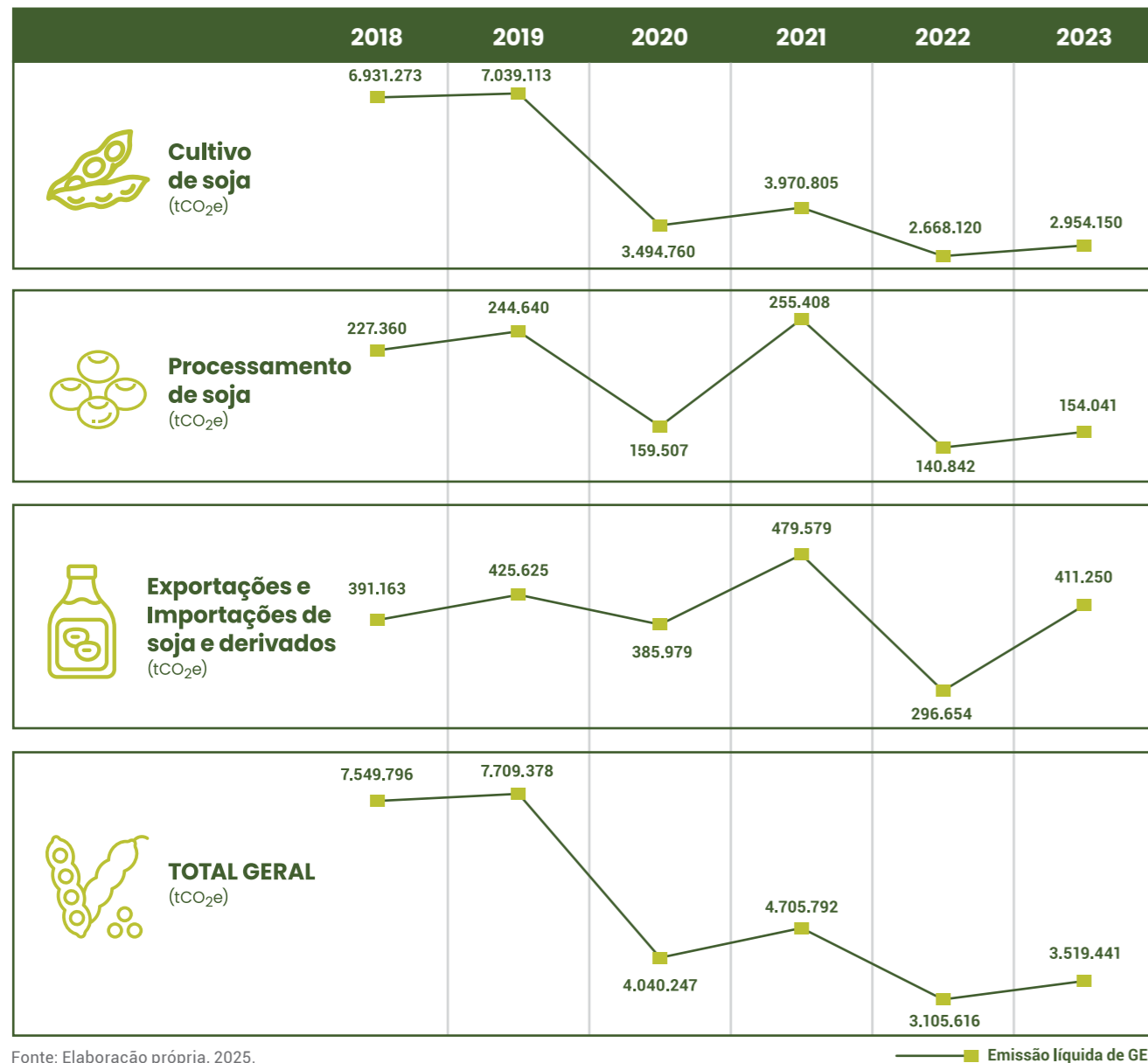
recuperação de calor e valor, manutenção de bombas e caldeiras, otimização dos sistemas de ar comprimido, dentre outras (Brasil, 2017b). A redução de emissões também pode ser alcançada com a eletrificação de sistemas e compra de energia elétrica renovável e, na geração de efluentes, com a produção de biogás com a captura do metano produzido no tratamento.



4.5.2. Resultados

A sojicultura no RS é majoritariamente de sequeiro, mecanizada e com alta adoção de tecnologia. O inventário organiza-se em três grandes frentes: cultivo da soja (resíduos agrícolas, MUT, calagem e fertilização e uso do diesel no cultivo), transporte e beneficiamento, e transporte para exportação e importação da soja e seus subprodutos. No período inventariado, 2018 a 2023, as maiores fontes de emissão do setor estavam concentradas na etapa de cultivo, a qual é responsável por 84% a 92% das emissões da cadeia, principalmente em razão de MUT e resíduos agrícolas. Nas outras etapas, o transporte da soja e seus subprodutos é a principal fonte de emissão. A Figura 21 consolida de forma gráfica as emissões e remoções por etapa da cadeia da soja no período analisado (2018 a 2023).

Figura 21: Emissões e remoções da cadeia da soja do Rio Grande do Sul, 2018 a 2023

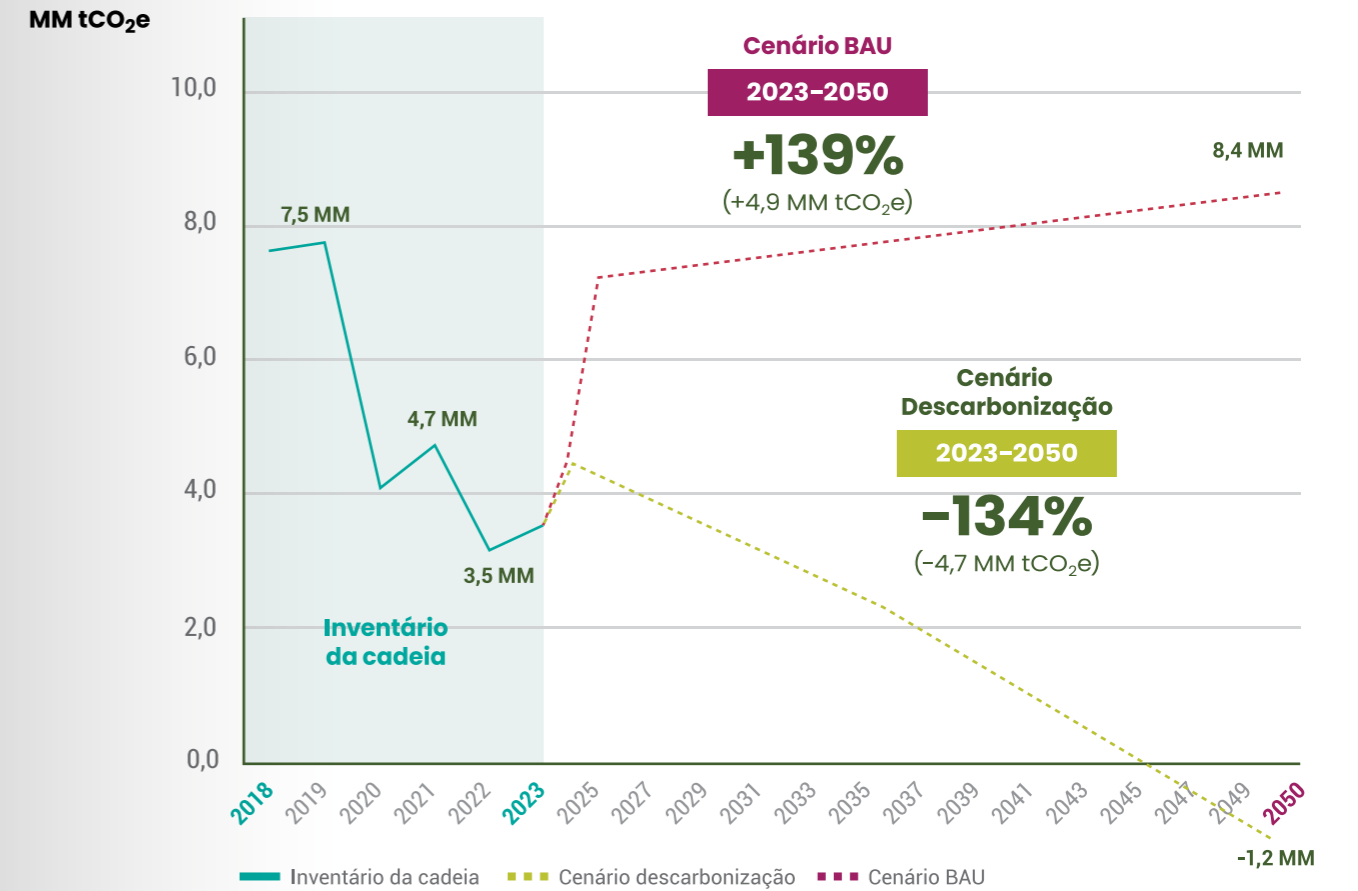


No cenário BAU, a produção cresce com produtividade incremental e o padrão tecnológico atual. A intensidade (tCO₂e/t) é mantida, refletindo a manutenção dos modos de cultivo atuais. MUT segue no mesmo patamar do período inventariado. No transporte, os combustíveis/veículos Transporte sem emissão direta de CO₂ fóssil chegam a 20% em 2030 e estabilizam até 2050, o que limita a queda do bloco logístico.

O cenário de Descarbonização zera a pressão por área e troca expansão horizontal por salto de produtividade: plantio direto maduro, rotação com cobertura, calagem e gessagem de precisão, FBN robusta, adubação em taxa variável, pós-colheita

eletrificada/renovável e logística quase sem emissão direta de CO₂ fóssil. O bloco MUT atinge supressão zero, os solos assumem um papel central na descarbonização, acumulando carbono e queda de fertilização nitrogenada, e a etapa industrial (produção de biodiesel e ração) se descarboniza, com a substituição de fontes fósseis por fontes renováveis e produção de biogás. Combinado à eletrificação e ao aumento de eficiência energética, o resultado típico é uma trajetória de queda contínua da intensidade, com redução substancial do total agregado mesmo com produção maior. As projeções do cenário BAU e Descarbonização são apresentadas na Figura 22.

Figura 22: Projeção de emissões da cadeia da soja no cenário BAU e Descarbonização, de 2024 a 2050 (MM tCO₂e)



O impacto de cada uma das ações propostas é apresentado na Tabela 5, para os anos 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050, com os resultados comparativos do cenário BAU com o cenário de Descarbonização.

Tabela 5: Impactos das ações de mitigação na cadeia da soja no cenário Descarbonização, comparado ao cenário BAU (tCO₂e)

Ação de mitigação	2025		2030		2035	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Implementação de Sistemas integrados	-118.373	4,1%	-710.235	17,4%	-1.302.098	24,8%
Desmatamento zero	-2.486.532	86,4%	-2.486.532	61,0%	-2.486.532	47,5%
Gestão de resíduos agrícolas	0	0,0%	-503.602	12,4%	-941.725	18,0%
Descarbonização do transporte e do uso de combustíveis no cultivo	-273	0,0%	-491	0,0%	-30.527	0,6%
Redução de Nitrogênio e Calagem	-231.046	8,0%	-318.201	7,8%	-405.355	7,7%
Descarbonização no processamento de soja e produção de ração	-40.770	1,4%	-57.772	1,4%	-74.022	1,4%
Total (Descarbonização - BAU)	-2.876.994	100%	-4.076.833	100%	-5.240.259	100%

Ação de mitigação	2040		2045		2050	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
Implementação de Sistemas integrados	-1.893.960	28,2%	-2.485.823	30,5%	-3.077.685	32,1%
Desmatamento zero	-2.486.532	37,1%	-2.486.532	30,5%	-2.486.532	25,9%
Gestão de resíduos agrícolas	-1.324.399	19,8%	-1.660.469	20,4%	-1.957.616	20,4%
Descarbonização do transporte e do uso de combustíveis no cultivo	-415.469	6,2%	-839.580	10,3%	-1.299.626	13,5%
Redução de Nitrogênio e Calagem	-492.510	7,3%	-579.665	7,1%	-666.820	7,0%
Descarbonização no processamento de soja e produção de ração	-91.721	1,4%	-104.887	1,3%	-104.887	1,1%
Total (Descarbonização - BAU)	-6.704.591	100%	-8.156.956	100%	-9.593.167	100%

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Para tanto, é importante destacar seis grandes blocos de medidas de mitigação para o setor:

- 1. Arquitetura de plantio e carbono de solo:** A adoção de sistemas integrados proporciona tanto o aumento da produtividade, quanto o aumento do estoque de carbono abaixo e acima do solo na região. Projeta-se que a implementação dos sistemas integrados em 25% das áreas de plantio de soja no estado proporcione uma remoção de 3,1 MM tCO₂e.
- 2. Supressão zero de nativas:** Toda a expansão de produção vem de produtividade, não de área nova. Ao manter supressão zero e priorizar restauração/adequação onde couber, o bloco MUT deixa de ser fonte relevante de emissões e a volatilidade de emissões do inventário reduz. Esta ação proporciona uma redução de emissões em relação ao cenário BAU de 2,41 MM tCO₂e.
- 3. Gestão de resíduos da lavoura:** A utilização de resíduos apresenta crescimento progressivo (+5% a.a.), alcançando aproximadamente 70% de redução das emissões associadas até 2050. Nesse processo, a palha e os subprodutos deixam de representar um passivo emissor e passam a ser integrados em rotas de produção de biocombustíveis e biofertilizantes, contribuindo para a mitigação de metano e óxido nitroso no campo e para a redução de emissões indiretas ao longo da cadeia de insumos.
- 4. Logística e uso de combustível no cultivo sem emissões diretas de CO₂ fóssil:** Adoção acelerada (2035-2050) de combustíveis/veículos sem emissões diretas de CO₂ fóssil (eletricidade, biometano, misturas avançadas, hidrogênio verde, onde fizer sentido) até 95% em 2050. Na prática, o transporte do grão/derivados vira uma fonte residual de emissões.

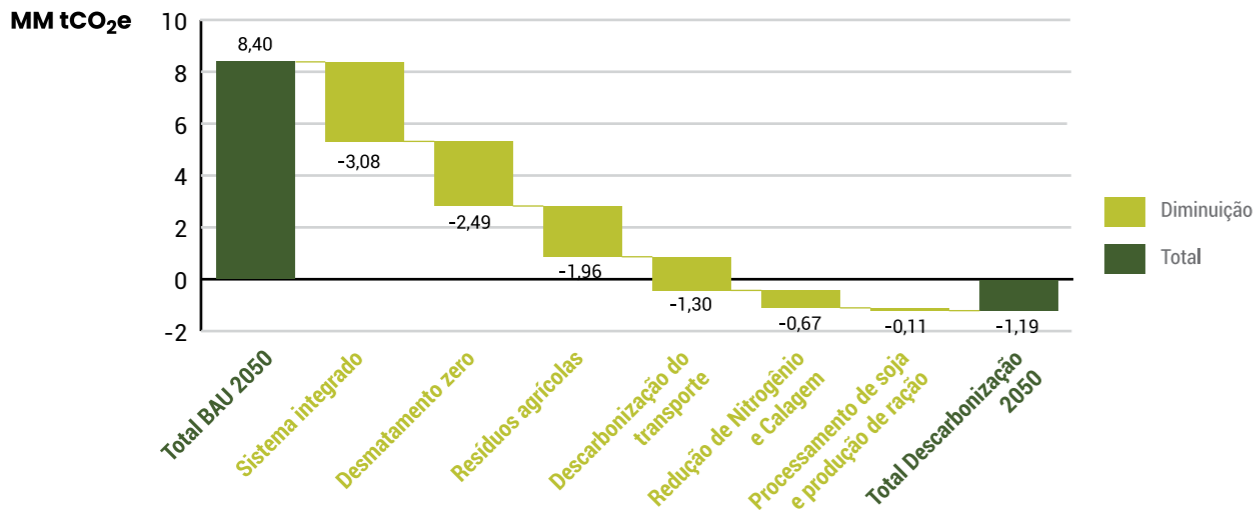
5. Fertilização sob controle (FBN + adubação de precisão): FBN de alto desempenho (inoculação/coinoculação e manejo correto) reduz a necessidade de N sintético; calagem/gessagem e P/K em taxa variável elevam eficiência, reduzindo o N₂O e o carbono embutido nos insumos. O bloco de solos manejados entra em queda sustentada. Estas ações proporcionam uma redução de 0,67 MM tCO₂e.

6. Pós-colheita e processamento eficientes e renováveis: A transição energética da indústria associada à cadeia da soja, eletrificação de sistemas, aquisição de energia elétrica renovável, produção de biogás a partir do tratamento de efluentes, medidas de eficiência energética e compensação de emissões residuais possibilita o alcance do líquido zero nessas etapas da cadeia. Estas ações possibilitariam uma redução de 0,11 MM tCO₂e da cadeia da soja.

Um resumo e visualização das ações que possibilitam a diferença entre o cenário BAU e descarbonização, em 2050, é apresentado na Figura 23.

A soja no RS tem dois trunfos de descarbonização, o solo e a MUT. Quando o sistema integrado é implementado em 20% da área de produção de soja e a supressão de vegetação nativa é eliminada, o inventário perde suas maiores fontes e variabilidades. Ao somar FBN + precisão nos insumos, pós-colheita renovável/eficiente e logística limpa, o setor consegue crescer em volume enquanto reduz em emissões de GEE – e com resiliência maior frente à variabilidade climática.

Figura 23: Impacto das ações de mitigação de emissões de GEE da cadeia da soja, comparando cenário BAU e descarbonização, em 2050 (MM tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.5.3. Estratégias para implementação do cenário Descarbonização

4.5.3.1. Medidas para a melhoria do inventário de emissões da cadeia da soja

As ações voltadas ao aperfeiçoamento da coleta de dados para estimar as emissões e remoções da cadeia da soja são propostas abaixo.

Recomenda-se estudos locais sobre:

- Uso local de fertilizantes na soja;
- Processamento da soja no RS;
- Produção de ração a partir da soja;
- Transporte da soja para exportação e decorrente da importação;
- Emissões e remoções associadas a áreas de (I) ILP(F), (II) métodos de cultivo (SPD, PD e PC) e (III) conversão de áreas de mosaicos de agricultura e pastagem, considerando a cultura da soja e os biomas e características do RS.

4.5.3.2. Estratégias para o cenário Descarbonização e Alinhamento com Planos e Programas Estaduais

A descarbonização da cadeia produtiva da soja também apresenta desafios a serem superados. Dentre estes obstáculos, cita-se a necessidade contínua em pesquisa agrônômica e pesquisa sobre resistência a estresses climáticos a fim de garantir o aumento de produtividade. Além disso, investimento financeiro e capacitação técnica são necessárias para a adubação de precisão, ampliação de sistemas integrados, manejo de resíduos. Há ainda o desafio geral de monitoramento dessas novas práticas, além do incentivo para que elas sejam incorporadas em médias e pequenas propriedades.

Com base nos desafios existentes, no Quadro 5, são apresentadas estratégias para a cadeia da soja, com recomendações ao governo do Estado, tendo como referência as metas definidas no cenário de Descarbonização.

Quadro 5: Estratégias para a cadeia da soja e alinhamento com planos e programas estaduais

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Aumento da produtividade da soja, com meta de aumento anual de 1,2% a.a., alcançando 4,2 t/ha, em média, até 2050	<ul style="list-style-type: none"> • Incentivar a adoção de boas práticas agrícolas e de sistemas de plantio direto; • Promover o uso de sementes geneticamente melhoradas e adaptadas às condições climáticas locais; • Estimular a rotação de culturas e sistemas integrados de produção para reduzir pragas e aumentar a eficiência do uso do solo; • Expandir o acesso a assistência técnica e capacitação para produtores rurais; • Apoiar a implementação e o desenvolvimento de inovações tecnológicas; • Ampliar o acesso a incentivos financeiros direcionados para práticas de alta produtividade com baixa emissão; • Fortalecer parcerias com instituições de pesquisa e empresas especializadas. 	<p>Programa Campos do Sul</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p>
Implementação de 100% da área da soja no estado do Rio Grande do Sul com a adoção da fixação biológica de nitrogênio e adubação de precisão no cultivo	<ul style="list-style-type: none"> • Incentivar a adoção da FBN e agricultura de precisão por meio de assistência técnica com cooperação com instituições especializadas, a academia, empresas e entidades de órgãos públicos; • Promover ações de sensibilização e capacitação de técnicos e produtores para ampliar o uso da FBN e agricultura de precisão; • Estimular pesquisas e difusão tecnológica para aumentar a eficiência da FBN e da agricultura de precisão; • Implementar programas de fomento, monitoramento e avaliação para acompanhar a expansão da prática. 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p> <p>Agricultura de precisão</p>
Aumento da participação de sistemas integrados na produção de soja no estado do Rio Grande do Sul, totalizando 25% da área até 2050	<ul style="list-style-type: none"> • Incentivar a adoção de sistemas integrados por meio de linhas de crédito específicas e incentivos fiscais; • Promover a sensibilização e capacitação técnica de produtores rurais sobre boas práticas de integração de sistemas produtivos; • Estimular a recuperação de áreas degradadas através dos sistemas integrados; • Apoiar projetos de pesquisa e desenvolvimento que adaptem modelos de ILPF as condições do estado; 	<p>PLANO ABC+ (2020-2030)</p> <p>Plano de Desenvolvimento Econômico, Inclusivo e Sustentável</p> <p>Certificação de sistemas agroflorestais</p>
Redução de 100% da supressão de áreas de vegetação nativa até 2050	<ul style="list-style-type: none"> • Ver estratégias detalhadas na Tabela 4. 	<p>Ver planos e programas estaduais detalhados na Tabela 4.</p>

Meta do cenário Descarbonização	Estratégias	Plano / Programa estadual com o qual a meta está relacionada
Aprimoramento do manejo de resíduos, projetando-se um aumento anual de 5% até 2050 na taxa de aproveitamento dos resíduos agrícolas.	<ul style="list-style-type: none"> Ver estratégias detalhadas na Tabela 3. 	Ver planos e programas estaduais detalhados na Tabela 3.
Descarbonização do transporte e combustível sem emissão direta de CO ₂ fóssil no cultivo, alcançando 95% de redução de emissões de GEE em 2050	<ul style="list-style-type: none"> Ver estratégias detalhadas na Tabela 1. 	Ver planos e programas estaduais detalhados na Tabela 1.
Eficiência energética e uso de combustíveis renováveis no processo de processamento da soja e produção de ração, com projeção de redução anual linear até o alcance do zero líquido em 2050	<ul style="list-style-type: none"> Implementar programas de eficiência energética nas indústrias produção de biodiesel, farelo e ração animal; Estimular a substituição gradual do uso do óleo combustível e fontes fósseis em geral por fontes renováveis; Criar linhas de crédito e incentivos fiscais para modernização de maquinário na cadeia; Monitorar o crescimento das taxas de eficiência e descarbonização nos processos de processamento da soja, no estado. 	<p>Proclima2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas</p> <p>Programa H2V-RS</p> <p>Pró-Etanol</p> <p>Programa Biogás-RS</p> <p>Incentivos para fotovoltaica</p>

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Capítulo 05

CONSIDERAÇÕES FINAIS



Foto: Acervo Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura - SEMA-RS

As projeções apresentadas neste relatório para as cadeias produtivas do arroz, pecuária, petroquímica, silvicultura e da soja no Rio Grande do Sul oferecem uma visão sobre as tendências de emissões e remoções de GEE no estado até 2050 em dois cenários, BAU e Descarbonização. Os resultados evidenciam tanto oportunidades de redução e remoção de GEE associadas a ações aplicadas às cadeias quanto riscos de aumento de emissões associados à manutenção de padrões atuais de produção. Embora as projeções apresentem tendências e não previsões determinísticas, esse panorama permite identificar os pontos críticos e as potencialidades de cada cadeia, subsidiando a formulação de estratégias que conciliem desenvolvimento econômico, competitividade e metas climáticas de longo prazo.

A análise das emissões e remoções de GEE por cadeia produtiva demonstra o valor de uma abordagem mais detalhada para a gestão climática estadual. Esta forma inovadora de projetar as emissões, estruturada a partir da lógica das cadeias, permite identificar com precisão os principais pontos

de intervenção e orientar ações mais consistentes rumo à descarbonização. Esta primeira entrega, que proporcionou um aprendizado significativo aos atores envolvidos, estabelece as bases para aprimoramentos contínuos. Para avançar nessa direção, já estão em curso articulações voltadas a qualificar a base de dados e reduzir lacunas, ampliando a robustez das próximas fases do trabalho.

Com relação aos resultados apresentados, as projeções para o Rio Grande do Sul mostram que, no cenário BAU, as emissões setoriais tendem a crescer de forma contínua, acompanhando a expansão da produção agrícola, pecuária e industrial do Estado, embora para a cadeia da pecuária e arroz já estejam previstas reduções de emissões de GEE pela melhoria da eficiência do setor, mesmo nesse cenário. Essa trajetória reflete a manutenção das práticas atuais, sem adoção significativa de novas tecnologias de mitigação, o que limita a capacidade do Estado de alinhar-se às metas nacionais e as metas de neutralidade climática já assumidas.

No cenário de Descarbonização, entretanto, verifica-se que a incorporação de tecnologias

disruptivas e práticas de baixo carbono possibilita uma redução significativa das emissões líquidas até 2050. Na cadeia Petroquímica, cujas principais medidas são a ampliação da produção de biopolímeros e a implementação do CCS, o impacto acumulado de todas as medidas alcançaria uma redução de 62,0 milhões tCO₂e entre 2023 e 2050, quando comparado o cenário Descarbonização com o cenário BAU. Na Silvicultura, o alcance do desmatamento zero e do transporte sem emissões diretas de CO₂ fóssil, dentre outras medidas, possibilitaria uma redução acumulada de 73,8 milhões tCO₂e neste mesmo período. Já a cadeia do arroz, cujas principais medidas são redução de metano no cultivo irrigado e a eficiência energética e energia renovável na irrigação e beneficiamento, tem um potencial acumulado de reduzir 139,6 milhões tCO₂e.

Na cadeia da pecuária, focando-se prioritariamente da recuperação da pastagem degradada e em medidas para a redução do metano entérico, além das demais medidas elencadas neste relatório, estima-se um abatimento acumulado de 198,8 milhões tCO₂e associado ao setor. Por fim, estima-se uma redução acumulada de 158,6 milhões tCO₂e no setor da soja no período associada às ações descritas, sendo as de maior impacto e, portanto, prioritárias, a ampliação dos sistemas integrados de produção e o desmatamento zero de áreas nativas associado ao setor.

Nesse processo, os setores agropecuário e florestal emergem como peças decisivas para a neutralidade climática do RS. A capacidade de reduzir emissões expressivas e, ao mesmo tempo, a possibilidade de ampliar o papel da silvicultura e do setor agropecuário como sumidouros líquidos de carbono, oferecem ao estado uma vantagem estratégica frente ao desafio global. Assim, o fortalecimento dessas atividades torna-se essencial para que o RS avance de forma consistente rumo à neutralidade climática. A petroquímica, por sua vez,

ilustra que até setores tradicionalmente emissores podem se reposicionar como sumidouros líquidos, desde que haja investimento em inovação tecnológica e políticas adequadas de incentivo.

Há, contudo, barreiras. O custo de capital e o risco percebido podem travar investimentos em ações de mitigatórias, como irrigação automatizada, beneficiamento eficiente, biodigestores e ILPF. Por isso, o sucesso dessa transição depende da articulação entre políticas públicas, financiamento, pesquisa e mercado. Incentivos claros, integração entre produtores, universidades e empresas, além de instrumentos regulatórios que viabilizem investimentos em tecnologias de mitigação, são condições essenciais.

O exercício realizado reforça a necessidade de que o planejamento da descarbonização seja conduzido de forma integrada entre setores, reconhecendo que o ótimo sistêmico do Estado pode não coincidir com a descarbonização plena de cada cadeia produtiva isoladamente. Isso significa trabalhar com ótimos relativos, nos quais o esforço de abatimento em alguns setores pode compensar custos ou limitações em outros. Para isso, é essencial compreender as interdependências entre cadeias produtivas e priorizar ações em que o potencial de redução é mais eficiente. Essa abordagem permite ao estado otimizar recursos, acelerar resultados e construir uma trajetória de descarbonização mais equilibrada. Do mesmo modo, a estratégia estadual deve estar articulada a uma ótica nacional de descarbonização, aproveitando as vantagens comparativas de cada região do país em termos de recursos naturais, estrutura produtiva e oportunidades tecnológicas.

Ao seguir o cenário de Descarbonização, o Rio Grande do Sul poderá não apenas auxiliar o Brasil a atender à sua meta de neutralidade de emissões, mas também se posicionar como referência nacional e internacional em descarbonização setorial, conciliando crescimento econômico, sustentabilidade e competitividade.

REFERÊNCIAS

ANGELKORTE, G. B. **Modelagem do setor agropecuário dentro de modelo de análise integrada brasileiro**. res: Alexandre Salem Szklo; Alexandre de Carvalho Koberle. 2019. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: https://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/DISSERTA%C3%87%C3%83O_-_GERD_ANGELKORTE_Vers%C3%A3o_FINAL.pdf. Acesso em: 01 de jul. 2025

ANGELKORTE, G. B. **Oportunidades para a Transição sustentável da agropecuária brasileira**. Orientador: Pedro Rua Rodriguez Rochedo. 2023. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://ppe.ufrj.br/images/Tese-Gerd_Angelkorte.pdf. Acesso em: 01 de jul. 2025

BAYER, F. M. et al. **Estratégias de mitigação de gases de efeito estufa na produção de soja**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA IRRIGADA, 25., 2015, Aracaju. Anais [...]. Aracaju: Inovagri, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1038623/1/AnaisCBAI2015PalestraBayer.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Melhoramento genético auxilia na redução de gases de efeito estufa da pecuária**. Portal do Ministério da Agricultura, 14 set. 2017a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/melhoramento-genetico-auxilia-na-reducao-de-gases-de-efeito-estufa-da-pecuaria>. Acesso em: 26 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação (MCTI). **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de papel e celulose**. Brasília, 2017b. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/modelagem-setorial-de-opcoes-de-baixo-carbono-para-o-setor-de-papel-e-celulose.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação (MCTI). **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para Agricultura, florestas e outros usos do solo (AFOLU)**. Brasília, 2017c. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Setor-AFOLU.pdf. Acesso em: 28 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Metas do ABC+**. 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc/metas-do-abc>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Combustível do Futuro**. Brasília, 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BRASKEM. **ACV e pegada de carbono**. 2025a. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/imgreen/pegada-de-carbono>. Acesso em: 02 de jul. 2025.

BRASKEM. **Braskem amplia produção de biopolímeros em 30% com investimento de US\$ 87 milhões**. 2023. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/braskem-amplia-producao-de-biopolimeros-em-30-com-investimento-de-us-87-milhoes>. Acesso em: 02 de jul. 2025.

BRASKEM. **Ecoeficiência Operacional**. 2025b. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/ecoeficienciaoperacional>. Acesso em: 22 set. 2025.

BRASKEM. **Produtos: Biopolímeros**. 2025c. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/linha-de-produtos-interna#:~:text=A%20Braskem%20%C3%A9%20a%20maior,do%20efeito%20estufa%20na%20atmosfera>. Acesso em: 02 de jul. 2025.

CEBRI; BID; EPE; CENERGIA. **Programa de Transição Energética: Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil: Relatório Final da cooperação técnica ATN/OC-17965-BR**. Rio de Janeiro:

CEBRI, 2023. Disponível em: https://www.cebri.org/media/documentos/arquivos/PTE_RelatorioFinal_PT_Digital_.pdf. Acesso em: 09 set. 2025.

COSTA, J. M. F. N. et al. **Geração de créditos de carbono na queima de metano na carbonização**. Ciência da Madeira, v. 10, n. 1, p. 48–56, nov. 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/10636/8983>. Acesso em: 18 ago. 2025.

DE LIMA, C. Z. et al. **Potencial de mitigação de gases de efeito estufa das ações de descarbonização da produção de soja até 2030**. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getúlio Vargas - FGV-EESP, São Paulo, SP, Brasil. 2022. Disponível em: https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-02/potencial_de_mitigacao_de_gases_de_efeito_estufa_das_acoes_de_descarbonizacao_da_producao_de_soja_ate_2030.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Estatística de produção**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>. Acesso em: 20 jul. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manejo de altura das pastagens ajuda a mitigar gases de efeito estufa**. Embrapa, 17 fev. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/59298701/manejo-de-altura-das-pastagens-ajuda-a-mitigar-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 26 ago. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Lavoura de arroz apresenta custo de produção mais elevado em 2022**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/68080138/lavoura-de-arroz-apresenta-custo-de-producao-mais-elevado-em-2022>. Acesso em: 20 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relevância do setor de petróleo e gás natural para a transição energética. Bloco 7 – Descarbonização das atividades de refino de petróleo**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-809/Bloco%207%20-%20Descarboniza%C3%A7%C3%A3o%20do%20Refino.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa da Pecuária Municipal**. In: IBGE. **Sidra: sistema IBGE de recuperação automática**. Rio de Janeiro, 2024a, tab. 74. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/74>. Acesso em: 18 abr. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. In: IBGE. **Sidra: sistema IBGE de recuperação automática**. Rio de Janeiro, 2024b, tab. 291. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/291>. Acesso em: 6 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP). **O setor de óleo e gás brasileiro em um contexto de emissões líquidas nulas (net zero emissions)**. 2022. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2022/08/relatorio-ibp-cenergia-coppe.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2025.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ (IRGA). **Boletim de Resultados**. Porto Alegre, 2025. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/boletim-de-resultados>. Acesso em: 25 abr. 2025

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). **Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050**. Belo Horizonte, MG: SEMAD, 2022. Disponível em: https://liferay.meioambiente.mg.gov.br/documents/38374/7315750/Plano_de_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o/d10cddb-d86b6-5a62-d4db-7a7fab3c0a6?version=1.0&t=1723588220522. Acesso em: 4 ago. 2025.

OLIVEIRA, Z. et al. **Produtividade da soja em função da época da semeadura e da irrigação suplementar na região central do RS**. Irriga, Botucatu, v. 26, n. 4, p. 774-786, outubro-dezembro, 2021. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4103/3203>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PERNAMBUCO. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS). **Plano de descarbonização do Estado de Pernambuco**. Recife: SEMAS, 2022. Disponível em: https://semas.pe.gov.br/wp-content/uploads/2022/04/2022_03_16_plano_descarbonizacao_pernambuco-v7.pdf. Acesso em: 4 ago. 2025.

PIGATTO, G. et al. **Desempenho agrônomo de cultivares de soja com a utilização da irrigação suplementar na safra 2022-2023**. Plantio Direto e Tecnologia Agrícola, nov. 2023. Disponível em: <https://plantiodireto.com.br/artigos/1552>. Acesso em: 25 ago. 2025.

REDE ILPF; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Nota técnica Rede ILPF. Embrapa, 2023**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1354377/59272646/Nota+te%CC%81cnica+Rede+ILPF+.pdf/30ebc87e-0b06-996a-92f8-e5f28ebf2e0e>. Acesso em: 26 ago. 2025.

REDE ILPF. **ILPF em números**. 2025. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/ilpf-em-numeros/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. **Plano ABC+RS**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc/gge-abc/rio-grande-do-sul/plano-de-acao-estadual-pae/plano-de-acao-estadual-abc-rs-compactado.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. **Estudo aponta desafios e potencial da indústria química no Rio Grande do Sul**. Portal do Estado do Rio Grande do Sul, 20 maio 2025a. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/estudo-aponta-desafios-e-potencial-da-industria-quimica-no-rio-grande-do-sul>. Acesso em: 26 ago. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. **Governo do RS e Rede ILPF se unem para estimular a expansão do Sistema de Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta**. Portal do Estado do Rio Grande do Sul, 11 mar. 2025b. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/governo-do-rs-e-rede-ilpf-se-unem-para-estimular-a-expansao-do-sistema-de-integracao-lavoura-pecuaria-floresta>. Acesso em: 26 ago. 2025

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Fazenda (SEFAZ). **Planilha Carne Bovina 2018-2023**. Dados não publicados. Porto Alegre, 2025c.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação. **Caravana ILPF chega ao Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, RS: Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação, 15 abr. 2024a. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/caravana>. Acesso em: 26 ago. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação. **Plantio da soja no Rio Grande do Sul se aproxima do final**. Porto Alegre, RS: Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação, 26 dez. 2024b. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/plantio-da-soja-no-rio-grande-do-sul-se-aproxima-do-final>. Acesso em: 25 ago. 2025.

ROSA, A. N. et al. **Melhoramento genético aplicado em gado de corte: Programa Geneplus-Embrapa**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/980414/1/MelhoramentoGeneticolivrocompleto.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SCIVITTARO, W. B. et al. **Uso da água e mitigação de emissões de gases de efeito estufa de cultivares de arroz irrigado por inundação contínua e intermitente**. Circular Técnica, 244. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158516/1/CIRCULAR-244-CPACT.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Base de Dados de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa no Brasil (1970-2023): Estados e biomas. v12.0**. Piracicaba: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/dados/>. Acesso em: 12 mai. 2025.

