

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL

LUCAS GABRIEL DOS SANTOS PEREIRA

**Desenvolvimento de Aplicativo para Cálculo das
Emissões de Gases de Efeito Estufa para a Cultura da
Cana-de-Açúcar**

ARARAS - SP
2025

LUCAS GABRIEL DOS SANTOS PEREIRA

Desenvolvimento de Aplicativo para Cálculo das Emissões de Gases de Efeito Estufa para a Cultura da Cana-de-Açúcar

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Departamento de Desenvolvimento Rural da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Barreto de Figueiredo

ARARAS - SP
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

ERRATA

GABRIEL DOS SANTOS PEREIRA, Lucas. **Desenvolvimento de Aplicativo para Cálculo das Emissões de Gases de Efeito Estufa para a Cultura da Cana-de-Açúcar.** 2025. 75 páginas. Trabalho Final de Graduação – Departamento de Desenvolvimento Rural, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2025.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
Indicar o n° da folha	Indicar o n° da linha	Indicar o erro	Indicar a correção

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família e amigos, em especial, minha mãe, Simone, meu pai, César, e minha irmã, Letícia, pois eles me deram apoio e auxílio em toda minha jornada, me ajudando a chegar aonde cheguei.

AGRADECIMENTO

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ser fonte de força, sabedoria, proteção e esperança. A Ele devo a superação em momentos desafiadores, a criatividade para seguir diante de obstáculos e oportunidades que me foram concedidas ao longo de toda a minha vida.

Agradeço também à minha família, que sempre foi a base da minha vida pessoal e acadêmica. À minha mãe, pelo amor incondicional, pela dedicação e por estar presente em todos os momentos importantes. Ao meu pai, pelos conselhos e apoio que foram fundamentais para minha trajetória. À minha irmã, que, com carinho e parceria, tornou o percurso mais leve e significativo. À minha namorada, expresseo profunda gratidão pela paciência, compreensão e incentivo constante. A presença de todos foram essenciais para que eu mantivesse o equilíbrio e a motivação durante esta jornada.

Agradeço ao meu orientador, Eduardo Barreto de Figueiredo, pela orientação, pela confiança depositada em meu trabalho e pelas contribuições técnicas e acadêmicas que foram indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho. Seu comprometimento e experiência enriqueceram significativamente este TFG.

Aos meus professores ao longo da graduação, deixo meu sincero reconhecimento. Cada disciplina, orientação, questionamento e desafio contribuíram para minha formação crítica, ética e profissional. Agradeço também aos meus amigos, que estiveram ao meu lado compartilhando conhecimentos, desafios, conquistas e momentos de descontração, tornando a caminhada universitária mais leve e memorável.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado. Este TFG é fruto de um esforço coletivo, sustentado por apoio, confiança, parceria e dedicação.

Deus é bom o tempo todo; o tempo todo Deus é bom.

Autor desconhecido.

RESUMO

As mudanças climáticas globais, impulsionadas pelas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), colocam o setor agropecuário em posição central nos debates sobre mitigação, tanto por sua contribuição às emissões quanto pelo potencial de sequestro de carbono em sistemas de manejo conservacionista. No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar destaca-se pela elevada importância econômica e energética, configurando-se como um setor estratégico na transição para uma economia de baixo carbono. Entretanto, apesar da existência de metodologias consolidadas para inventários de GEE, como as diretrizes do IPCC e ferramentas amplamente reconhecidas, sua aplicação prática ainda é limitada entre produtores rurais, em função da elevada complexidade técnica, do alto custo e da baixa acessibilidade das soluções disponíveis. Parte-se da hipótese de que essas limitações dificultam a democratização do acesso à informação ambiental e à participação do produtor no mercado de carbono. Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e prototipar conceitualmente um aplicativo de celular, específico para a cultura da cana-de-açúcar no contexto brasileiro, utilizando uma abordagem no-code e recursos de inteligência artificial generativa como ferramenta de apoio ao desenvolvimento, já a lógica dos cálculos se baseiam integralmente em metodologias científicas consolidadas. O aplicativo estima as emissões do Escopo 1 e 2, priorizando dados de fácil obtenção pelo produtor. Como resultado, obteve-se um protótipo funcional com interface simplificada, capaz de estimar emissões em CO₂ equivalente, identificar fontes críticas e apoiar a gestão ambiental da produção de cana-de-açúcar, contribuindo à aproximação entre ciência, tecnologia e realidade produtiva no setor.

Palavras-chave: cana-de-açúcar; inventário de GEE; pegada de carbono; agricultura de baixo carbono; inteligência artificial.

ABSTRACT

Global climate change, driven by increasing atmospheric concentrations of greenhouse gases (GHG), places the agricultural sector at the center of mitigation debates, both due to its contribution to emissions and its potential for carbon sequestration through conservation management practices. In Brazil, sugarcane cultivation stands out for its high economic and energy relevance, positioning it as a strategic sector in the transition toward a low-carbon economy. However, despite the availability of consolidated methodologies for GHG inventories, such as IPCC guidelines and widely recognized tools, their practical application among rural producers remains limited due to high technical complexity, elevated costs, and low accessibility. This study is based on the hypothesis that these limitations hinder the democratization of access to environmental information and restrict producers' participation in the carbon market. In this context, the objective of this study was to conceptually develop and prototype a mobile application specifically designed for sugarcane cultivation within the Brazilian context, using a no-code approach and generative artificial intelligence resources as a development support tool, while the calculation logic itself is entirely grounded in consolidated scientific methodologies. The application estimates Scope 1 and Scope 2 emissions, prioritizing data that are easily obtainable by producers. As a result, a functional prototype with a simplified interface was developed, capable of estimating emissions in CO₂ equivalent, identifying critical emission sources, and supporting environmental management in sugarcane production systems, thereby contributing to bridging the gap between science, technology, and productive reality in the sugar-energy sector.

Keywords: sugarcane; GHG inventory; carbon footprint; low-carbon agriculture; artificial intelligence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Formulário inicial de entrada de dados para inventário de GEE da cana-de-açúcar baseado no GHG Protocol.....	28
Figura 2. Continuação da aba de inventário para cana-de-açúcar e apresentação dos resultados calculados pelo GHG Protocol.....	29
Figura 3. Indicadores ambientais relativos a quatro diferentes manejos de pastagens no SimaPro.....	31
Figura 4. Fontes dos impactos ambientais relativos a quatro manejos de pastagens no SimaPro.....	32
Figura 5. Visualização da Rede (Network) no SimaPro.....	33
Figura 6. Aba “Cheques” do SimaPro, indicando substâncias sem fator de caracterização... 34	
Figura 7. Recurso “Mostrar dados de todos os projetos” no SimaPro.....	35
Figura 8. Aba de Conjuntos de Parâmetros do SimaPro.....	36
Figura 9. Aba “Dados Primários do Produtor” da RenovaCalc, evidenciando a grande quantidade de variáveis necessárias para o cálculo da intensidade de carbono.....	38
Figura 10. Aba “Consolidado” da RenovaCalc, onde informações agrícolas e industriais são integradas para o cálculo final.....	39
Figura 11. Exemplo de apresentação dos resultados finais da RenovaCalc na própria planilha, evidenciando a ausência de interface amigável e a necessidade de interpretação técnica.....	40
Figura 12. Exemplo de linhas de código no desenvolvimento do aplicativo.....	45
Figura 13. Visualização da tela Inicial.....	59
Figura 14. Visualização da tela Home com a aba lateral não expandida.....	60
Figura 15. Visualização da tela Home com a aba lateral expandida.....	61
Figura 16. Visualização da tela Novo Cálculo.....	62
Figura 17. Visualização da tela de Resultados.....	63
Figura 18. Visualização da tela de Histórico dos cálculos.....	64
Figura 19. Visualização da tela da Metodologia.....	65
Figura 20. Visualização da tela de Contato.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fontes de emissão de GEE, unidades de uso e Fatores de emissão (kg CO ₂ eq) para cálculo nos inventários de gases de efeito estufa para a cultura da cana de açúcar.....	53
Tabela 2. Fatores Médio Mensais e Anual de 2024.....	56

LISTA DE SIGLAS

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ATR - Açúcares Totais Recuperáveis

CBIO - Crédito de Descarbonização

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH₄ - Metano

CO₂ - Dióxido de Carbono

CO₂eq - Dióxido de Carbono Equivalente

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

Escopo 1 - Emissões diretas de gases de efeito estufa

Escopo 2 - Emissões indiretas associadas à eletricidade adquirida

Escopo 3 - Outras emissões indiretas ao longo da cadeia produtiva

GEE - Gases de Efeito Estufa

GHG Protocol - Greenhouse Gas Protocol

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

HFCs - Hidrofluorcarbonetos

IA - Inteligência Artificial

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

LCA - Life Cycle Assessment

MCG - Mudanças Climáticas Globais

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

N₂O - Óxido Nitroso

NEEA - Nota de Eficiência Energoambiental

NF₃ - Trifluoreto de Nitrogênio

PAG - Potencial de Aquecimento Global

PFCs - Perfluorcarbonetos

RenovaBio - Política Nacional de Biocombustíveis

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa

SF₆ - Hexafluoreto de Enxofre

TFG - Trabalho Final de Graduação

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development

WRI - World Resources Institute

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVO.....	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 GHG PROTOCOL (GHP).....	26
3.2 SIMAPRO.....	29
3.3 RENOVACALC.....	36
3.4. INOVAÇÃO DO PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO.....	40
4 METODOLOGIA.....	42
4.1 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO.....	42
4.2 ESCOPO E LIMITES DO INVENTÁRIO.....	45
4.3 FATORES DE EMISSÃO PARA OS CÁLCULOS DE GEE.....	47
4.3.1 Emissões Do Uso E Aplicação De Calcário.....	48
4.3.2 Aplicação E Uso De Fertilizante Nitrogenado.....	48
4.3.3 Emissão Indiretas Do N2O.....	51
4.3.4 Diesel Utilizado Nas Operações Agrícolas.....	53
4.3.5 Dados A Serem Utilizados Para Os Cálculos Das Emissões.....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1 PROGRESSO E FUNCIONALIDADES ATUAIS DESENVOLVIDAS.....	57
5.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO.....	67
5.3. OPORTUNIDADES DE MELHORIA E PRÓXIMOS PASSOS.....	69
6 CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram um dos principais desafios globais contemporâneos, intensificadas pelo aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), resultantes de atividades antrópicas como a queima de combustíveis fósseis e práticas agropecuárias intensivas (IPCC, 2023). O aquecimento global decorrente dessas emissões tem contribuído para a maior frequência de eventos climáticos extremos, impactando ecossistemas, sistemas produtivos e a segurança alimentar (MARENGO; SOUZA JUNIOR, 2018).

Nesse contexto, o setor agropecuário apresenta papel importante, ao mesmo tempo em que figura entre as principais fontes de emissões nacionais, também possui grande potencial de mitigação por meio do manejo adequado dos solos e da adoção de sistemas produtivos mais sustentáveis (SEEG, 2024). O solo, por sua vez, constitui um dos maiores reservatórios terrestres de carbono, e sua dinâmica, fortemente influenciada pela matéria orgânica, desempenha papel crucial no ciclo global do carbono e na redução das emissões (OLIVEIRA, 2025). Além disso, é sensível ao manejo: práticas como preparo intensivo, revolvimento excessivo e remoção de resíduos aceleram a decomposição e favorecem a emissão de CO_2 , enquanto estratégias conservacionistas, como plantio direto, uso de palhada e rotação de culturas, contribuem para o sequestro de carbono e a melhoria da qualidade física, química e biológica do solo (ABREU, 2024).

Parte-se da hipótese de que as ferramentas atualmente disponíveis para a estimativa e o inventário de emissões de gases de efeito estufa, embora metodologicamente robustas e amplamente reconhecidas, apresentam elevado grau de complexidade técnica, alto custo de implementação e baixa acessibilidade para produtores rurais, especialmente no contexto da agricultura brasileira. Essa combinação de fatores limita o acesso de pequenos e médios produtores a informações estratégicas sobre seu perfil de emissões, dificultando a participação efetiva em iniciativas de mitigação e na emergente economia de baixo carbono.

A cultura da cana-de-açúcar se destaca nesse debate por sua relevância socioeconômica no Brasil, pois é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de açúcar e etanol, sendo que o setor sucroenergético ocupa posição estratégica na matriz energética nacional, tanto pela oferta de biocombustíveis quanto pela geração de

bioeletricidade a partir do bagaço e da palha (TORQUATO; JESUS, 2016). A transição da colheita manual com queima para a colheita mecanizada e a manutenção de resíduos no solo favorecem a redução de emissões e o sequestro de carbono, fortalecendo o papel da cana como cultura estratégica no contexto da mitigação climática e da produção de biocombustíveis sustentáveis (EMBRAPA, 2017). Além disso, o etanol brasileiro apresenta desempenho ambiental destacado, com menor intensidade de carbono em comparação a combustíveis fósseis (GARCIA; SPERLING, 2010).

Além disso, observa-se que a maioria das ferramentas de inventário de GEE disponíveis possui caráter genérico ou internacional, sendo pouco adaptadas às especificidades das condições brasileiras de produção agrícola. Particularmente para a cultura da cana-de-açúcar, que apresenta grande relevância econômica, energética e ambiental no Brasil, há carência de instrumentos direcionados que considerem práticas de manejo, insumos e realidades operacionais típicas do setor sucroenergético nacional. Nesse sentido, o presente trabalho se diferencia ao propor uma ferramenta desenvolvida especificamente para a cultura da cana-de-açúcar no contexto brasileiro, utilizando parâmetros compatíveis com as práticas agrícolas predominantes no país.

Em paralelo, o monitoramento das emissões agropecuárias no Brasil, por meio de iniciativas como o SEEG e das Estimativas Anuais de Emissões de GEE do MCTI, evidencia que o setor agropecuário permanece entre os principais responsáveis pelas emissões nacionais, ainda que existam políticas públicas voltadas à sua mitigação, como o Plano ABC e o Plano ABC+ (SEEG, 2024). A consolidação de metas de agricultura de baixo carbono exige, portanto, instrumentos capazes de quantificar emissões em nível de propriedade, permitindo identificar fontes críticas e orientar decisões de manejo compatíveis com as metas climáticas nacionais e internacionais.

As metodologias para inventários de GEE na agricultura vêm sendo estruturadas, sobretudo, a partir das 2006 IPCC *Guidelines* e do 2019 *Refinement*, que estabelecem fatores de emissão, equações e critérios de reporte amplamente aceitos e utilizados em inventários nacionais, corporativos e setoriais. Em âmbito organizacional, o GHG Protocol tornou-se padrão de referência para a contabilização de emissões nos Escopos 1, 2 e 3, enquanto ferramentas específicas, como SimaPro (software de Avaliação do Ciclo de Vida) e RenovaCalc (calculadora oficial do RenovaBio), são amplamente empregadas em estudos acadêmicos, certificações e políticas públicas relacionadas a biocombustíveis. Entretanto, essas ferramentas apresentam, em geral, elevada complexidade, necessidade de grande volume de dados e custos que limitam seu uso direto por produtores rurais e pequenas organizações.

Ao mesmo tempo, a agricultura é impactada pela transformação digital e pela expansão da Inteligência Artificial (IA), que viabilizam novas formas de coleta, processamento e interpretação de dados, associadas ao conceito de Agricultura 4.0 (FERREIRA *et al.*, 2024). Abordagens low code e no code, aliadas a modelos de IA generativa, permitem que aplicações sejam desenvolvidas com menor necessidade de programação tradicional, reduzindo custos, encurtando prazos e facilitando atualizações contínuas. No contexto da gestão ambiental, essas tecnologias criam oportunidade para aproximar metodologias científicas rigorosas da realidade cotidiana da propriedade agrícola.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de um aplicativo móvel, baseado em recursos de IA integrados ao ChatGPT, destinado a estimar as emissões de GEE na produção de cana-de-açúcar. O inventário será elaborado considerando exclusivamente as emissões de Escopo 1 e Escopo 2, seguindo as diretrizes do IPCC, 2006 e 2019. A proposta busca oferecer uma ferramenta intuitiva, de baixo custo e com linguagem acessível, capaz de apoiar produtores rurais no monitoramento de suas emissões, na compreensão das fontes mais relevantes e no planejamento de práticas de mitigação.

Ressalta-se que o aplicativo foi intencionalmente delimitado à contabilização das emissões de Escopo 1 e Escopo 2. A exclusão do Escopo 3 justifica-se pela elevada complexidade de obtenção dos dados necessários, pela dependência de informações externas à propriedade rural — como processos industriais, fabricação e transporte de insumos — e pelo risco de contagem duplicada de emissões (double counting). Além disso, a opção metodológica visa manter o foco nas emissões diretamente controláveis pelo produtor rural, garantindo maior confiabilidade dos dados, facilidade de uso e aplicabilidade prática imediata da ferramenta no contexto da gestão agrícola.

A democratização do acesso a ferramentas de estimativa de emissões torna-se um elemento central para ampliar a participação do setor agropecuário no mercado de carbono e em estratégias de mitigação climática. O desenvolvimento de aplicações por meio de abordagens no-code, aliado ao uso de inteligência artificial generativa como ferramenta de apoio ao desenvolvimento, surge como uma alternativa promissora para reduzir custos, acelerar processos e ampliar o acesso a soluções digitais. Neste trabalho, a inteligência artificial não é empregada na lógica dos cálculos em si, os quais se baseiam integralmente em metodologias consolidadas, mas sim como instrumento facilitador no desenvolvimento do aplicativo, contribuindo para a criação de uma solução prática, acessível e alinhada à realidade do produtor rural brasileiro.

Assim, o projeto contribui para a transição da agricultura para modelos de produção de baixo carbono, reforçando a sustentabilidade do setor sucroenergético e respondendo às demandas ambientais, econômicas e tecnológicas da atualidade.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um aplicativo móvel para estimativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e da pegada de carbono da cultura da cana-de-açúcar, fundamentado nas diretrizes metodológicas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), utilizando inteligência artificial generativa exclusivamente como ferramenta de apoio ao desenvolvimento do software, por meio de abordagem *no code*, e não como elemento responsável pela lógica dos cálculos, os quais são integralmente baseados em fatores de emissão e equações consolidadas na literatura científica. O aplicativo tem como finalidade fornecer aos produtores rurais uma ferramenta acessível, prática e tecnicamente confiável para quantificação e compreensão de suas emissões, incentivando a adoção de práticas agrícolas de baixo carbono, alinhadas às metas nacionais e internacionais de mitigação climática.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Implementar um sistema de cálculo automatizado de emissões diretas e indiretas, com base nos fatores de emissão definidos pelo IPCC (2006; 2019), adaptando-os às particularidades de cada propriedade para a cultura da produção de cana-de-açúcar no contexto brasileiro.

b) Desenvolver uma interface intuitiva e responsiva, que permita ao usuário inserir dados de campo (área de cultivo, produtividade agrícola, tipo de solo, consumo de fertilizantes, combustível, energia elétrica, entre outros) e visualizar os resultados em gráficos interativos e personalizados.

c) Incorporar parâmetros agrônômicos relacionados ao balanço de carbono, específicos para a cana-de-açúcar, como o uso de fertilizantes nitrogenados, o percentual

de palhada mantida no solo e os fatores de decomposição associados, garantindo maior precisão na estimativa das emissões.

d) Preparar a arquitetura conceitual e estrutural do aplicativo para, futuramente, possibilitar sua disponibilização em plataformas digitais de distribuição, como Google Play Store e Apple App Store, promovendo o acesso amplo a diferentes perfis de produtores rurais e instituições de ensino e pesquisa.

e) Apresentar a pegada de C da cultura da cana de açúcar e do sistema produtivo apresentada em kg de CO₂eq/ton de cana produzida ou por hectare (CO₂eq/ha).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As mudanças climáticas globais representam um dos desafios mais eminentes da atualidade, com impactos significativos em ecossistemas, economias e sociedades em todo o mundo. A crescente concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, impulsionada principalmente por atividades humanas, tem levado a um aumento da temperatura média do planeta, resultando em eventos climáticos extremos e desequilíbrios ambientais (IPCC, 2023).

A composição desses gases é diversificada, sendo os principais o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). O CO₂ é o GEE mais emitido pelas atividades antrópicas, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis, sendo o que permanece por mais tempo na atmosfera, tornando-o mais prejudicial em termos de contribuição cumulativa para o aquecimento global (DALCIN; MANGINI, 2021). Por outro lado, o CH₄, embora menos abundante, possui um potencial de aquecimento global (GWP) de 25, significativamente maior que o CO₂ em um horizonte de 20 anos, o que o torna um alvo crucial para a mitigação de curto prazo (MIRANDA, 2012).

O aumento da temperatura média global, impulsionado por essa concentração de GEE, está diretamente ligado à maior frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos. Fenômenos como ondas de calor mais longas, secas severas, chuvas intensas, inundações e tempestades mais violentas tornam-se cada vez mais comuns, sinalizando um desequilíbrio ambiental que ameaça a segurança alimentar e hídrica, além de causar prejuízos econômicos e sociais (MARENGO; SOUZA JUNIOR, 2018). Neste contexto, a

compreensão e a mitigação das emissões de GEE tornam-se imperativas para a construção de um futuro mais sustentável.

O carbono (C) é o quarto elemento mais abundante no universo e o elemento fundamental para a vida na Terra, sendo o principal componente estrutural de todas as moléculas orgânicas. A circulação desse elemento vital é regida pelo ciclo do carbono, um processo biogeoquímico fundamental que descreve a troca e o movimento do carbono entre os grandes reservatórios do planeta: a atmosfera, a hidrosfera, a biosfera e a litosfera (RONCARATTI, 1995). Este ciclo é essencial para a homeostase planetária e para a manutenção da. O ciclo se divide em processos lentos e rápidos, sendo o ciclo rápido, que envolve a fotossíntese e a respiração, o de maior relevância para o contexto das mudanças climáticas (PACHECO, 1990).

No contexto da agricultura, o solo emerge como um dos maiores reservatórios terrestres de carbono, sendo o carbono orgânico do solo (COS) um componente crítico (BALDOTTO *et al.*, 2015). A matéria orgânica do solo (MOS) é composta por aproximadamente 58% de carbono, o que estabelece uma relação direta entre o manejo do solo e o ciclo global do carbono. A MOS, em particular a matéria orgânica ativa, que possui um tempo de meia-vida de dias a anos, é crucial para a estabilidade dos agregados do solo, melhorando a infiltração de água e a resistência à erosão. Práticas agrícolas inadequadas, como o revolvimento intensivo do solo, podem levar à rápida decomposição da MOS, resultando na emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, contribuindo para o efeito estufa adicional e o aquecimento global (ABREU, 2024).

A alteração crítica no ciclo global do carbono, intensificada pela liberação excessiva de CO₂ na atmosfera devido a atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis, destruição de florestas e práticas agrícolas inadequadas, tem levado a um desequilíbrio climático (OLIVEIRA, 2025). Nesse cenário, a agricultura desempenha um papel dual: é uma fonte significativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas também possui um potencial substancial para a mitigação dessas emissões através do sequestro de carbono no solo (SOUZA; PREZOTTI; GUARÇONI M., 2012). Estratégias de manejo conservacionista, como o Plantio Direto (que se baseia na ausência de revolvimento do solo, rotação de culturas e cobertura permanente com palha), são vitais para elevar o teor de MOS e, conseqüentemente, aumentar o estoque de carbono no solo, transformando a atividade agrícola em uma aliada do equilíbrio climático e da segurança alimentar (OLIVEIRA, 2025).

A estimativa da pegada de carbono em plantações de cana-de-açúcar, que é o foco deste trabalho, torna-se, portanto, uma ferramenta essencial para quantificar esse

balanço. A cultura da cana-de-açúcar, por meio de manejos como a colheita mecanizada sem queima e a manutenção da palha no campo, potencializa o sequestro de carbono edáfico, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (TORQUATO, 2013). O cálculo inicialmente vai considerar as emissões de GEE provenientes de insumos e operações agrícolas, e posteriormente também a captura de carbono via fotossíntese e o potencial de sequestro no solo, influenciado diretamente pelo manejo adotado. A análise desse balanço entre emissão e captura é crucial para que o produtor possa identificar e implementar práticas que promovam um sistema de produção de baixo carbono, contribuindo ativamente para a estabilidade climática (PERACI *et al.*, 2012).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estabelecido em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), desempenha um papel crucial na avaliação científica das mudanças climáticas. Sua principal função é avaliar informações científicas, técnicas e socioeconômicas relevantes para a compreensão da mudança do clima induzida pelo homem, seus potenciais impactos e opções de mitigação e adaptação (EGGLESTON *et al.*, 2006).

Os relatórios de avaliação do IPCC fornecem a base de conhecimento para a formulação de políticas climáticas globais e nacionais. O mais recente, o *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*, integra as principais descobertas do Sexto Ciclo de Avaliação, sendo fundamental para aumentar a compreensão global sobre as mudanças climáticas e orientar as políticas de mitigação e adaptação (IPCC, 2023).

Para o desenvolvimento de inventários nacionais de GEE, as metodologias 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* e suas atualizações, como o 2019 Refinement, são consideradas mundialmente como a metodologia mais confiável e amplamente aceita, fornecendo os passos e fatores de emissão necessários para estimativas robustas (IPCC, 2019).

No Brasil, o monitoramento das emissões de GEE revela um cenário complexo no setor agropecuário. Embora o país tenha registrado uma queda nas emissões totais em 2023, 12% nas emissões em relação ao ano anterior, totalizando 2,29 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente, o setor agropecuário mantém-se como um dos principais contribuintes para as emissões nacionais (SEEG, 2024). Em 2022, o setor foi responsável por aproximadamente 27% das emissões brutas do país (SEEG, 2023), com um aumento de 2,2% nas emissões sendo o crescimento do rebanho bovino o fator de pressão para essa diferença (SEEG, 2024).

A pecuária, em particular, é a principal fonte de emissão do setor agropecuário,

sendo o metano (CH₄), liberado pelo processo de fermentação entérica dos bovinos, o gás predominante (BRANDÃO; CEOLIN; RUVIARO, 2012). O CH₄ possui um alto potencial de aquecimento global, o que torna a mitigação na pecuária uma prioridade. Estratégias de mitigação incluem o manejo eficiente de pastagens e o uso de aditivos alimentares para reduzir a produção de metano entérico (BERCHIELLI, 2012).

Em contraste, a cultura da cana-de-açúcar apresenta um balanço de carbono mais favorável, sendo reconhecida por sua capacidade de contribuir para a remoção de carbono da atmosfera (EMBRAPA, 2023). Estudos demonstram que a cana-de-açúcar tem potencial para o acúmulo de carbono no solo e na biomassa, especialmente com o manejo adequado da palha e a mecanização da colheita, que reduz a queima de resíduos (FERNANDES, 2013). Enquanto a pecuária é um emissor líquido de GEE, a cana-de-açúcar, especialmente no contexto da produção de etanol, é frequentemente avaliada por seu balanço energético e de emissões, que pode ser neutro ou até negativo em seu ciclo de vida (GARCIA, 2011).

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) tem atuado ativamente na agenda climática brasileira, desenvolvendo plataformas e relatórios que fornecem a base de dados para a formulação de políticas públicas. A plataforma AdaptaBrasil MCTI consolida, integra e dissemina informações sobre os riscos de impactos das mudanças climáticas no Brasil, sendo uma ferramenta crucial para a gestão estratégica e o subsídio de políticas públicas (OMETTO, 2021). O MCTI também publica anualmente as Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa, categorizando as emissões por setores, incluindo a mudança de uso da terra e a agropecuária. A pasta tem enfatizado a necessidade de adaptação e mitigação dos impactos climáticos na produção de alimentos (MCTI, 2025).

A importância da categorização setorial e da divulgação como um todo é evidenciada pela publicação anual das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (MCTI, 2022). A categorização das emissões por setores, incluindo a agropecuária, é fundamental para o monitoramento e a elaboração de planos de mitigação direcionados, permitindo que o país cumpra os compromissos estabelecidos pela Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) (COSTA, 2024).

Neste contexto, o MCTI tem enfatizado a necessidade de adaptação e mitigação dos impactos climáticos na produção e segurança alimentar. Alterações no regime de chuvas e eventos climáticos extremos afetam diretamente a produtividade das lavouras, tornando a resiliência dos sistemas alimentares um tema central na agenda climática nacional (MCTI, 2025).

A agropecuária brasileira, embora seja uma fonte significativa de emissões, também possui um vasto potencial para a mitigação e o sequestro de carbono. Iniciativas como o Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), e sua continuidade, o Plano ABC+ (2020-2030), buscam promover práticas agrícolas sustentáveis e reduzir as emissões de GEE no setor (HARFUCH, 2022). O Plano ABC é considerado uma referência mundial em seu escopo e abrangência, com o objetivo de reduzir as emissões de carbono na agropecuária (SILVA, 2020).

O Plano ABC+ estabelece metas ambiciosas para a mitigação de GEE, estimulando a adoção de um conjunto de tecnologias de produção sustentável. Dentre as principais práticas incentivadas, destacam-se o Sistema Plantio Direto (SPD), a Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD) e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) (AGROICONE, 2020). A influência atual do Plano é notável, com o objetivo de atingir 72,68 milhões de hectares com tecnologias de produção sustentável até 2030, demonstrando o compromisso do Brasil em transformar o setor agropecuário em um exemplo de produção com baixa emissão de carbono (EMBRAPA, 2021).

Em paralelo à urgência climática, o cenário tecnológico global é marcado por uma intensa corrida pela Inteligência Artificial (IA), que se consolida como a principal força motriz da inovação em diversos setores (FERREIRA *et al.*, 2024). Essa tendência impulsiona a chamada Agricultura 4.0, onde a IA se torna um pilar fundamental para a otimização da produção e a busca pela sustentabilidade (ASSIS; PIANTONI, 2024). A aplicação de IA na agricultura, particularmente na Agricultura de Precisão, permite a análise de grandes volumes de dados (Big Data) coletados por sensores, drones e satélites, transformando-os em decisões estratégicas em tempo real (BALABENUTE; LUCCA FILHO, 2024).

O impacto dessa integração tecnológica é notável na gestão de recursos, como a otimização do uso de água, fertilizantes e defensivos, o que resulta em maior eficiência produtiva e menor impacto ambiental (ASSIS; PIANTONI, 2024). A IA, ao fornecer ferramentas preditivas e analíticas, capacita o produtor a adotar práticas mais sustentáveis, como o manejo de baixo carbono, alinhando a produtividade agrícola com as metas globais de mitigação climática (FERREIRA *et al.*, 2024). O desenvolvimento de soluções tecnológicas, como o aplicativo proposto neste trabalho, insere-se diretamente nessa vanguarda, utilizando a capacidade de processamento da IA para quantificar a pegada de carbono e auxiliar o setor sucroenergético na transição para um modelo de produção mais eficiente e ecologicamente responsável.

Dentro do vasto setor agropecuário, a cultura da cana-de-açúcar desempenha um

papel de destaque na economia brasileira e na matriz energética global. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de açúcar e um líder na produção de etanol (EMBRAPA, 2023), sendo este último um biocombustível que se destaca por sua sustentabilidade, pois reduz significativamente as emissões de GEE em comparação com a gasolina (D'ALESSANDRO, 2024). Em termos econômicos, o setor sucroenergético demonstra grande relevância, com uma contribuição expressiva para o Produto Interno Bruto (PIB) e um enorme efeito multiplicador na economia, além de gerar significativa economia de divisas com a exportação de seus produtos (NASTARI, 2012).

O etanol de cana-de-açúcar é considerado significativamente mais sustentável em comparação com combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel, pois a Análise do Ciclo de Vida (ACV) demonstra uma redução substancial nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (GARCIA; SPERLING, 2010). Essa vantagem ambiental reside no fato de que o carbono liberado na queima do etanol é majoritariamente biogênico, ou seja, foi previamente capturado pela própria planta durante seu crescimento, estabelecendo um ciclo de carbono mais equilibrado e reduzindo a contribuição líquida para o aquecimento global (DÍAZ, 2011).

Adicionalmente, a mecanização da colheita da cana-de-açúcar, que substituiu a prática da queima da palha, foi um fator crucial para a redução das emissões do setor. A eliminação da queima resultou em um ganho ambiental significativo, com menor emissão de poluentes atmosféricos e GEE (RONQUIM, 2010). A colheita mecanizada permite a manutenção da palha no campo, o que, além de evitar a emissão de poluentes, contribui para o aumento da matéria orgânica e a captura de carbono no solo (TORQUATO, 2013).

Para a safra 2025/26, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) estima uma produção de cana-de-açúcar de 668,8 milhões de toneladas, apesar de uma leve redução em relação à safra anterior, influenciada por condições climáticas (CONAB, 2025). A cultura da cana-de-açúcar ocupa uma posição de destaque no cenário agrícola brasileiro, com uma área colhida de aproximadamente 8,74 milhões de hectares, o que a coloca entre as principais culturas do país em termos de área plantada (EMBRAPA, 2017). A importância da cana-de-açúcar transcende a produção de açúcar e etanol, abrangendo também a bioeletricidade que utiliza o bagaço e a palha como biomassa para a cogeração de energia elétrica (TORQUATO; JESUS, 2016).

A bioeletricidade de cana-de-açúcar desempenha um papel crucial na matriz energética brasileira, representando 15% da energia elétrica produzida no Brasil (SIAMIG, 2025), contribuindo significativamente para a diversificação e a segurança energética nacional (SANTINI; PINTO, 2011). Sua importância como base energética mais

sustentável reside no fato de ser uma fonte renovável e complementar, que gera eletricidade de forma contínua, especialmente durante o período de entressafra hidrelétrica, garantindo a estabilidade do sistema elétrico e evitando a emissão de gases de efeito estufa associados à termelétricas fósseis (SILVA; COSTA, 2021).

Diante deste cenário, este projeto se propõe a desenvolver um aplicativo de celular focado exclusivamente na cultura da cana-de-açúcar para estimar as emissões de GEE e a pegada de carbono. O aplicativo, de natureza simples e interativa, visa fornecer aos produtores rurais uma ferramenta acessível para a gestão ambiental de suas operações. O escopo do inventário de GEE do aplicativo será delimitado às emissões diretas da fazenda (Escopo 1) e às emissões provenientes da eletricidade comprada (Escopo 2), seguindo as diretrizes de inventários organizacionais (SCHWARTZAUPT, 2016).

A escolha por focar nos Escopos 1 e 2 se justifica pela necessidade de atribuir a responsabilidade das emissões às ações que ocorrem dentro da delimitação operacional da propriedade, como o uso de combustíveis em máquinas (Escopo 1) e o consumo de energia elétrica (Escopo 2) (SILVA, 2024), não sendo consideradas emissões da fase de produção e transporte dos insumos, sendo essas de responsabilidade de cada empresa que fabrica e transporta os insumos. As emissões de Escopo 3, que incluem a produção de insumos (fertilizantes, defensivos), são consideradas emissões indiretas de responsabilidade de terceiros, e sua exclusão inicial visa simplificar o processo de coleta de dados para o usuário final, mantendo o foco nas emissões que o produtor pode diretamente gerenciar e mitigar (MELO, 2017).

A quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) tornou-se uma etapa essencial na gestão ambiental moderna, especialmente diante do avanço de políticas climáticas, acordos internacionais e exigências de mercados que caminham em direção à neutralidade de carbono (IPCC, 2023). Nesse contexto, foram desenvolvidas diversas ferramentas digitais de cálculo de emissões, que variam desde planilhas simplificadas até softwares complexos integrados a grandes bancos de dados. Essas calculadoras são amplamente utilizadas por empresas, governos, instituições de pesquisa e, em menor escala, por produtores rurais, servindo como base para inventários, relatórios corporativos, certificações e políticas públicas (WRI; 2019).

Nos últimos anos, observa-se também a incorporação gradual da inteligência artificial (IA) a esses sistemas, principalmente para automatizar cálculos, cruzar bancos de dados e melhorar a interface com o usuário. Ainda assim, grande parte das ferramentas disponíveis permanece voltada a públicos técnicos, exigindo familiaridade com conceitos de inventário e com o manuseio de estruturas complexas de dados. Para muitos usuários

do meio rural, especialmente pequenos produtores com menor escolaridade formal, essa combinação de complexidade metodológica e linguagem técnica dificulta a apropriação efetiva das ferramentas, criando uma barreira entre o mundo das metodologias consolidadas e a realidade prática da fazenda (FERREIRA *et al.*, 2024).

Nesta revisão, são analisadas três ferramentas de referência internacional e nacional para contabilizar emissões de GEE: o GHG Protocol, o software de ACV SimaPro e a calculadora RenovaCalc. A escolha dessas ferramentas se deve à sua ampla utilização em relatórios corporativos, estudos acadêmicos, certificações e regulamentações, além de representarem diferentes abordagens metodológicas e níveis de complexidade. A partir dessa análise, torna-se possível situar o aplicativo proposto neste trabalho em relação ao “estado da arte”, evidenciando seus diferenciais em termos de foco setorial, simplicidade, acessibilidade e usabilidade.

Por fim, destaca-se a necessidade de atualização contínua dessas calculadoras, uma vez que fatores de emissão, diretrizes do IPCC, parâmetros setoriais e normativas climáticas são periodicamente revisados e atualizados conforme a ciência avança (IPCC, 2019). Ferramentas que não acompanham essas mudanças tendem a se tornar desatualizadas ou imprecisas, o que compromete a credibilidade dos inventários e pode levar a decisões equivocadas por parte de gestores, empresas e produtores.

3.1 GHG PROTOCOL (GHP)

O GHG Protocol (*Greenhouse Gas Protocol*) consolidou-se como o padrão metodológico mais utilizado no mundo para inventários corporativos de gases de efeito estufa. Criado pelo *World Resources Institute* (WRI) e pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), o protocolo surgiu na década de 1990 com o propósito de estabelecer uma linguagem comum e padronizada para contabilização de emissões no setor público e privado (WRI, 2019). Desde então, tornou-se referência global e base de inúmeras legislações, certificações e sistemas de reporte ambiental.

Seu principal diferencial reside na capacidade de organizar as emissões em três categorias — os Escopos 1, 2 e 3 — permitindo que diferentes organizações possam demonstrar, com transparência, quais emissões são de sua responsabilidade direta e quais estão distribuídas ao longo da cadeia produtiva. O protocolo contempla sete gases de efeito estufa regulamentados pelo Protocolo de Quioto: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF₆) e trifluoreto de nitrogênio (NF₃). Tal abrangência

garante que todos os processos industriais e agrícolas modernos possam ser representados de maneira consistente, permitindo comparações internacionais e análises robustas.

O Escopo 3 engloba todas as demais emissões indiretas ao longo da cadeia de valor, como transporte de insumos, distribuição, descarte e produção de bens adquiridos. É justamente esse escopo que torna a aplicação do GHG Protocol mais complexa, pois exige rastreamento detalhado e grande volume de informações, muitas vezes indisponíveis ao produtor rural ou à pequena empresa.

Apesar de sua robustez, essa complexidade é um dos aspectos mais frequentemente apontados como limitação. Inventários completos sob o GHG Protocol exigem grande expertise técnica, tempo e acesso a bancos de dados específicos, além de profissionais qualificados para interpretar e validar os resultados. Isso se intensifica na agropecuária, onde há alta variabilidade espacial, sazonalidade e diversidade de manejos. Como consequência, produtores rurais e pequenas organizações frequentemente enfrentam dificuldades de acesso e de aplicar diretamente o protocolo, recorrendo a consultorias especializadas ou reduzindo o inventário apenas aos Escopos 1 e 2.

Ainda assim, sua padronização global é uma vantagem incontestável. Grandes empresas de energia, agroindústrias, bancos e governos utilizam o GHG Protocol como ferramenta de reporte oficial, o que torna o protocolo essencial para Programas de ESG, relatórios de sustentabilidade e metas de descarbonização. Além disso, agências como a EPA (*Environmental Protection Agency*) disponibilizam planilhas e calculadoras simplificadas derivadas do protocolo, o que facilita parcialmente sua aplicação.

Embora o GHG Protocol seja a base metodológica mais utilizada no mundo, sua aplicação prática quase sempre depende de ferramentas complementares, como planilhas padronizadas, calculadoras oficiais ou softwares que traduzem a metodologia para estruturas operacionais específicas. No setor agropecuário, esse uso normalmente ocorre por meio de planilhas complexas em Excel, disponibilizadas por instituições públicas e privadas, as quais exigem que o usuário insira manualmente uma grande quantidade de dados de entrada, separados por cultura, processo e tipo de fonte emissora.

Para ilustrar essa realidade, foram incluídos dois prints da planilha oficial de inventário baseada no GHG Protocol para uso agrícola, especificamente na aba destinada à cultura da cana-de-açúcar. A primeira imagem (Figura 1) representa o início do formulário de entrada de dados. Nela, observa-se a estrutura típica do GHG Protocol adaptado ao setor rural: múltiplos campos obrigatórios, subdivididos em categorias operacionais como consumo de combustíveis, aplicação de fertilizantes, uso de calcário,

manejo da palha, resíduos agrícolas, geração de energia e insumos agrícolas diversos. Essa organização detalhada evidencia a necessidade de conhecimento técnico para preencher corretamente cada item, bem como a dependência de registros rigorosos das operações da fazenda.

Figura 1. Formulário inicial de entrada de dados para inventário de GEE da cana-de-açúcar baseado no GHG Protocol.

Formulário de emissões - Cana-de-açúcar

Tabela 1. Informações sobre a propriedade agrícola.

	Detalhes	Unidade	Valor
Estado	São Paulo	-	-
Latitude	Converter unidade	graus	-
Longitude	Converter unidade	graus	-
Bioterra	-	-	-

Tabela 2. Sistema de cultivo.

	Detalhes	Unidade	Valor
Ciclo	1	-	-
Data de colheita	-	-	-
Classe textural do solo	-	-	-
Teor de argila no solo	-	-	-
Uso anterior da terra	-	-	-
Sistema de cultivo atual	-	-	-
Tempo de adoção do sistema	-	-	-
Área de queima de resíduos da cultura	-	hectare	-
Área de manejo de solos orgânicos	-	hectare	-
Área cultivada	100	hectare	100,00
Produtividade média	120	tonelada/hectare	120,00

Tabela 3. Aclimação

	Detalhes	Unidade	Valor
Atribuição sintética	-	-	-

Fonte: GHG PROTOCOL, 2025.

A segunda imagem (Figura 2) apresenta a continuidade da mesma aba, já próxima ao final da planilha. Nesse ponto, o usuário se depara com linhas adicionais de entrada de dados mais específicas — muitas vezes relacionadas às emissões fugitivas, à composição dos fertilizantes, ao uso de eletricidade adquirida, ao consumo de combustíveis auxiliares, entre outros. Logo abaixo, a planilha exhibe automaticamente os resultados calculados, normalmente expressos em toneladas de CO₂ equivalente, bem como a participação relativa de cada fonte emissora. Essa forma de apresentação, embora metodologicamente correta, reforça a dificuldade de interpretação para usuários não especializados, pois combina categorias técnicas, fatores de emissão e cálculos intermediários que não são visíveis de forma clara na interface.

Figura 2. Continuação da aba de inventário para cana-de-açúcar e apresentação dos resultados calculados pelo GHG Protocol.

Tabela 4. Consumo de combustível das operações mecanizadas.			
	Detalhes	Unidade	Valor
Tipo de quantificação de consumo	-	-	Diesel B10
Tipo de quantificação de consumo	-	-	Quantidade consumida
Quantidade consumida	-	litro	100,00

Tabela 5. Consumo de combustível nas operações internas da propriedade.			
	Detalhes	Unidade	Valor
Gasolina	-	litro	
Etanol hidratado	-	litro	

Tabela 6. Consumo de combustível no transporte da produção.			
	Detalhes	Unidade	Valor
Tipo de combustível	-	-	Diesel B10
Quantidade consumida	-	litro	

Resumo do balanço de GEE	
Balanço de GEE (tonelada de CO ₂ eq.)	0,27
Balanço de GEE por área (tonelada de CO ₂ eq./hectare)	0,00
Balanço de GEE por tonelada produzida (tonelada de CO ₂ eq./tonelada)	0,00
Balanço de emissões por processos biogênicos (tonelada de CO ₂ eq.)	0,02

Fonte: GHG PROTOCOL, 2025.

Esses exemplos evidenciam como o GHG Protocol, embora robusto e padronizado internacionalmente, não é acessível para a maior parte dos produtores rurais. A exigência de inserir dados detalhados, compreender categorias de emissões e interpretar resultados técnicos demonstra porque ferramentas simplificadas são necessárias. Além disso, a estrutura fragmentada das planilhas dificulta o uso em campo, tornando inviável sua aplicação diária na gestão da propriedade, necessitando de um olhar mais cuidadoso para o design do software.

A partir dessas limitações, reforça-se a justificativa para o desenvolvimento do aplicativo apresentado neste trabalho, que busca manter o rigor metodológico, mas traduzindo sua complexidade para uma interface intuitiva, com linguagem acessível e adaptação específica à realidade da cultura da cana-de-açúcar.

3.2 SIMAPRO

O SimaPro é um dos softwares mais avançados e completos do mundo para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e estimativa de impactos ambientais, incluindo pegada de carbono. Desenvolvido pela *PRé Sustainability*, o programa foi concebido para

proporcionar análises detalhadas desde a extração de matérias-primas até o descarte final dos produtos. Por isso, tornou-se amplamente adotado em pesquisas acadêmicas, certificações ambientais, estudos de sustentabilidade, planejamento industrial e análise comparativa de produtos.

Sua principal vantagem está na integração de grandes bancos de dados internacionais de inventário, como *ecoinvent*, *Agri-footprint*, USLCI e vários outros repositórios privados e públicos. Esses bancos de dados reúnem informações altamente detalhadas sobre energia, emissões atmosféricas, processos industriais, produção agrícola e descarte, permitindo que o usuário modele sistemas complexos com alto nível de precisão. Em produções agrícolas, por exemplo, o SimaPro permite incluir desde a fabricação dos fertilizantes até o transporte dos produtos colhidos, passando por insumos, resíduos, emissões diretas e processos industriais.

Apesar de sua potência analítica, o software apresenta limitações consideráveis do ponto de vista de acessibilidade e usabilidade. Trata-se de uma ferramenta profissional, com custo elevado, estrutura complexa e curva de aprendizado acentuada. É comum que usuários iniciantes se deparem com telas extensas, estruturas de modelagem pouco intuitivas e necessidade de conhecer metodologias específicas de ACV, o que dificulta seu uso em propriedades agrícolas, especialmente entre produtores sem formação técnica especializada. Além disso, muitos resultados são apresentados em tabelas extensas, com níveis hierárquicos e unidades que não são de fácil interpretação pelo usuário comum, o que reforça a dificuldade relatada por produtores rurais que consideram as tabelas do SimaPro “sem unidade ou pouco úteis” quando não se conhece o método.

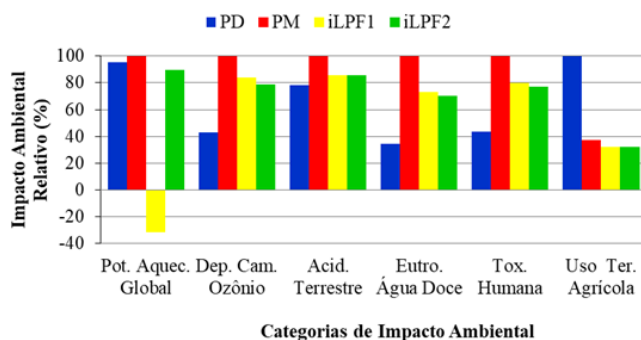
Outro ponto significativo é o custo operacional. Licenças do SimaPro podem ultrapassar trinta mil reais, tornando sua utilização inviável para produtores de pequeno e médio porte. Mesmo quando utilizado por consultorias, o preço final dos estudos tende a ser elevado, dificultando o acesso à metodologia por pequenos produtores. O software é ideal para estudos industriais e acadêmicos aprofundados, mas não para um aplicativo simples e acessível voltado ao uso diário na fazenda.

Apesar das limitações de custo e usabilidade, é importante compreender como o SimaPro apresenta seus resultados, especialmente porque esse formato tradicional de ACV fundamenta a justificativa para desenvolver um aplicativo mais simples e intuitivo. Para ilustrar essa diferença, foram incluídos alguns prints do SimaPro mostrando como a interface e os resultados costumam ser exibidos no software.

O primeiro exemplo (Figura 3) apresenta a visualização dos indicadores ambientais relativos a quatro diferentes manejos de pastagens, normalizados para um período de um

ano. Essa tela demonstra a complexidade típica dos resultados gerados pelo software, que exigem familiaridade com categorias de impacto, fatores de caracterização e unidades específicas.

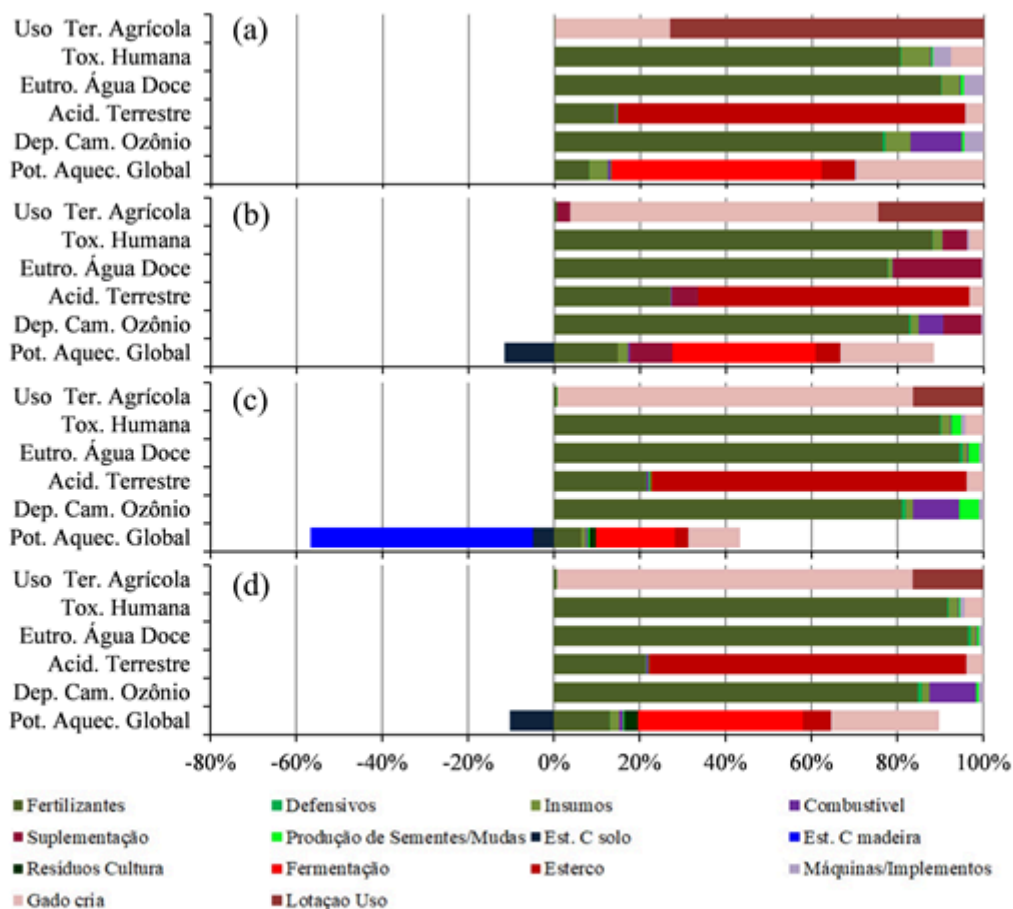
Figura 3. Indicadores ambientais relativos a quatro diferentes manejos de pastagens no SimaPro.



Fonte: SIMAPRO, 2025.

Em seguida (Figura 4), apresenta-se outro tipo de resultado disponibilizado pelo SimaPro: a identificação das fontes individuais de impacto ambiental para os mesmos quatro manejos. Esse tipo de gráfico, embora extremamente completo, exige interpretação técnica detalhada para compreender as cargas ambientais de cada fluxo, reforçando o desafio de uso por produtores rurais.

Figura 4. Fontes dos impactos ambientais relativos a quatro manejos de pastagens no SimaPro.

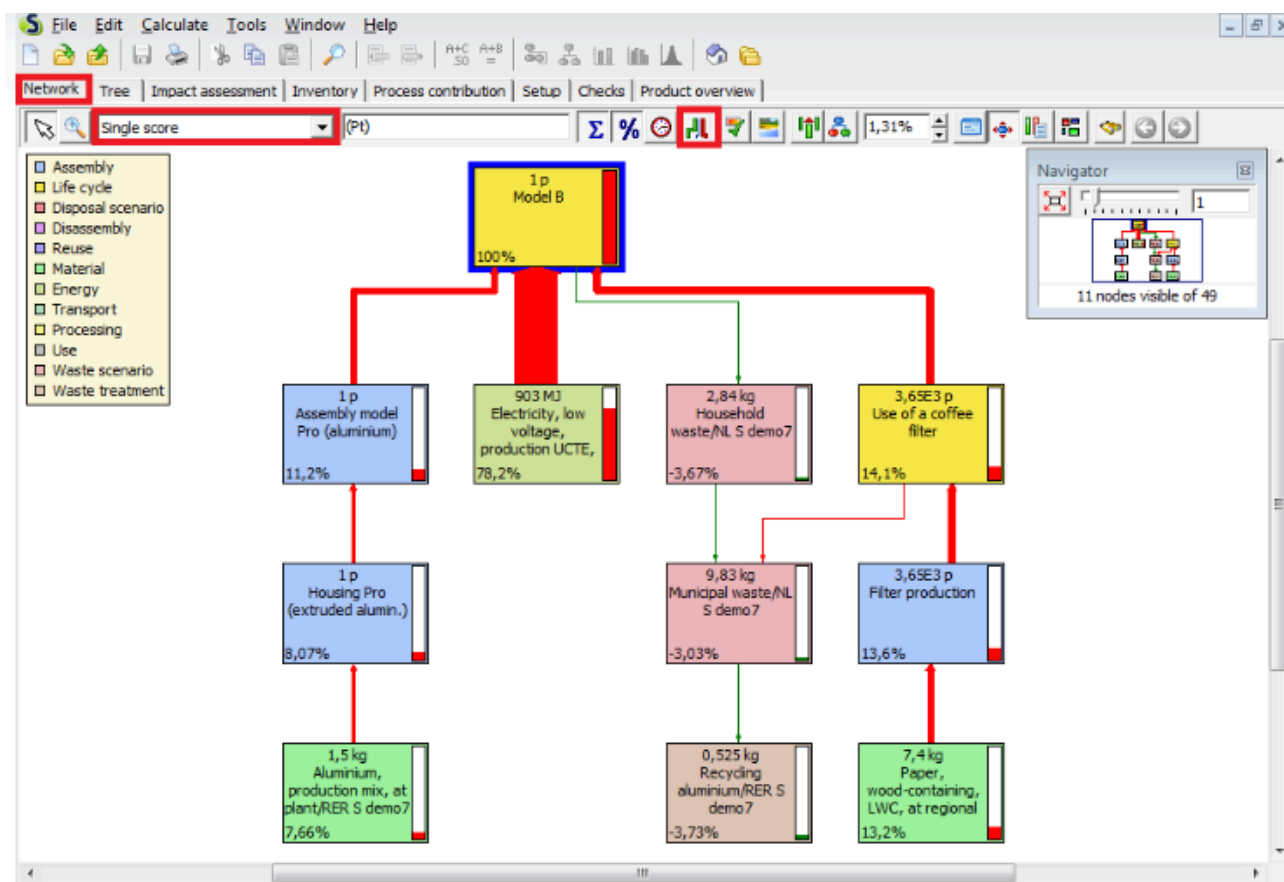


Fonte: SIMAPRO, 2025.

Além dos resultados numéricos e gráficos, o SimaPro possui diversas funcionalidades internas que, embora poderosas, ampliam ainda mais a sua complexidade para usuários sem experiência prévia em ACV. A seguir, são apresentados prints das quatro ferramentas citadas na descrição técnica do software, disponibilizadas pela própria desenvolvedora *PRé Sustainability*.

A primeira tela (Figura 5) corresponde ao recurso chamado Rede (*Network*), que oferece uma visualização gráfica de todos os processos e fluxos de materiais dentro do modelo. Essa ferramenta é extremamente útil para auditoria e identificação de erros, mas demanda entendimento técnico aprofundado sobre processos e categorias de impacto.

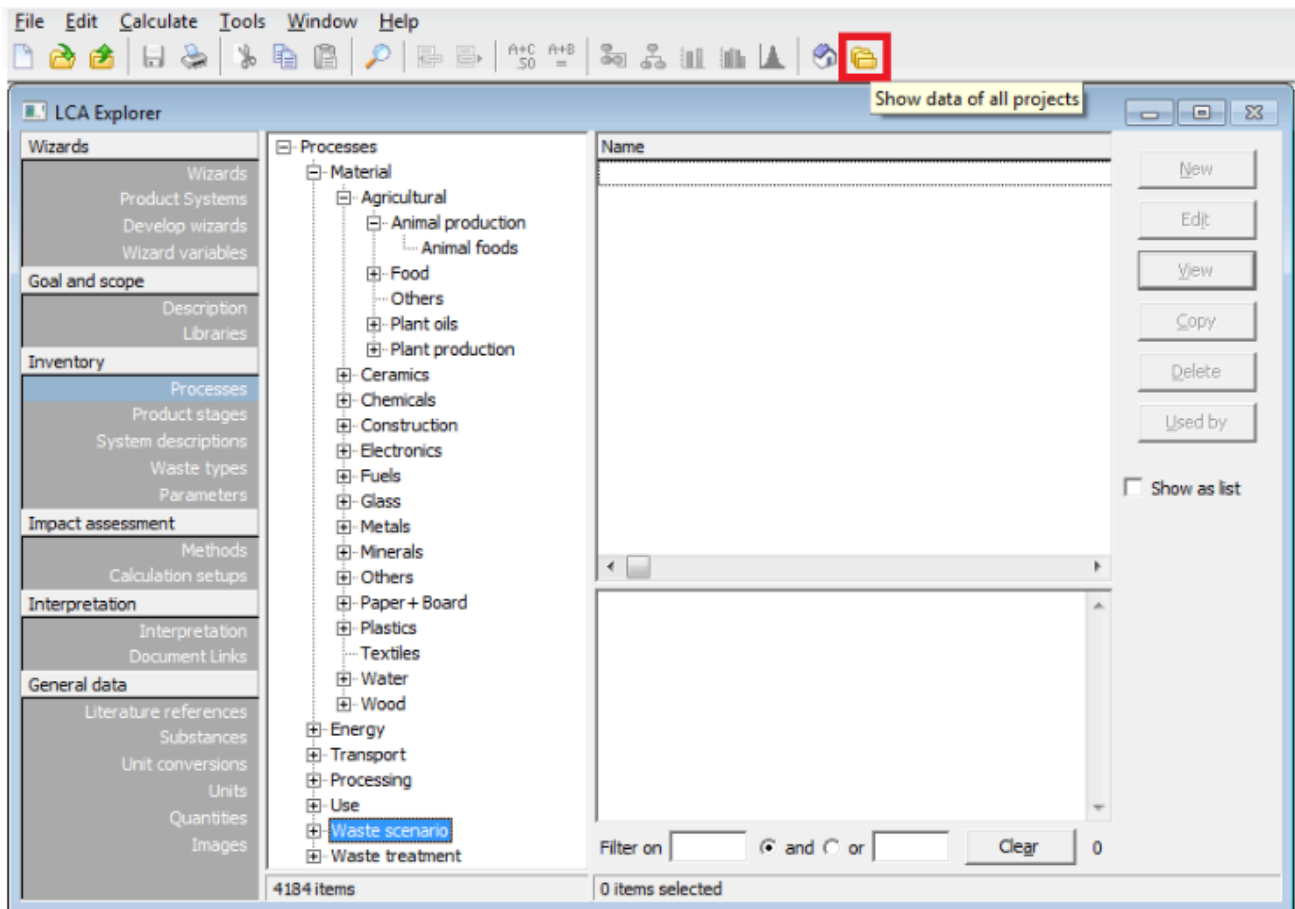
Figura 5. Visualização da Rede (Network) no SimaPro.



Fonte: SIMAPRO, 2025.

A segunda funcionalidade é a aba Cheques (Checks) (Figura 6), utilizada após os cálculos. Ela permite identificar substâncias do modelo que não possuem fatores de caracterização no método de impacto selecionado. Esse recurso é essencial para evitar inconsistências, mas sua interpretação exige domínio de metodologias e bancos de dados.

Figura 6. Aba “Cheques” do SimaPro, indicando substâncias sem fator de caracterização.



Fonte: SIMAPRO, 2025.

A terceira ferramenta relevante (Figura 7) é o comando “Mostrar dados de todos os projetos” (*Show data from all projects*), que permite comparar fluxos e processos entre diferentes modelos criados pelo usuário. Trata-se de uma ferramenta poderosa, porém complexa, especialmente quando diversos projetos e subprojetos coexistem na mesma base de dados.

Figura 7. Recurso “Mostrar dados de todos os projetos” no SimaPro.

No	Substance	Compartment	Unit	Assembly model Sima (plastic)
1	Acenaphthylene	Water	ng	6,58
2	Acidity, unspecified	Water	mg	70,8
3	Actinides, radioactive, unspecified	Water	Bq	0,0683
4	Aerosols, radioactive, unspecified	Air	Bq	0,0103
5	Aluminium	Air	g	0,738
6	Aluminium	Water	g	4,25
7	Aluminium	Soil	mg	10,5
8	Ammonium, ion	Water	g	0,0328
9	Anhydrite	Raw	mg	4,24
10	Antimony	Water	mg	6,07
11	Antimony-122	Water	mBq	0,0182
12	Antimony-124	Air	µBq	0,0453
13	Antimony-125	Air	µBq	0,472
14	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Water	mg	0,822
15	Argon-41	Air	Bq	5,35
16	Arsenic	Water	mg	1,71
17	Barite	Water	g	0,125
18	Barium	Water	g	0,0252
19	Barium-140	Air	mBq	0,0307
20	Barium-140	Water	mBq	0,0799
21	Baryte	Raw	g	1,81
22	Basalt	Raw	g	0,83

Analyzing 1 p 'Model A'; Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.08 / Europe ReCiPe H/A

Fonte: SIMAPRO, 2025.

Por fim, a quarta funcionalidade (Figura 8) apresentada corresponde ao recurso de Conjunto de Parâmetros (*Parameter sets*), que possibilita variar parâmetros simultaneamente para realizar análises de sensibilidade e modelagem de cenários. Embora seja um dos recursos mais úteis para estudos avançados, é também uma das ferramentas menos intuitivas do software.

Figura 8. Aba de Conjuntos de Parâmetros do SimaPro.

No	Parameter set	No	Parameter	Defined in	Type	Gass - local	Glass - abroad	Plastic - local	Plastic - abroad
1	Gass - local	1	glass	Model B	Product stage	2,3	2,3	0	0
2	Glass - abroad	2	glassprocessing	Model B	Product stage	2,3	2,3	0	0
3	Plastic - local	3	plastic	Model B	Product stage	0	0	1,2	1,2
4	Plastic - abroad	4	plasticprocessing	Model B	Product stage	0	0	1,2	1,2
		5	transportdistance	Model B	Product stage	100	600	100	600

Fonte: SIMAPRO, 2025.

Esses exemplos reforçam porque ferramentas tradicionais de ACV, mesmo extremamente robustas, não são adequadas para produtores rurais ou usuários sem formação técnica específica. Os prints apresentados demonstram justificadamente a necessidade de desenvolver uma ferramenta mais simples, intuitiva e acessível, como o aplicativo proposto neste trabalho.

3.3 RENOVACALC

A RenovaCalc representa um instrumento fundamental no contexto da política nacional de biocombustíveis, o RenovaBio. Desenvolvida pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a ferramenta calcula a intensidade de carbono ($\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$) de biocombustíveis produzidos no Brasil, especialmente etanol e biodiesel. Para tanto, exige informações detalhadas tanto da etapa agrícola quanto da etapa industrial, o que garante precisão, mas também aumenta substancialmente o nível de complexidade.

Seu funcionamento depende da inserção de grande número de variáveis, como

produtividade agrícola, consumo de energia térmica e elétrica, transporte, teor de ATR, eficiência industrial, balanço energético, uso de insumos e diversos indicadores de desempenho ambiental. Como consequência, produtores sem assistência técnica podem enfrentar grandes dificuldades para preencher corretamente os parâmetros exigidos. Inclusive, muitos usuários relatam perda na unidade dos dados, confusão terminológica e dificuldade em interpretar os resultados finais — problemas que se intensificam pelo fato de a ferramenta ser estruturada em planilhas extensas e tecnicamente densas.

Apesar dessas limitações, a RenovaCalc é indispensável para produtores que desejam comercializar Créditos de Descarbonização (CBIOS), já que seus resultados determinam a Nota de Eficiência Energoambiental (NEEA). Isso significa que, embora complexa, a ferramenta exerce forte impacto econômico no setor sucroenergético. No entanto, essa complexidade excessiva inviabiliza seu uso como ferramenta cotidiana de manejo e gestão para produtores menores, reforçando a necessidade de instrumentos mais acessíveis.

Mesmo com a sua importância regulatória, a experiência prática de uso da RenovaCalc revela uma série de desafios operacionais que dificultam sua aplicação por produtores rurais e até mesmo por técnicos com pouca familiaridade com planilhas complexas. A ferramenta é estruturada em múltiplas abas interligadas do Excel, cada uma dedicada a um conjunto específico de dados — etapa agrícola, industrial, transportes, insumos, energia, indicadores de eficiência, entre outros. Esse formato, embora metodologicamente rigoroso, torna o preenchimento extenso, fragmentado e pouco intuitivo, especialmente para propriedades que não possuem sistemas organizados de registro de informações.

Para ilustrar essa complexidade, o primeiro print apresentado (Figura 9) corresponde à aba de Dados Primários do Produtor, que reúne as informações fundamentais utilizadas no cálculo da intensidade de carbono. Nessa aba, é possível identificar que a tabela possui dezenas de células, demandando o preenchimento de valores relativos a produtividade, insumos, uso de fertilizantes, consumo de combustíveis, manejo de resíduos, operações mecanizadas e outros parâmetros essenciais. A amplitude do formulário obriga o usuário, muitas vezes, a reduzir o zoom da tela para visualizar todas as variáveis simultaneamente, o que compromete ainda mais a clareza das informações e intensifica o risco de erros de preenchimento.

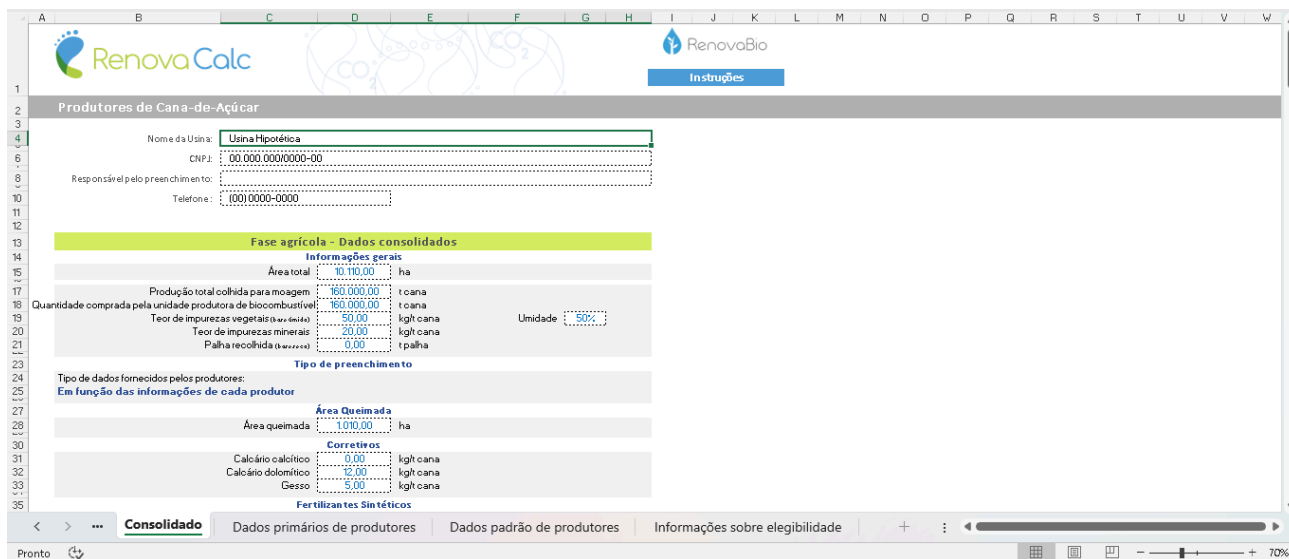
Figura 9. Aba “Dados Primários do Produtor” da RenovaCalc, evidenciando a grande quantidade de variáveis necessárias para o cálculo da intensidade de carbono.

Ano	Identificação do produtor de biomassa	CNPJ/CIFP	Informações gerais								Tipo de preenchimento	Área Queimada	Corretivos								
			Sistema de plantio	Área total	Produção total colhida para moagem	Quantidade comprada pela unidade produtora de biocombustível	Teor de impurezas vegetais	Umidade das impurezas vegetais	Teor de impurezas minerais	Palha recolhida			Área Queimada	Calcário calcítico	Calcário dolomítico	Gesso	Ureia	Fosfato Monoamônico (MAP)	Fosfato Monoamônico (MAP)	Fosfato diamônico (DAP)	Fosfato diamônico (DAP)
				ha	t cana	t cana	kg/t cana	%	kg/t cana	t palha			ha	kg/t cana	kg/t cana	kg/t cana	kg N/t cana	kg N/t cana	kg P ₂ O ₅ /t cana	kg N/t cana	kg P ₂ O ₅ /t cana
2010			10,00	800,00					0,00	0,00	10,00					100,00					
2011																					
2012																					
2013																					
2014																					
2015																					
2016																					
2017																					
2018																					
2019																					
2020																					
2021																					
2022																					
2023																					

Fonte: ANP, 2025.

A segunda imagem (Figura 10) corresponde à aba denominada Consolidado, onde o usuário deve informar valores adicionais referentes ao desempenho energético e operacional da unidade produtiva. Essa aba integra variáveis agrícolas e industriais, o que aumenta a densidade de informações exigidas. Essa seção é especialmente sensível, pois pequenas variações nos valores informados podem alterar de maneira substancial o resultado final da Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA). Essa necessidade de consolidação manual reforça a dificuldade operacional enfrentada pelos produtores, que muitas vezes se deparam com conceitos técnicos complexos, como consumo específico de vapor, balanço energético líquido, coeficiente de ATR, entre outros.

Figura 10. Aba “Consolidado” da RenovaCalc, onde informações agrícolas e industriais são integradas para o cálculo final.



Fonte: ANP, 2025.

Além do grande volume de dados de entrada, a própria apresentação dos resultados na planilha contribui para a percepção de complexidade. Os valores de intensidade de carbono ($\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$) e os componentes utilizados no cálculo são exibidos diretamente na folha de Excel, sem interface visual simplificada, ícones intuitivos ou sinais gráficos que facilitem a interpretação. Dessa forma, mesmo após o preenchimento completo das abas, muitos usuários relatam dificuldade para compreender quais fatores contribuíram mais para o desempenho energético e ambiental da produção, e como poderiam ajustar suas práticas para melhorar a eficiência. A complexidade para interpretar os resultados é demonstrada a seguir (Figura 11).

rigoriedade metodológica do IPCC, CETESB e MCTI com uma interface simples, interativa e acessível para produtores rurais.

A inovação mais evidente reside no foco exclusivo na cultura da cana-de-açúcar, permitindo que os fatores de emissão e as equações de cálculo sejam personalizados para essa realidade e variabilidade dos sistemas de produção. Isso inclui considerar particularidades como o manejo de palha, o uso recorrente de fertilizantes nitrogenados específicos, a dinâmica da soqueira, os diferentes tipos de calcário e a alta mecanização do setor.

Outro diferencial marcante é a usabilidade. Enquanto plataformas como SimaPro e RenovaCalc demandam conhecimento técnico avançado, o aplicativo desenvolvido a partir das capacidades de interação e visualização do ChatGPT apresenta uma interface intuitiva, com navegação guiada e explicações integradas. Isso é crucial no contexto brasileiro, onde boa parte da mão de obra rural possui baixa escolaridade formal, o que limita a adoção de ferramentas complexas. A inteligência artificial desempenha papel fundamental nesse processo, adaptando a linguagem, simplificando a apresentação dos resultados e fornecendo suporte direto dentro do próprio aplicativo.

A delimitação aos Escopos 1 e 2 também constitui um componente inovador, pois torna o inventário mais ágil, prático e aplicável ao cotidiano da fazenda. Ao focar nos escopos que o produtor pode controlar diretamente, combustíveis, eletricidade, fertilizantes e corretivos, o aplicativo oferece informações realmente úteis para o manejo e para decisões rápidas de mitigação. Isso contrasta com ferramentas mais amplas, que incluem o Escopo 3 e acabam exigindo dados inacessíveis ao produtor.

Além disso, o aplicativo não se limita ao cálculo da pegada de carbono: ele apresenta sugestões personalizadas de mitigação, como alternativas de fertilizantes, ajustes de dosagem, substituição de combustíveis, correção adequada com calcário e estratégias de sequestro de carbono. Como o sistema utiliza dados reais inseridos pelo produtor, essas recomendações se tornam altamente aplicáveis e de baixo custo, auxiliando diretamente no planejamento agrícola.

Por fim, a interface permitirá compartilhamento de relatórios, organização dos cálculos anteriores, transparência das equações e atualização automática dos fatores de emissão sempre que novas diretrizes do IPCC, CETESB ou MCTI forem publicadas, algo essencial diante das rápidas mudanças nas políticas climáticas e dos compromissos globais, como os discutidos na COP 30.

4 METODOLOGIA

4.1 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO

O desenvolvimento do app será realizado utilizando as capacidades de visualização nativa e interação do ChatGPT, utilizando-se da ferramenta interna dessa inteligência artificial, que possibilita editar o código do aplicativo e ver os resultados das alterações instantaneamente, assim podendo ser criada uma ferramenta intuitiva e acessível para produtores de cana-de-açúcar. Após o desenvolvimento, o aplicativo será disponibilizado para o público através de plataformas de distribuição convencionais, como a Play Store e a App Store, garantindo ampla acessibilidade. O objetivo é fornecer informações detalhadas sobre as emissões, identificar oportunidades de mitigação e, assim, contribuir para a sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro e para o enfrentamento das mudanças climáticas globais. A precisão dos cálculos será garantida pela adoção das diretrizes metodológicas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), cujas metodologias são reconhecidas e utilizadas mundialmente para a elaboração de inventários de GEE no setor agropecuário (PINTO, 2024).

Essa metodologia representa uma das inovações mais recentes no campo do desenvolvimento de software, permitindo que o programador descreva a estrutura desejada por meio de comandos em linguagem natural, e a própria inteligência artificial gere automaticamente toda a linha de código necessária para a aplicação (OLIVEIRA; MARTINS; NASCIMENTO, 2023).

Em contraste, o modelo tradicional de desenvolvimento, conhecido como hard code, exige a escrita manual do código em linguagens específicas, como Python, Java ou C#, demandando alto nível de especialização técnica e longos ciclos de implementação (SOUZA; CARVALHO, 2022). Já o low code surge como uma alternativa intermediária, combinando elementos gráficos e blocos de automação com pequenas inserções de código para personalizações específicas. Ambos os modelos, low code e no code, vêm sendo amplamente adotados por empresas e instituições públicas devido à sua capacidade de acelerar a entrega de soluções digitais e reduzir custos operacionais.

A escolha pelo desenvolvimento no code, no caso deste projeto, deve-se à sua rapidez, eficiência e baixo custo. Essa abordagem elimina a necessidade de equipes

extensas de programadores e permite atualizações contínuas com mínima dependência técnica. No contexto agrícola, essa característica é especialmente vantajosa, pois torna possível disponibilizar tecnologias de monitoramento ambiental a um público mais amplo, incluindo pequenos e médios produtores rurais que carecem de acesso a soluções computacionais complexas (BALABENUTE; LUCCA FILHO, 2024).

Após o desenvolvimento no ambiente de interação do ChatGPT, o aplicativo será exportado para plataformas convencionais de distribuição digital, como a Google Play Store e a Apple App Store. Essa etapa garantirá que a ferramenta alcance maior número de usuários, mantendo a compatibilidade com dispositivos móveis amplamente utilizados no campo. Ao unir a inteligência artificial e o paradigma no code, o projeto se insere na vanguarda da Agricultura 4.0, promovendo a democratização da tecnologia e incentivando práticas de gestão ambiental sustentável no setor sucroenergético brasileiro (Ferreira *et al.*, 2024).

A interface do aplicativo foi projetada para oferecer uma experiência de uso simples, intuitiva e interativa, permitindo que o produtor realize seus cálculos de forma prática e sem necessidade de conhecimento técnico avançado. O usuário poderá efetuar quantos cálculos desejar, criando inventários distintos para diferentes áreas ou ciclos produtivos de cana-de-açúcar. Para isso, haverá uma página exclusiva para inserção de dados, na qual serão solicitadas informações rotineiras do manejo agrícola, como área cultivada, produtividade média, tipo e quantidade de fertilizantes utilizados e volume de combustíveis empregados nas operações mecanizadas.

Após o envio dos dados, o aplicativo realizará o processamento automático das informações, aplicando metodologias de cálculos baseadas nas diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os fatores de emissão adotados seguirão padrões reconhecidos internacionalmente, possibilitando a geração de estimativas detalhadas de emissões em quilogramas de CO₂ equivalente (kg CO₂eq) por hectare. Cada cálculo poderá ser salvo, revisitado e comparado, permitindo ao usuário acompanhar a evolução de suas emissões e identificar oportunidades de redução ao longo das safras.

O aplicativo também contará com uma aba de contato direto para suporte e assistência técnica, na qual o produtor poderá solicitar ajuda ou consultoria personalizada sobre manejo sustentável e estratégias de mitigação. Essa funcionalidade reforça o caráter participativo e educativo da ferramenta, aproximando o agricultor das práticas de gestão de emissões e contribuindo para a consolidação da agricultura de baixo carbono.

As adaptações metodológicas do aplicativo foram desenvolvidas considerando as

particularidades da cultura da cana-de-açúcar, especialmente no contexto brasileiro. Entre os principais parâmetros incorporados estão o uso de fertilizantes nitrogenados — como ureia e nitrato de amônio — e seus respectivos fatores de emissão de óxido nitroso (N_2O), além da porcentagem de palhada mantida no solo após a colheita mecanizada crua, que influencia diretamente o sequestro e a liberação de carbono. Parte dessa palhada atua como cobertura morta, favorecendo o acúmulo de matéria orgânica e a retenção de carbono no solo, enquanto outra fração se decompõe liberando CO_2 e CH_4 para a atmosfera (Abreu, 2024).

Após o processamento, o usuário será direcionado automaticamente à página de resultados, desenvolvida para proporcionar uma visualização clara, dinâmica e personalizável. Os dados serão apresentados por meio de gráficos interativos — em formato de barras ou pizza — permitindo alternar entre representações em valores absolutos ($kg\ CO_2eq$) e percentuais relativos. A estrutura de visualização também incluirá diferentes níveis de detalhamento, como um gráfico geral de emissões totais, painéis específicos por setor produtivo (fertilizantes, combustíveis, energia elétrica, resíduos) e comparativos entre emissões diretas e indiretas, garantindo transparência e compreensão intuitiva dos resultados (Ferreira *et al.*, 2024).

Em versões futuras, após a validação completa dos cálculos e a consolidação de um sistema estável e confiável, o aplicativo será expandido para incluir recomendações automáticas de mitigação. Essa funcionalidade permitirá estimar, por exemplo, a quantidade de árvores necessárias para compensar as emissões totais ou a proporção da área que precisaria ser destinada a reflorestamento. Essa proposta dialoga com o movimento global conhecido como “*Free Carbon*” ou “*Net Zero*” — a tendência mundial de busca por emissões líquidas zero de carbono, amplamente adotada por multinacionais e incorporada em políticas corporativas e ambientais de transição energética (Pereira *et al.*, 2023).

A estrutura conceitual do aplicativo também se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ao ODS 15 (Vida Terrestre). No contexto atual, em que a COP 30 coloca o Brasil em posição de destaque nas negociações climáticas globais, o desenvolvimento de tecnologias agrícolas voltadas à quantificação e redução das emissões de GEE ganha relevância estratégica. Assim, o aplicativo propõe-se a ser não apenas uma ferramenta técnica de cálculo, mas também um instrumento de engajamento e alinhamento com as metas internacionais de neutralidade de carbono, fortalecendo a competitividade do agronegócio brasileiro frente

às exigências do mercado global de sustentabilidade.

Para ilustrar de forma clara o processo de desenvolvimento do aplicativo e demonstrar a estrutura lógica utilizada na implementação dos cálculos e funcionalidades, inclui-se a seguir um exemplo das linhas de código geradas e refinadas por meio do ChatGPT, que serviram como base para a construção das principais rotinas do sistema. Esse trecho exemplifica a forma como as funções foram organizadas, validando dados de entrada, processando os fatores de emissão e estruturando os resultados apresentados ao usuário. A exibição desse código permite evidenciar a transparência metodológica e o caráter técnico das etapas de programação do aplicativo, conforme apresentado a seguir (Figura 12).

Figura 12. Exemplo de linhas de código no desenvolvimento do aplicativo.

```
1 import React, { useState, useEffect } from 'react';
2 import { Piechart, Pie, Cell, Tooltip, ResponsiveContainer, Bar, XAxis, YAxis, CartesianGrid } from 'recharts';
3
4 // Aplicativo para Cálculo das Emissões de Gases de Efeito Estufa para a Cultura da Cana-de-Açúcar
5
6 export default function calculadoraCanaFuncional(){
7   // pages: entrada, inicio, novo, resultado, historico, metodologia, contato
8   const [page, setPage] = useState('entrada');
9   const [sidebarOpen, setSidebarOpen] = useState(false);
10
11   // Inputs principais
12   const [nomeCalc, setNomeCalc] = useState('');
13   const [area, setArea] = useState(''); // ha
14   const [produtividade, setProdutividade] = useState(''); // t/ha
15
16   // Combustíveis (unidades podem ser ajustadas depois; aqui sugerido L/ha)
17   const [diesel, setDiesel] = useState('');
18   const [gasolina, setGasolina] = useState('');
19   const [etanol, setEtanol] = useState('');
20   const [glp, setGlp] = useState(''); // GLP
21
22   // Fertilizantes nitrogenados específicos (por enquanto só registrando; cálculo de N detalhado pode vir depois)
23   const [ureia, setUreia] = useState('');
24   const [sulfatoAmonio, setSulfatoAmonio] = useState('');
25   const [nitratoMagnesio, setNitratoMagnesio] = useState('');
26
27   // Calcários
28   const [calcarioCalcitico, setCalcarioCalcitico] = useState('');
29   const [calcarioDolomítico, setCalcarioDolomítico] = useState('');
30   const [calcarioMagnesiano, setCalcarioMagnesiano] = useState('');
31
32   // Resíduos e subprodutos
33   const [residuosCana, setResiduosCana] = useState(''); // t/ha (palha/ponta) - Liga com palhaExtra
34   const [tortaFiltro, setTortaFiltro] = useState(''); // kg/ha
35   const [vinhaca, setVinhaca] = useState(''); // m2/ha
36 }
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.2 ESCOPO E LIMITES DO INVENTÁRIO

O inventário de Gases de Efeito Estufa (GEE) desenvolvido pelo aplicativo será estruturado conforme as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019), incorporando os Escopos 1 e 2, sendo emissões relativas à

produção “*inside the farm gate*”, dentro da fazenda. A decisão de limitar o cálculo a esses dois níveis busca garantir a precisão dos resultados, a viabilidade da coleta de dados e a simplicidade operacional para o usuário final — neste caso, o produtor de cana-de-açúcar. O período de referência do inventário será de um ano, baseando-se na safra da cultura (exemplo: safra 2024/2025), permitindo a avaliação completa de um ciclo produtivo anual.

O Escopo 1 (Emissões Diretas) engloba todas as emissões de GEE provenientes de fontes controladas diretamente pela propriedade rural, ou seja, aquelas que ocorrem dentro dos limites físicos da fazenda. No caso da cana-de-açúcar, serão considerados os gases emitidos pelo uso-queima de combustíveis fósseis em máquinas agrícolas, pela aplicação de fertilizantes nitrogenados e calcário e pela decomposição de resíduos agrícolas. Essas informações serão coletadas diretamente do produtor e processadas automaticamente pelo aplicativo, permitindo uma estimativa precisa das emissões sob controle direto da atividade produtiva.

O Escopo 2 (Emissões Indiretas por Energia Comprada) abrange as emissões resultantes da geração de eletricidade adquirida e consumida na propriedade, como aquelas utilizadas para bombeamento de irrigação, iluminação de galpões ou funcionamento de equipamentos. Embora o produtor não seja o responsável direto pela geração dessa energia, sua utilização representa uma fonte relevante de emissões associadas à operação agrícola, justificando sua inclusão no inventário.

O Escopo 3, que compreende outras emissões indiretas ao longo da cadeia de valor, como transporte de insumos, produção de fertilizantes, processamento industrial da cana e distribuição de produtos, não será incluído nesta etapa, uma vez que consideramos emissões de responsabilidade da empresa que produz, evitando assim a possibilidade de *double-counting*, ou contagem duplicada de emissões. A exclusão deve-se à complexidade e à dependência de dados externos, muitas vezes inacessíveis ao produtor rural. Essa escolha metodológica permite concentrar o aplicativo em cálculos de emissões diretas e indiretas controláveis, garantindo resultados confiáveis, auditáveis e de aplicação prática imediata.

A lógica de cálculo aplicada no aplicativo seguirá essa estrutura de escopos integrados, permitindo ao usuário visualizar a contribuição individual de cada fonte emissora. Por exemplo, as emissões diretas (Escopo 1) de fertilizantes e combustíveis serão apresentadas em conjunto e separadamente das emissões indiretas (Escopo 2)

decorrentes do consumo de energia elétrica, proporcionando uma visão abrangente e segmentada das emissões totais da propriedade. Esse formato facilita a identificação dos principais pontos de emissão e a priorização de ações mitigadoras de maior impacto ambiental.

4.3 FATORES DE EMISSÃO PARA OS CÁLCULOS DE GEE

A metodologia adotada para os cálculos das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no aplicativo fundamenta-se nos princípios estabelecidos pelo IPCC e, nos referenciais técnicos publicados pela CETESB e MCTI, que atualmente representam as normas mais amplamente reconhecidas e utilizadas no Brasil e no mundo para elaboração de inventários organizacionais e agropecuários. Os resultados serão apresentados em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), unidade que permite integrar diferentes gases de efeito estufa em uma mesma métrica. Essa conversão utiliza os Potenciais de Aquecimento Global (PAG) definidos para 100 anos, que são:

Dióxido de carbono (CO₂) – 1

Metano (CH₄) – 25

Óxido nitroso (N₂O) – 298

Esses valores refletem o impacto relativo de cada gás na intensificação do efeito estufa adicional e justificam a necessidade de convertê-los para uma mesma unidade, dada sua diferença de reatividade, tempo de permanência na atmosfera e influência nas reações químicas que controlam o balanço radiativo do planeta.

Para cada fonte emissora, os cálculos seguirão a estrutura geral definida pelo IPCC:

$$Emissão (CO_2eq) = Atividade \times Fator \ de \ Emissão \times PAG$$

Onde a “Atividade” representa o consumo ou quantidade informada pelo usuário, o “Fator de Emissão” (FE) corresponde ao valor tabulado que quantifica a emissão por unidade de atividade (por exemplo, kg CO₂eq por litro de diesel), e o PAG converte a emissão de CH₄ e N₂O para CO₂ equivalente.

A pegada de carbono (C) da cultura da cana de açúcar será calculada no app através dos valores obtidos nos cálculos da emissão total dos sistemas de produção da

cultura da cana de açúcar (ton CO₂eq/ha), considerando emissões do escopo 1 emissões que acontecem dentro da fazenda e escopo 2, energia comprada, dividido pela produtividade média de colmos frescos (ton/há), sendo a pegada apresentada em kg de CO₂eq/ton de cana produzida ou por hectare.

4.3.1 Emissões Do Uso E Aplicação De Calcário

As emissões da aplicação do calcário foram calculadas a partir da equação 1 :

Equação 1

$$CO_{2_lime} = \frac{(CO_2-C\ Emission \times \frac{44}{12})}{A_i} = \frac{((M_{CalciticLime} \cdot EF_{CalciticLime}) + (M_{Dolomite} \cdot EF_{Dolomite})) \times \frac{44}{12}}{A_i}$$

Onde:

CO₂-C Emission □ emissões anuais de C provenientes da aplicação de calcário, toneladas C ano⁻¹.

MLime,j □ Quantidade anual de calcário calcítico (CaCO₃) ou dolomítico (CaMg(CO₃)₂), toneladas por ano.

EFCO_{2,j} □ fator de emissão, tonelada de C (tonelada de calcítico ou dolomítico)⁻¹.

Ai □ Área da unidade amostral

J □ Calcário calcítico ou dolomítico

4.3.2 Aplicação E Uso De Fertilizante Nitrogenado

As emissões diretas da aplicação do fertilizante nitrogenado serão calculadas a partir da equação 2:

Segundo o Refinamento de 2019 das Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa de 2006, a quantificação deve ser diferenciada por tipo de gado, sistema de manejo de esterco e sistema de produtividade. Foram estimados aplicando-se a Equação (2):

Equação 2

$$N_2O_{Soil_bsl,i,t} = N_2O_{fert_bsl,i,t} + N_2O_{md_bsl^i,t} + N_2O_{fix_bsl,i,t}$$

Onde:

$N_2O_{Soil_bsl,i,t}$ □ Emissões de óxido nitroso devido a entrada de nitrogênio (tCO₂eq/ha)

$N_2O_{fert_bsl,i,t}$ □ emissões de óxido nitroso devido ao uso do fertilizante usado t (tCO₂eq/ha)

$N_2O_{md_bsl,i,t}$ □ Emissões de óxido nitroso devido à deposição de estrume para a unidade de amostra i no ano t (tCO₂eq/ha)

$N_2O_{Nfix_bsl,i,t}$ □ Emissões de óxido nitroso de resíduos vegetais devido ao uso de espécies fixadoras de N para a unidade de amostra i no ano t (tCO₂eq/ha)

As emissões diretas de N₂O dos solos manejados são estimadas separadamente das emissões indiretas, embora usando um conjunto comum de dados de atividade.

Equação 3

$$N_2O_{fert_bsl,i,t} = N_2O_{fert_bsl,direct,i,t} + N_2O_{fert_bsl,indirect,i,t}$$

Onde:

$N_2O_{fert_bsl,direct, I,t}$ □ Emissões diretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes no ano t (t CO₂eq/ha)

$N_2O_{fert_bsl,indirect, I,t}$ □ Emissões indiretas devido ao uso de fertilizante (t CO₂eq/ha)

As emissões diretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes no cenário de base são quantificadas nas equações a seguir:

Equação 4 e 5

$$\overline{N_2O_{fert_bsl,direct,i,t}} = \frac{\left[(F_{SN,bsl,i,t} + F_{ON,bsl,i,t}) \times EF_{Ndirect} \times \frac{44}{28} \times GWP_{N_2O} \right]}{A_i}$$

$$F_{SN,bsl,i,t} = \sum_{SF} M_{bsl,SF,i,t} \times NC_{SF}$$

$$F_{ON,bsl,i,t} = \sum_{OF} M_{bsl,OF,i,t} \times NC_{OF}$$

Onde:

$\overline{N_2O_{fert_bsl,direct,i,t}}$ □ Areal média das emissões diretas de nitro devido ao uso de fertilizantes para a unidade de amostra i no ano t (t CO₂eq/ha)

FSN,bsl,I,t □ Fertilizante nitrogenado sintético aplicado à unidade de amostra I no ano t (t N)

FON,bsl,I,t □ Adubação nitrogenada orgânica aplicada à unidade amostral I no ano t (t N)

EFNdirect □ Fator de emissão para emissões de óxido nitroso a partir de adições de N de fertilizantes sintéticos, corretivos orgânicos e resíduos vegetais (t N₂O – N/t N aplicado).

Mbsl, SF,I,t □ Massa de fertilizante sintético contendo N tipo SF aplicada à unidade de amostra I no ano t (adubo t)

NCSF □ Teor de N de fertilizantes sintéticos tipo SF (t N/t fertilizer)

Mbsl, OF,I,t □ Massa de fertilizante orgânico contendo N tipo OF aplicada à unidade de amostra I no ano (adubo t)

NCOF □ Teor de N do tipo de fertilizante sintético OF (t N/t fertilizer)

SF □ Fertilizante nitrogenado sintético tipo

OF □ Tipo de fertilizante nitrogenado orgânico

44/28 □ Razão de massa molar de N₂O para N para converter as emissões de N₂O – N em emissões de N₂O.

Ai □ Unidade amostral

Quando as emissões de óxido nitroso devidas à utilização de espécies fixadoras de N são quantificadas no cenário de base utilizando as seguintes equações:

Equação 6

$$\overline{N_2O_{Nfix_{bsl},i,t}} = \frac{(F_{CR,bsl,i,t} \times EF_{Ndirect} \times \frac{44}{28} \times GWP_{N2O})}{A_i}$$

Onde:

$\overline{N_2O_{Nfix_{bsl},i,t}}$ □ média das emissões indiretas de óxido nitroso de resíduos vegetais devido ao uso de espécies fixadoras de N a unidade de amostra I no ano t (t CO₂eq/ha)

FCR,bsl,I,t □ Quantidade de N nas espécies fixadoras de N (acima e abaixo do solo) retornada aos solos para a unidade de amostra I no ano t (tN).

EFNdirect □ Fator de emissão para emissões de óxido nitroso a partir de adições de N de fertilizantes sintéticos, corretivos orgânicos e resíduos vegetais (t N₂O – N/t N aplicado).

Ai □ Unidade amostral

Equação 7

$$F_{CR,bsl,i,t} = \sum_{g=1}^G MB_{g,bsl,i,t} \times N_{content,g}$$

Onde:

$MB_{g,bsl,i,t}$ □ Matéria seca anual (acima e abaixo do solo) das espécies fixadoras de N g devolvidas aos solos para a unidade de amostra I no ano (t dm)

$N_{content,g}$ Fração de N na matéria seca para as espécies fixadoras de N g (t N/t dm).

4.3.3 Emissão Indiretas Do N₂O

As emissões indiretas de nitrogênio decorrentes do uso de fertilizantes no cenário de base são quantificadas pelas seguintes equações:

Equação 8

$$\overline{N_2O_{fert,bsl,indirect,i,t}} = \frac{(N_2O_{fert,bsl,volat,i,t} - N_2O_{fert,bsl,leach,i,t})}{A_i}$$

Equação 9

$$N_2O_{fert,bsl,volat,i,t} = \left[(F_{SN,bsl,i,t} \times Frac_{GASF,l,S}) + (F_{ON,bsl,i,t} \times Frac_{GASM,l,S}) \right] \times EF_{Nvolat} \times \frac{44}{28} \times GWP_{N_2O}$$

Equação 10

$$N_2O_{fert,bsl,leach,i,t} = (F_{SN,bsl,i,t} + F_{ON,bsl,i,t}) \times Frac_{LEACH,l,S} \times EF_{Nleach} \times \frac{44}{28} \times GWP_{N_2O}$$

Onde:

$\overline{N_2O_{fert,bsl,indirect,i,t}}$ □ Área média das emissões indiretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes para a unidade de amostra I no ano t (t CO₂eq/ha)

$N_2O_{fert,bsl,volat,i,t}$ □ Emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da deposição atmosférica de N volatilizado pelo uso de fertilizantes na unidade amostral I no

ano t (t CO₂eq)

$N_2O_{fert,bsl,volat,i,t}$ □ Emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da lixiviação e do escoamento superficial de N, nas regiões onde ocorre a lixiviação e o escoamento superficial, devido ao uso de fertilizantes na unidade amostral I no ano t (t CO₂eq)

$FracGASF,I,t$ □ Fração de todo o N sintético adicionado aos solos que volatiliza como NH₃ e NO_x para o sistema de manejo de esterco S e pecuária tipo I (adimensional).

$FracGASM,I,t$ □ Fração de todo o N orgânico adicionado aos solos e N em esterco e urina depositados nos solos que volatiliza como NH₃ e NO_x para o sistema de manejo de esterco S e pecuária tipo I (adimensional).

EFN_{volat} □ Fator de emissão de óxido nitroso por deposição atmosférica de N em solos e superfícies de água (t N₂O – N/(t NH₃ – N + NO_x – N volatilizado).

$FracGASM,I,t$ □ Fração de todo o N orgânico adicionado aos solos e N em esterco e urina depositados nos solos que volatiliza como NH₃ e NO_x para o sistema de manejo de esterco S e pecuária tipo I (adimensional).

$FracLEACH,I,t$ □ Fração de N (sintético ou orgânico) adicionado aos solos e em esterco e urina depositados nos solos que é perdido por lixiviação e escoamento, em regiões onde ocorre lixiviação e escoamento, para sistema de manejo de esterco S e pecuária tipo I (adimensional)

EFN_{Leach} □ Fator de emissão para emissões de óxido nitroso por lixiviação e escoamento superficial (t N₂O – N/t N lixiviado e escoamento)

O termo FSN refere-se à quantidade anual de fertilizante nitrogenado sintético aplicado aos solos. É estimado a partir da quantidade total de fertilizante sintético consumido anualmente pela unidade de quantificação. Os dados anuais de consumo de fertilizantes, fórmula e quantidade (kg) serão inseridos no app pelos produtores.

Adubo nitrogenado orgânico" (FON) refere-se à quantidade de aporte de N orgânico aplicado nos solos, no caso da cana de açúcar, a vinhaça e torta de filtro, e é calculado usando a equação 11 Isso inclui esterco animal aplicado, lodo de esgoto aplicado ao solo, composto aplicado aos solos, bem como outras alterações orgânicas de importância regional para a agricultura (por exemplo, resíduos de transformação, guano, resíduos de cervejaria etc.). A adubação nitrogenada orgânica (FON) é calculada usando a equação 11:

Equação 11

$$F_{ON} = F_{AM} + F_{COMP} + F_{OOA}$$

Onde:

FON □ total anual de fertilizantes nitrogenados orgânicos aplicados em solos que não sejam animais em pastejo, kg Nyr-1

FAM □ quantidade anual de esterco animal de N aplicado aos solos, kg N ano-1.

FCOMP □ quantidade anual de N total de composto aplicado nos solos (garantir que o N do estrume no composto não seja duplamente contado), kg N ano-1.

FOOA □ quantidade anual de outros aditivos orgânicos utilizados como fertilizantes.

4.3.4 Diesel Utilizado Nas Operações Agrícolas

As emissões diretas da aplicação de diesel serão calculadas a partir da equação 3:

$$E_{Dieste} = \text{Consumo de diesel (Litros)} * EF_{CO_2eq}$$

4.3.5 Dados A Serem Utilizados Para Os Cálculos Das Emissões

A etapa de coleta de dados constitui o núcleo metodológico do inventário de emissões de GEE, pois é a partir dela que o aplicativo realizará todos os cálculos das estimativas de emissões de CO₂ equivalente. Para garantir precisão, transparência e rastreabilidade, o sistema solicitará ao usuário informações detalhadas sobre o uso dos principais insumos (kg), combustíveis (Litros), corretivos (kg), resíduos (produtividade da cultura, ton/há) e outros usos e aplicações de insumos associados à produção de cana-de-açúcar. Esses dados serão organizados na interface atrás do backend, e a tabela a seguir contém todas os dados consideradas, com suas unidades, fatores de emissão correspondentes (Tabela 1).

Tabela 1. Fontes de emissão de GEE, unidades de uso e Fatores de emissão (kg CO₂eq) para cálculo nos inventários de gases de efeito estufa para a cultura da cana de açúcar.

Fonte de emissão	Unidade	FE (Kg CO ₂ eq)
Diesel	L/ano	2,681
Gasolina	L/ano	2,212

Etanol	L/ano	0,0
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	Kg/ano	2,96
Ureia (Emissão direta)	Kg CO ₂ eq/Kg N (N ₂ O)	7,49
Ureia (Emissão indireta)	Kg CO ₂ eq/Kg N (N ₂ O)	2,22
Ureia (CO ₂)	Kg CO ₂ eq/Kg N (CO ₂)	0,2
Sulfato de amônio (Emissão direta)	Kg CO ₂ eq/Kg N	7,49
Sulfato de amônio (Emissão indireta)	Kg CO ₂ eq/Kg N	1,76
Nitrato (Emissão direta)	Kg CO ₂ eq/Kg N	7,49
Nitrato (Emissão indireta)	Kg CO ₂ eq/Kg N	1,3
Calcário calcítico	Kg C/ton	0,12
Calcário dolomítico	Kg C/ton	0,13
Resíduos da cana-de-açúcar	Ton/há/ano	4,0
Energia elétrica	kWh/ano	0,0545
Torta de Filtro (CH ₄)	Kg de CH ₄ /Kg matéria seca	0,0012
Torta de Filtro (N ₂ O)	Kg de N ₂ O-N/Kg N	0,007
Vinhaça (CH ₄)	Kg de CH ₄ /m ³	0,0005
Vinhaça (N ₂ O)	Kg de N ₂ O-N/Kg N	0,005%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após a inserção desses dados na base de cálculos, o aplicativo poderá calcular as estimativas das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, utilizando as equações do IPCC. Cada informação solicitada possui uma justificativa técnica e ambiental específica, já que diferentes fontes emitem diferentes gases, por mecanismos distintos, e com magnitudes muito variadas.

O consumo de combustíveis líquidos, como diesel, gasolina, etanol e gás liquefeito de petróleo (GLP), é essencial para estimar as emissões de dióxido de carbono provenientes da combustão. O diesel, por exemplo, é o principal combustível utilizado em operações mecanizadas no corte, plantio, tratos culturais e transporte da cana,

apresentando elevado consumo. A gasolina, embora menos empregada no campo, deve ser computada quando utilizada em motosserras, bombas menores ou veículos leves da propriedade. O etanol, por sua vez, apresenta fator de emissão biogênico zero, o que explica sua contribuição reduzida para o inventário. Já o GLP, frequentemente utilizado em oficinas e pequenas operações de manutenção, apresenta emissões proporcionais à massa consumida. Como esses combustíveis representam a maior parte das emissões diretas de CO₂ em sistemas agrícolas mecanizados, sua quantificação e emissões relativas é indispensável para diferenciar propriedades de baixo e alto impacto.

As informações sobre fertilizantes nitrogenados sintéticos são igualmente cruciais, pois constituem a principal fonte agrícola de N₂O, o gás de maior potencial de aquecimento global entre os três avaliados. O aplicativo solicitará a quantidade aplicada de ureia, sulfato de amônio e nitrato de magnésio, expressa em kg de fertilizante por hectare. Isso ocorre porque a metodologia do IPCC calcula as emissões com base no teor de N disponível no solo, e não na massa total do produto. A ureia, por exemplo, apresenta elevada taxa de volatilização de amônia (NH₃), que posteriormente pode gerar N₂O por meio de deposição indireta. O sulfato de amônio, embora menos volátil, tem maior propensão à nitrificação, enquanto o nitrato de magnésio apresenta maior risco de lixiviação, podendo gerar emissões indiretas significativas. A inserção desses dados permitirá que o aplicativo estime as emissões tanto diretas quanto indiretas, diferenciando entre propriedades que utilizam fontes mais ou menos eficientes de nitrogênio.

O uso de fertilizantes orgânicos, como torta de filtro e vinhaça, também será contabilizado. A torta de filtro é rica em matéria orgânica e possui teores relevantes de nitrogênio e fósforo, contribuindo para emissões de N₂O durante sua decomposição, especialmente em ambientes com umidade elevada. Já a vinhaça, subproduto da destilação do etanol, contém elevadas concentrações de potássio e compostos orgânicos, cuja aplicação pode acentuar processos microbiológicos no solo. A degradação desse material libera CO₂ biogênico e pode contribuir para a produção de N₂O, sendo essencial que sua aplicação seja inserida no sistema de avaliação.

A aplicação de corretivos de solo, como calcário calcítico ou dolomítico, será indicada pelo usuário em toneladas por hectare para o referido ano do inventário. A metodologia do IPCC determina que todo carbonato adicionado ao solo seja considerado emissor de CO₂, uma vez que os carbonatos reagem com os ácidos da solução do solo liberando dióxido de carbono como subproduto. O aplicativo diferencia os três tipos de calcário porque sua composição química (CaCO₃, CaMg (CO₃)₂ ou mistos), influencia sua

reatividade, embora o fator de emissão seja semelhante. É importante destacar que o gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) não será contabilizado como fonte emissora, já que sua aplicação não libera CO_2 , diferentemente do calcário.

Os resíduos agrícolas da cana-de-açúcar, pós-colheita mecanizada crua, serão calculados com base na produtividade média da cultura (t ha^{-1}), adotando-se um fator de resíduo-produção de 0,15, conforme valores amplamente utilizados em inventários agrícolas (COLE et al., 1997). Esses resíduos representam uma fonte significativa de aporte de nitrogênio ao solo durante a decomposição, contribuindo para emissões de N_2O . A magnitude dessas emissões depende fortemente da relação “carbono : nitrogênio” (C:N) da palhada, de sua taxa de decomposição e da disponibilidade de oxigênio no solo. Palhas com C:N baixo tendem a liberar nitrogênio mais rapidamente, favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação, enquanto palhas com C:N elevado promovem maior imobilização de N no curto prazo, reduzindo as emissões diretas. No caso da cana-de-açúcar, cuja palha apresenta relação C:N relativamente alta, o volume expressivo de resíduos deixados no campo após a colheita mecanizada sem queima pode resultar em emissões relevantes, especialmente quando há elevada deposição de biomassa (HUANG et al., 2004).

A eletricidade comprada será inserida no app pelo usuário (kWh/ano) e convertida automaticamente utilizando os fatores mensais e anuais da MCTI (2025), que variam conforme o ano e mês, sendo representativos da matriz energética do país (Tabela 2). Como a emissão não ocorre na propriedade, essa é considerada uma categoria de emissão indireta, mas é essencial para propriedades que utilizam irrigação, bombeamento, iluminação, ventilação ou sistemas de processamento primário da cana.

Tabela 2. Fatores Médio Mensais e Anual de 2024.

Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)												Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)
Mês												2024
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1127	0,0701	0,0564	0,0545
42	376	278	195	283	365	571	739	917				
1												

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A inserção correta de todas essas informações, uso, características e quantidades de insumos empregados na cultura serão de responsabilidade do usuário, podendo assim, garantir que o inventário reflita fielmente a realidade operacional da propriedade. Quanto mais precisos forem os dados, mais confiáveis serão os resultados e as recomendações fornecidas pelo aplicativo, como substituição de fontes nitrogenadas mais emissoras por alternativas mais eficientes, ajustes no manejo de resíduos ou redução do consumo de combustíveis fósseis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora o aplicativo ainda se encontre em fase de prototipagem e conceituação, já é possível descrever com clareza a sua arquitetura funcional, o estado atual de desenvolvimento e as potencialidades da ferramenta como instrumento de apoio à gestão de emissões de GEE na cultura da cana-de-açúcar.

Por exemplo, os resultados indicaram que os fertilizantes nitrogenados constituem a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa quando analisados em termos de intensidade de emissão por unidade de insumo aplicado, em razão das elevadas emissões de N₂O associadas aos processos de nitrificação e desnitrificação no solo, fortemente influenciados pelo manejo adotado, como dose, forma de aplicação e sincronização com a demanda da cultura.

5.1 PROGRESSO E FUNCIONALIDADES ATUAIS DESENVOLVIDAS

O aplicativo encontra-se em estágio de prototipagem conceitual, mas já apresenta uma estrutura funcional bem definida e capaz de simular a dinâmica completa do uso de insumos, calcular as estimativas das emissões de GEE para diferentes cenários produtivos da cultura da cana de açúcar, desde a inserção dos dados até a visualização dos resultados, assim como demonstrar o perfil das emissões para cenários produtivos diversos para a cultura da cana de açúcar e a pegada de C.

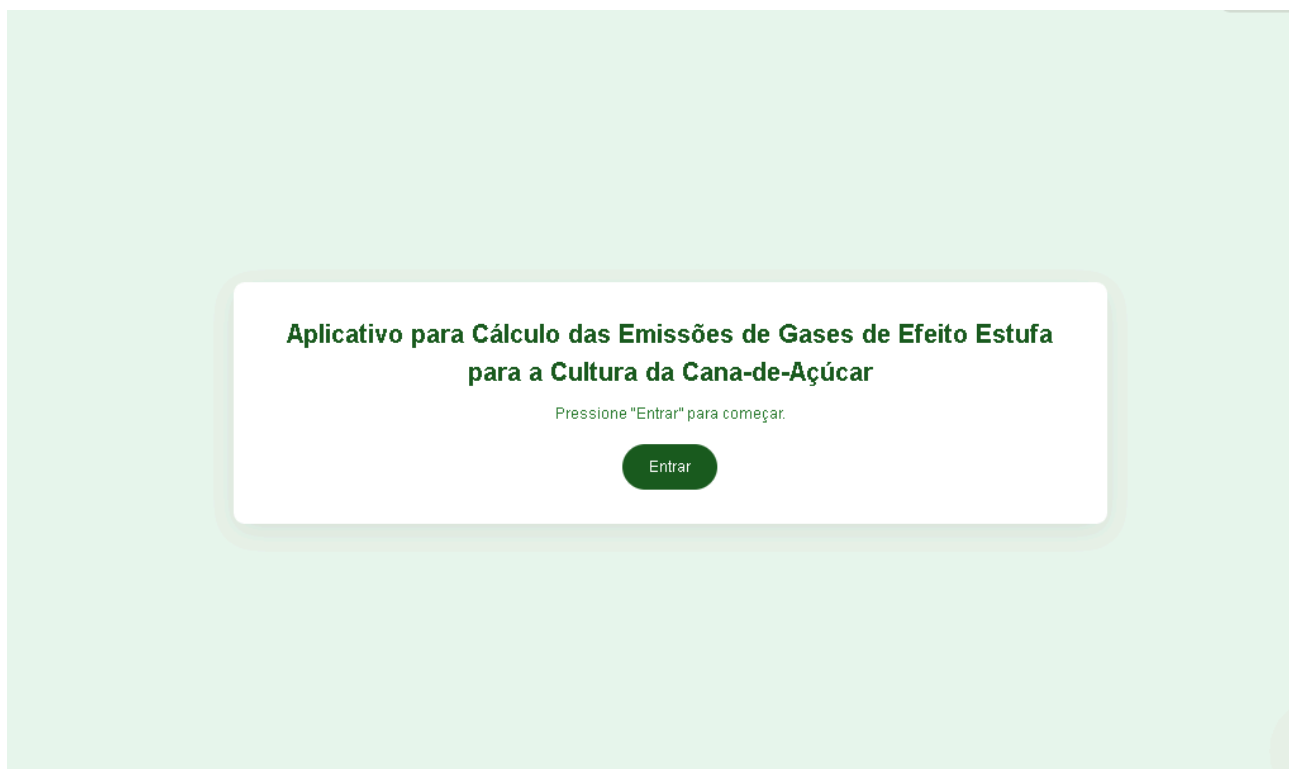
O desenvolvimento por meio de interação direta com o ChatGPT, utilizando uma abordagem no code, tornou o processo significativamente mais ágil e acessível do que seria possível em modelos tradicionais de programação. Em um cenário anterior, a criação de um aplicativo com características semelhantes demandaria uma equipe multidisciplinar composta por programadores, designers e analistas de sistemas, além de custos mais elevados e prazos prolongados. Atualmente, a inteligência artificial permite converter instruções textuais em lógicas de cálculo, elementos visuais e fluxos de navegação, reduzindo etapas e facilitando revisões constantes durante o desenvolvimento.

As funcionalidades implementadas até aqui já possibilitam simular o comportamento esperado da versão final do aplicativo, calculando as estimativas das emissões de GEE para cada fonte individualmente, conforme as informações do uso de insumos inseridas pelo usuário. A interface de entrada foi projetada para ser intuitiva e objetiva, permitindo que o produtor insira informações essenciais como área cultivada, produtividade da lavoura, tipo e quantidade de fertilizantes aplicados, consumo de combustíveis nas operações mecanizadas, eletricidade adquirida e uso de calcário. Cada campo do app foi pensado para evitar confusão, utilizando unidades padronizadas e organizando as informações em uma sequência lógica que reduz a necessidade de conhecimento técnico prévio. Esse cuidado busca atender especialmente a realidade de produtores que não possuem familiaridade com inventários de GEE ou com ferramentas digitais complexas.

A interação do usuário com o aplicativo foi planejada para seguir um fluxo lógico, intuitivo e coerente com boas práticas de usabilidade em sistemas digitais. Assim que o usuário abre o aplicativo, é exibida uma tela inicial exclusiva, contendo apenas o título “Estimativa de Inventário de Gases de Efeito Estufa” e um único botão de acesso. Essa escolha visa eliminar distrações, facilitar a compreensão imediata da finalidade do

aplicativo e conduzir o usuário de forma objetiva ao início do processo (Figura 13).

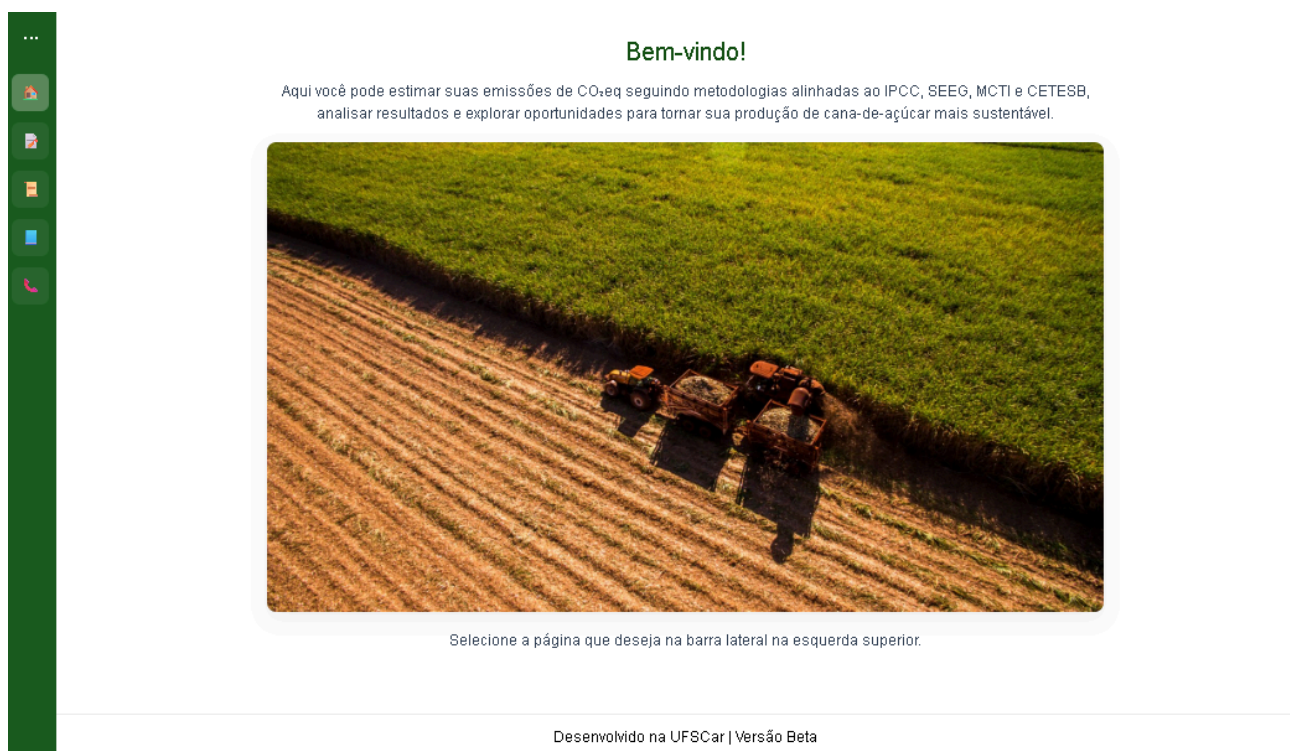
Figura 13. Visualização da tela Inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após pressionar o botão de acesso, o usuário é direcionado à Página Home, que constitui o ponto central da navegação. Nessa tela, encontra-se uma breve explicação sobre o propósito do aplicativo, destacando que se trata de uma ferramenta destinada a estimar emissões de GEE e apoiar a gestão ambiental na cultura da cana-de-açúcar, além de informações das páginas que o usuário poderá acessar e todas as funcionalidades disponíveis. A partir deste momento, todas as telas do aplicativo apresentam um rodapé fixo, exibindo a mensagem indicando o desenvolvimento realizado pelo Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), garantindo credibilidade, identidade institucional e transparência ao longo de toda a navegação (Figura 14).

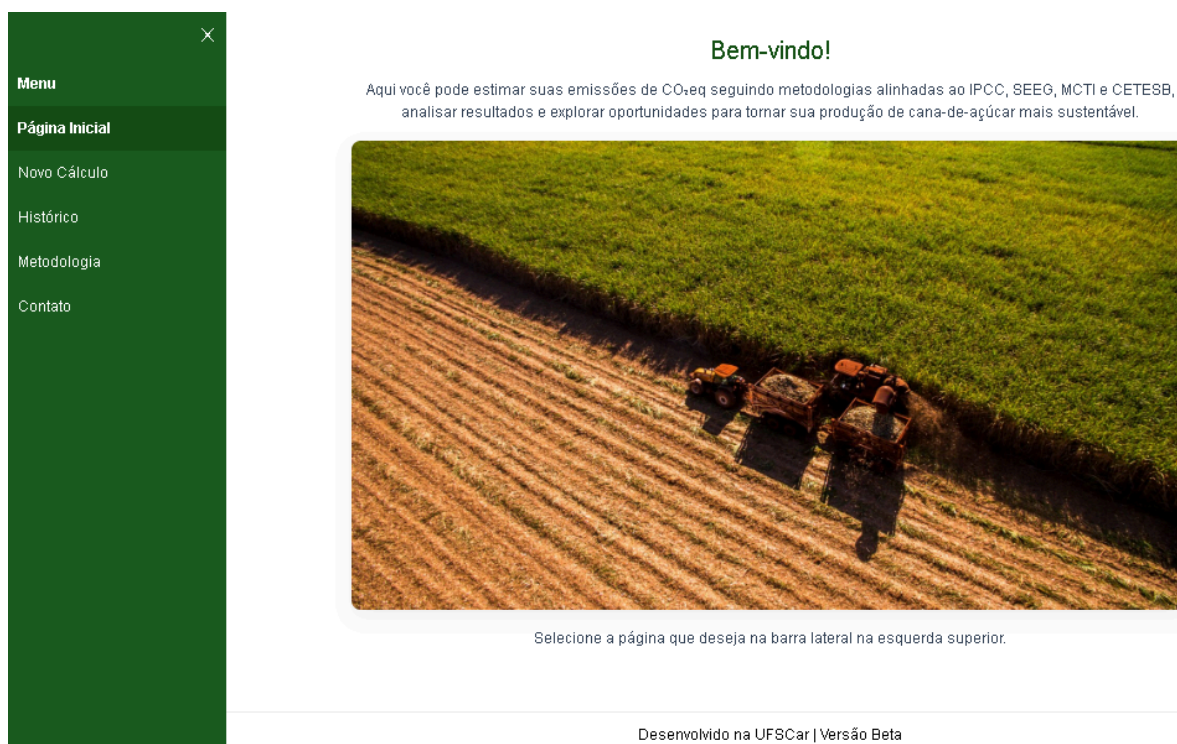
Figura 14. Visualização da tela Home com a aba lateral não expandida.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No canto superior esquerdo da Página Home encontra-se o ícone do menu expansível. Ao ser acionado, esse ícone revela uma aba lateral contendo todas as seções do aplicativo. Nesta aba lateral há atalho para as páginas de Início (Home), Novo Cálculo, Histórico de Cálculos, Metodologia e Contato. Essa aba permanecerá presente em todas as telas internas, permitindo ao usuário alternar rapidamente entre seções diferentes sem retornar à tela inicial e, quando recolhido, o menu permanece acessível com um único toque, favorecendo a navegação intuitiva (Figura 15).

Figura 15. Visualização da tela Home com a aba lateral expandida.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Ao selecionar “Novo Cálculo”, o usuário será direcionado para a área onde serão inseridos todos os dados necessários para estimar as emissões de GEE. Essa página foi projetada para ser objetiva e organizada em blocos temáticos, de modo a facilitar o preenchimento mesmo para usuários com pouca familiaridade com inventários de GEE. Nessa etapa, o usuário será solicitado a informar por exemplo a área de cultivo (ha), a produtividade da área de referência (ton/há) e quantidade utilizada de diesel (Litros), gasolina e etanol (Litros), conforme exibido no print a seguir (Figura 16).

Figura 16. Visualização da tela Novo Cálculo.

Novo Cálculo

Preencha os campos abaixo. Unidades sugeridas: área (ha), produtividade (t/ha), insumos em kg/ha ou L/ha conforme indicado.

Nome do cálculo

Ex: Talhão 3 - Safra 2025

Área avaliada (ha)

Produtividade de cana (t/ha)

Combustíveis (por hectare)

Diesel (L/ha) Gasolina (L/ha) Etanol (L/ha)

Gás liquefeito de petróleo – GLP (kg/ha ou L/ha)

Fertilizantes nitrogenados (por hectare)

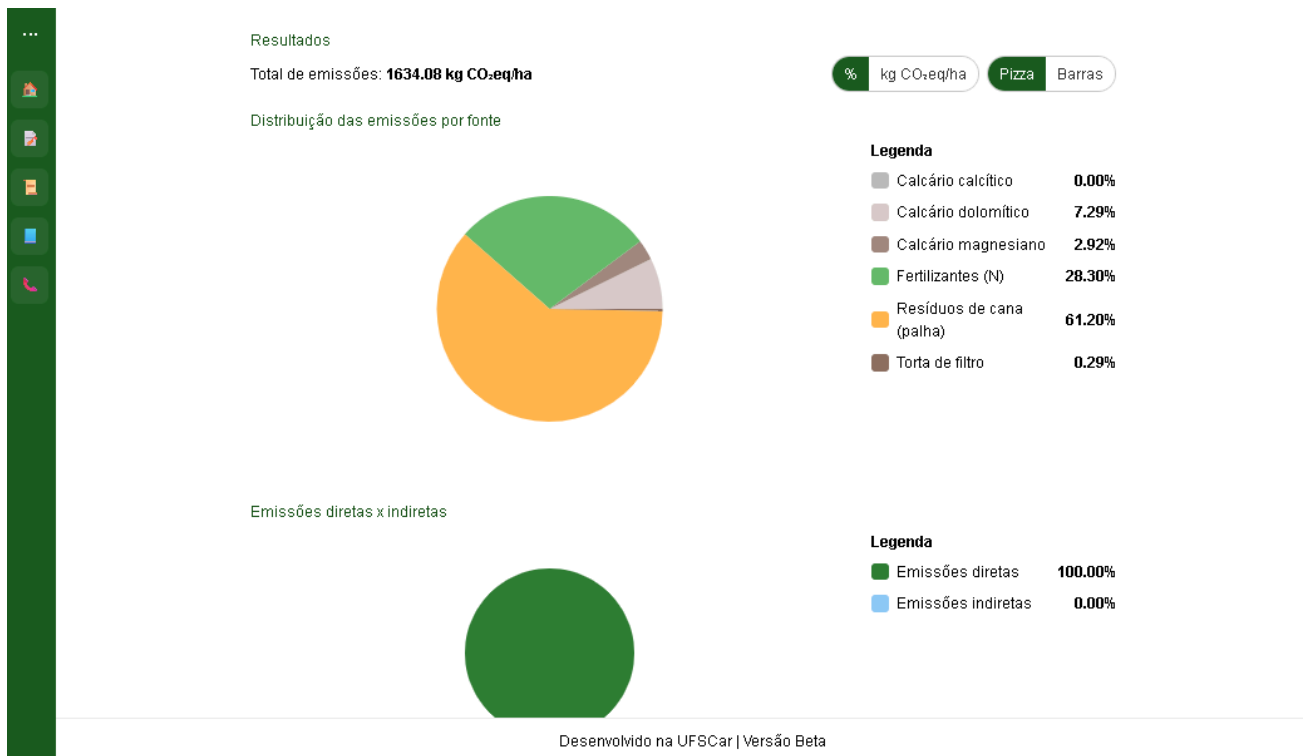
Ureia (kg/ha) Sulfato de amônio (kg/ha) Nitrato de magnésio (kg/ha)

Desenvolvido na UFSCar | Versão Beta

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Ao concluir o preenchimento, o usuário pressiona o botão “Calcular Emissões”, sendo automaticamente encaminhado à Página de Resultados que reunirá a análise das emissões totais e setoriais, convertidas em CO₂ equivalente. Serão exibidos valores numéricos, percentuais e indicadores destacados, além de gráficos dinâmicos que podem ser alternados entre formatos de pizza e barras conforme a preferência do usuário (Figura 17).

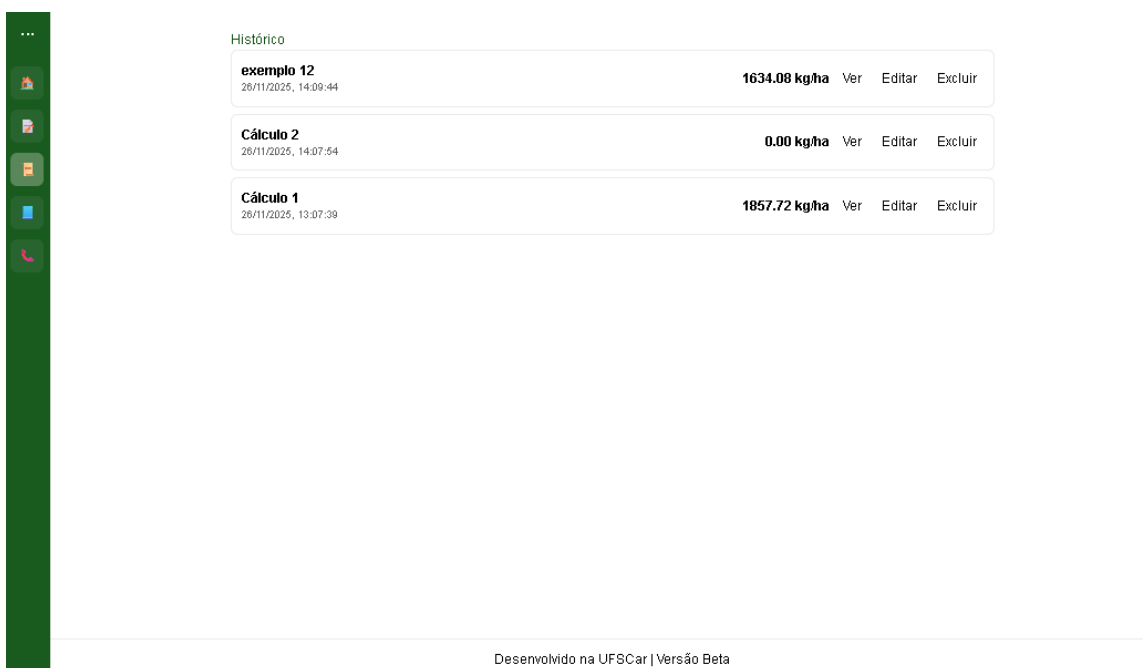
Figura 17. Visualização da tela de Resultados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A página de histórico permitirá ao usuário visualizar todos os inventários gerados anteriormente. Cada cálculo poderá ser reaberto, duplicado ou editado. Essa funcionalidade reduz significativamente o tempo de trabalho do usuário, especialmente em propriedades que realizam monitoramento frequente. (Figura 18).

Figura 18. Visualização da tela de Histórico dos cálculos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na página da Metodologia explicará ao usuário que os cálculos seguem rigorosamente as diretrizes do IPCC, CETESB e MCTI, e demais referências científicas apresentadas, reforçando a confiabilidade da ferramenta (Figura 19).

Figura 19. Visualização da tela da Metodologia.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A Página de Contato serve para que o usuário encontre informações de suporte técnico para esclarecer dúvidas, reportar inconsistências ou solicitar a elaboração de um inventário mais detalhado visando certificações ou obtenção de créditos de carbono (Figura 20).

Figura 20. Visualização da tela de Contato.



Desenvolvido na UFSCar | Versão Beta

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Esse fluxo de navegação demonstra que o aplicativo foi concebido para combinar simplicidade, precisão e acessibilidade, oferecendo ao produtor rural uma ferramenta confiável para estimar suas emissões de GEE, comparar resultados e identificar oportunidades de mitigação, mantendo sempre transparência metodológica e parceria institucional com a UFSCar. Ainda que a etapa de recomendações detalhadas de mitigação esteja prevista para versões futuras, o protótipo já consegue identificar pontos críticos na avaliação do perfil das emissões de GEE, destacando visualmente quais fontes — como fertilizantes nitrogenados ou combustíveis fósseis — possuem maior peso na

contribuição das emissões totais. Esse recurso facilita a tomada de decisão e aponta caminhos para melhorar a eficiência ambiental da produção mesmo antes da implementação completa das funcionalidades de orientação estratégica.

De modo geral, o estado atual de desenvolvimento do aplicativo demonstra um avanço significativo em termos de simplicidade, acessibilidade e clareza, superando limitações encontradas em ferramentas anteriores como planilhas estáticas, softwares complexos ou calculadoras de difícil interpretação. Mesmo em sua fase inicial, o protótipo já evidencia o potencial de transformar a quantificação das emissões em um processo intuitivo, rápido e compatível com a realidade do produtor de cana-de-açúcar, democratizando o acesso ao monitoramento de GEE no setor e possibilitando o gerenciamento, conhecimento do uso de insumos e perfil das emissões, assim como a possibilidade de substituição de fontes com menor intensidade de emissões.

5.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO

O desenvolvimento de um aplicativo voltado ao inventário de GEE, mesmo com os avanços proporcionados pela inteligência artificial e pelo uso de ferramentas como o ChatGPT, envolve uma série de desafios técnicos, metodológicos e operacionais que se tornam evidentes à medida que o protótipo evolui. Um dos aspectos mais sensíveis diz respeito à coleta e validação dos dados fornecidos pelos produtores rurais, que constituem a base de toda a estimativa de emissões. A realidade do campo brasileiro é marcada por grande variabilidade nas práticas agrícolas, diferenças em níveis tecnológicos e, em muitos casos, ausência de registros operacionais consistentes — como quantidades exatas de fertilizantes aplicados, número real de horas de máquinas ou medições precisas do consumo de energia elétrica. Embora o aplicativo proponha uma interface simplificada para facilitar a entrada das informações, a precisão dos resultados continua dependendo diretamente da qualidade dos dados fornecidos pelo usuário, sendo esses de inteira responsabilidade do usuário. Esse fator não é apenas uma limitação técnica, mas também um desafio social e educativo, já que exige um grau mínimo de organização produtiva que nem sempre está presente, sobretudo em pequenas propriedades.

Outro obstáculo importante refere-se à definição e aplicação de fatores de emissão específicos para a cultura da cana-de-açúcar. Embora o IPCC e a CETESB disponibilizem diretrizes consolidadas, grande parte dos fatores de emissão utilizados é baseada em valores médios que não representam as especificidades das diferenças regionais existentes no Brasil,

como tipos de solo, clima, intensidade de mecanização, tipo de fertilizantes mais utilizados e particularidades as variações de manejo e uso de diferentes insumos. Isso significa que o desenvolvimento de um aplicativo realmente representativo exige um esforço contínuo de busca, comparação e atualização desses fatores, além da consideração de novas versões metodológicas publicadas periodicamente. A obtenção de fatores de emissão localizados, quando possível, envolve custos, consultas a bases técnicas e revisões científicas constantes, o que torna essa etapa uma das mais complexas do projeto.

Há também desafios associados à integração das metodologias internacionais e nacionais, especialmente no processo de harmonização das diretrizes do IPCC com as orientações técnicas da CETESB e MCTI para fatores de emissão regionais e de outras instituições brasileiras. Essas metodologias apresentam diferenças na forma de estruturar os cálculos, nos valores de referência e nas premissas adotadas, o que requer cuidado para garantir a coerência interna da ferramenta e a confiabilidade dos resultados. A cada atualização das diretrizes, como o Refinamento de 2019 do IPCC, torna-se necessário revisar fórmulas, atualizar valores e ajustar a lógica do sistema para manter a aderência às melhores práticas.

O aspecto da usabilidade e da experiência do usuário também se revela desafiador, sobretudo devido à diversidade de perfis do público-alvo. Muitos produtores rurais têm pouco contato com ferramentas digitais e não estão habituados a indicadores de emissões ou termos técnicos como “CH₄”, “N₂O”, “CO₂eq” ou “PAG”. A complexidade de plataformas como SimaPro e RenovaCalc — frequentemente apontadas por usuários como confusas e difíceis de interpretar — evidencia que uma interface mal planejada pode inviabilizar completamente o uso da ferramenta, mesmo quando o cálculo de referência é preciso. Isso exige um trabalho cuidadoso de comunicação visual, organização das informações e escolha criteriosa de termos, para que a ferramenta entregue resultados compreensíveis e úteis sem depender de conhecimento técnico especializado.

Mesmo com sua eficiência na prototipagem, o ChatGPT possui limitações estruturais que afetam o desenvolvimento do aplicativo final. O modelo é excelente para criar protótipos, interfaces simuladas e lógicas conceituais, porém a construção de um aplicativo funcional, capaz de interagir com bancos de dados externos, armazenar informações, garantir criptografia de dados sensíveis, calcular emissões em tempo real e suportar atualizações contínuas, exige integrações externas e, inevitavelmente, algum nível de desenvolvimento com código tradicional. Isso gera a necessidade de etapas adicionais que incluem custos com hospedagem, estrutura de *backend*, sistemas de autenticação e manutenção técnica contínua, o que traz custos posteriores ao lançamento.

Outro ponto relevante diz respeito à confiança do público, especialmente em produções

rurais mais tradicionais. Muitos produtores ainda demonstram receio em utilizar aplicativos que lidam com informações estratégicas da propriedade, como consumo de insumos e produtividade, temendo exposição de dados ou uso inadequado das informações. Construir essa confiança requer transparência metodológica, clareza nas explicações sobre privacidade e consistência nos resultados apresentados. A credibilidade do aplicativo também depende da reputação das instituições científicas e metodologias utilizadas; por isso, todas as bases do cálculo foram fundamentadas em organismos internacionais como o IPCC e órgãos técnicos nacionais como a CETESB e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

Por fim, existe o desafio do custo de desenvolvimento e manutenção, que embora tenha sido reduzido pelo uso de IA, ainda envolve despesas com publicação em lojas oficiais (Play Store e App Store), licenças, hospedagem, servidores, atualizações periódicas e eventuais integrações com bases de dados externas. Esse investimento precisa ser planejado cuidadosamente para garantir que o aplicativo possa ser oferecido de forma acessível aos produtores, sem comprometer sua sustentabilidade operacional.

De maneira geral, as dificuldades encontradas refletem tanto a complexidade natural do tema, inventários de emissões de GEE, quanto os desafios práticos de transformar uma metodologia rigorosa em uma ferramenta simples, confiável e acessível ao produtor rural. Ainda assim, tais obstáculos têm sido identificados, analisados e incorporados ao planejamento das próximas etapas, fortalecendo o projeto e garantindo que a versão final do aplicativo seja tecnicamente robusta, metodologicamente transparente, usável em larga escala e confiável.

5.3. OPORTUNIDADES DE MELHORIA E PRÓXIMOS PASSOS

À medida que o protótipo evolui e as dificuldades do desenvolvimento tornam-se mais evidentes, também emergem diversas oportunidades para aprimorar o aplicativo e ampliar sua capacidade de atender às necessidades reais do setor sucroenergético. Uma das principais frentes de avanço é o refinamento dos fatores de emissão utilizados no cálculo. Embora as metodologias do IPCC e da CETESB ofereçam valores de referência amplamente aceitos, a realidade produtiva da cana-de-açúcar no Brasil apresenta variabilidade significativa entre regiões, variedades de cana, manejos de adubação, sistemas de preparo do solo e níveis de mecanização. O aperfeiçoamento desses fatores, portanto, passa por ampliar a busca por dados específicos, integrar informações produzidas por instituições de pesquisa como a Embrapa, universidades e centros regionais, e incorporar revisões metodológicas conforme

novas evidências científicas surgirem através da publicação de artigos científicos em jornais conceituados.

Outra oportunidade relevante diz respeito ao aperfeiçoamento dos módulos de mitigação, que podem evoluir muito além de recomendações gerais. A intenção é transformar o aplicativo em uma ferramenta capaz de gerar planos de ação personalizados, considerando o perfil operacional de cada produtor. Isso inclui sugerir estratégias como substituição de fertilizantes nitrogenados por fontes de liberação controlada, adoção de plantio reduzido na lavoura com reduções do uso de diesel, uso de drones, uso de bioinsumos, aumento da eficiência da frota agrícola (incluindo comparativos de consumo entre modelos de tratores e caminhões) e técnicas de maximização do sequestro de carbono no solo, como manutenção de palhada e uso de cultivos de cobertura em áreas de reforma. Quanto mais completo o diagnóstico de emissões, mais específicas podem ser as recomendações, potencializando a tomada de decisão e reduzindo custos operacionais.

Um passo fundamental para tornar o aplicativo ainda mais eficiente é a integração com bancos externos de dados, especialmente informações climáticas, meteorológicas e edáficas. A implementação de APIs de clima (precipitação, temperatura, umidade relativa), mapas de solos, classificações de textura e dados regionais de produtividade permitiria automatizar parte da entrada de dados, reduzindo erros e simplificando o uso para o produtor. Esse tipo de integração ampliaria a precisão dos cálculos, já que emissões de N_2O , por exemplo, são extremamente sensíveis à umidade, temperatura e à textura do solo, e fatores climáticos influenciam diretamente a mineralização da matéria orgânica e a eficiência dos fertilizantes. Futuramente, o próprio aplicativo poderia sugerir correções de manejo considerando condições climáticas previstas, reforçando sua utilidade prática.

Uma oportunidade clara é o desenvolvimento de um *backend* mais robusto, que será indispensável para que o aplicativo possa operar de forma autônoma, segura e escalável. Isso envolve a criação de uma infraestrutura capaz de armazenar dados históricos dos usuários, realizar cálculos complexos de forma eficiente e garantir a privacidade das informações — uma preocupação crescente entre produtores rurais. Uso de bancos de dados como PostgreSQL, MongoDB ou Firestore, podem compor essa estrutura. Um *backend* bem projetado permitirá também o armazenamento de inventários anuais, comparação de ciclos produtivos, geração de relatórios em PDF e até integração com certificações ambientais.

A validação em campo constitui outro passo crucial para a evolução do projeto, assim como a comprovação do uso de insumos através de documentos fiscais. Testes com produtores de diferentes portes — pequenos fornecedores, produtores médios independentes e grandes fornecedores integrados — permitirão ajustar a interface, medir o tempo real necessário para o preenchimento dos dados, identificar obstáculos práticos e validar a

precisão dos resultados quando comparados a inventários convencionais. Essa etapa também fortalece a confiança do público e ajuda a consolidar o aplicativo como uma ferramenta realmente útil no cotidiano, confiável e de simples aplicação. A coleta de feedback direto do setor é indispensável para aprimorar funcionalidades e identificar novas necessidades, como geração automática de relatórios anuais ou integração com sistemas de gestão agrícola.

Por fim, todas essas oportunidades reforçam a necessidade de que o aplicativo seja constantemente atualizado, tanto em suas bases de dados quanto em sua interface. O setor climático e as metodologias do IPCC evoluem rapidamente; fatores de emissão são desenvolvidos constantemente e regionalmente, diretrizes são revisadas, políticas públicas são atualizadas e novas tecnologias agrícolas surgem a cada ano. Um aplicativo sem atualização contínua perde sua relevância e deixa de oferecer resultados confiáveis. Assim, estabelecer uma rotina de revisão técnica, anual ou semestral, será indispensável para garantir precisão, credibilidade e aderência às normas internacionais. Essa dinâmica de atualização é o que transformará o aplicativo em uma ferramenta não apenas funcional, mas também duradoura e reconhecida pelo setor sucroenergético.

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do aplicativo para estimar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na cultura da cana-de-açúcar demonstrou viabilidade técnica e a importância de integrar metodologias científicas robustas com tecnologias digitais emergentes. A aplicação das diretrizes do IPCC (2019) e, dos fatores de emissão da CETESB e MCTI permitiu estruturar um sistema metodológico promissor e viável, capaz de fornecer cálculos alinhados com práticas internacionais de inventários de emissões de GEE de maneira prática e interativa.

O uso da inteligência artificial generativa, particularmente o ChatGPT, mostrou-se uma alternativa inovadora e eficiente para o desenvolvimento de protótipos de aplicativo, permitindo alta velocidade de criação, baixo custo e grande flexibilidade de interface, fatores essenciais para projetos conduzidos por estudantes, pequenos grupos ou instituições com recursos limitados.

Os resultados evidenciam que o foco nos Escopos 1 e 2 das emissões referentes à produção agrícola dentro dos limites da propriedade constitui uma estratégia adequada para o público-alvo, uma vez que concentra os cálculos nas fontes de emissão diretamente controláveis pelo produtor, reduzindo a complexidade e aumentando a

aplicabilidade prática da ferramenta.

O aplicativo, ao simplificar a entrada e informação de dados e tornar os cálculos acessíveis, contribui para aproximar pequenos, médios e grandes produtores de uma gestão mais consciente de suas emissões, algo especialmente relevante em um setor que desempenha papel central na economia e na agenda climática brasileira, podendo contribuir significativamente para estratégias de redução de emissões.

Apesar dos avanços, o projeto também revelou desafios importantes, como a necessidade de fatores de emissão mais específicos e atualização constante para diferentes realidades produtivas, a dificuldade de coleta de dados precisos no campo e as barreiras relacionadas à inclusão digital no meio rural. Tais fatores reforçam que a ferramenta deve ser considerada como um projeto em constante aprimoramento, que depende de atualizações contínuas, validação em campo e integração com bases de dados climáticos, edáficos e produtivos para alcançar sua plena maturidade.

As oportunidades identificadas como a futura inclusão de módulos personalizados de mitigação, integração com APIs ambientais e o desenvolvimento de *backend* robusto, apontam para um potencial de crescimento significativo e a aplicação para diversas culturas e sistemas produtivos diversos. Além disso, o aplicativo se alinha às tendências globais de descarbonização agrícola, às exigências de mercados internacionais, aos programas brasileiros como o Plano ABC+ e ao movimento mundial pelo balanço zero de carbono, reforçado por conferências como a COP30.

O aplicativo proposto representa uma contribuição relevante tanto para o setor sucroenergético quanto para a inovação tecnológica aplicada à sustentabilidade do setor agropecuário, se destacando por unir simplicidade, acessibilidade, confiabilidade e foco setorial, características raramente encontradas simultaneamente em ferramentas existentes. Alinhando o desenvolvimento do aplicativo aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 15 (Vida Terrestre), além de contribuir com as metas discutidas na COP 30, reforçando o papel da agricultura brasileira na transição para uma economia de baixo carbono.

Devem ser realizados a continuidade de aprimoramento do aplicativo, validação e atualização constante, sendo que o aplicativo desenvolvido tem potencial para se tornar uma referência prática na gestão das emissões de GEE na produção de cana-de-açúcar, auxiliando produtores na transição para sistemas de produção mais eficientes e com menor intensidade de emissões de GEE, mais competitivos e alinhados às demandas globais por responsabilidade climática, contribuindo assim, efetivamente para reduzir os

efeitos negativos das mudanças climáticas globais e atendendo às ODS 2, fome zero e agricultura sustentável, ODS 13, ação contra a mudança global do clima.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. F. **Manejo conservacionista e emissão de gases de efeito estufa na agricultura tropical**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 48, n. 3, p. 1–15, 2024.

AGROICONE. **Plano ABC: dez anos de sucesso e uma nova forma**. São Paulo: Agroicone, 2020. Disponível em: <https://www.agroicone.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Agroicone-Estudo-Plano-ABC-2020.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RenovaCalc**. Gov.br, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ASSIS, D. R.; PIANTONI, R. **Inteligência artificial aplicada à agricultura: desafios e oportunidades para a sustentabilidade**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 28, n. 3, p. 412–421, 2024.

AULAKH, M. S. et al. **Nitrous oxide emissions from agricultural soils: a review**. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 60, n. 1–3, p. 153–167, 2001.

BALABENUTE, B.; LUCCA FILHO, J. de. **IA e drones na agricultura: inovação e sustentabilidade no agronegócio**. Revista Interface Tecnológica, v. 21, n. 1, p. 1–10, 2024.

BALDOTTO, M. A. et al. **Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária**. Revista Ceres, v. 62, n. 4, p. 388–395, 2015.

BERCHIELLI, T. T. **Produção de metano entérico em pastagens tropicais**. Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, v. 13, n. 4, p. 985–995, 2012.

BRANDÃO, F. S.; CEOLIN, A. C.; RUVIARO, C. F. **O papel do agronegócio brasileiro na redução de emissão de gases de efeito estufa (GEEs)**. Revista Agro@ambiente

On-line, v. 6, n. 1, p. 57–66, 2012.

CGC DO CLIMA. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022.

COLE, V. et al. **Nitrous oxide emissions from agricultural soils**. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 11, n. 2, p. 259–269, 1997.

CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento. Insumos Agropecuários**.

Disponível em:

<http://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acao>

CarregarConsulta. Acesso em: 05 nov. 25.

COSTA, G. F. **Clusters agropecuários e as emissões de gases de efeito estufa nos municípios da região nordeste: uma perspectiva espacial**. 2024. 120 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024.

DALCIN, G.; MANGINI, L. F. K. **Química ambiental e o impacto ambiental relacionado aos gases de efeito estufa**. *Caderno Intersaberes*, v. 10, n. 21, p. 1–14, 2021.

D’ALESSANDRO, V. **A importância do setor sucroalcooleiro na economia**. *Interface Tecnológica*, v. 21, n. 1, p. 1–10, 2024.

DÍAZ, M. A. D. **Análise do ciclo de vida do etanol brasileiro visando à certificação ambiental**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

EGGLESTON, H. S. et al. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de produção de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, 2017.

EMBRAPA. **Mapa apresenta metas e tecnologias de produção sustentável para o Plano ABC+**. Brasília, DF, 18 out. 2021. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/65572858/mapa-apresenta-metas-e-tecnologias-de-producao-sustentavel-para-o-plano-abc>

. Acesso em: 10 nov. 2025.

EMBRAPA. **Cana-de-açúcar contribuiu para remover carbono da atmosfera nos últimos 20 anos no Brasil**. 31 mar. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/79479966/cana-de-acucar-contribuiu-para-remover-carbono-da-atmosfera-nos-ultimos-20-anos-no-brasil>. Acesso em: 10 nov. 2025.

FERNANDES, A. V. B. **Cultura da cana-de-açúcar**. Caderno de Ciências Exatas e da Terra, v. 1, n. 1, p. 268–278, 2013.

FERREIRA, J. A. et al. **O uso da inteligência artificial na agricultura**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2024.

GARCIA, J. C. C. **Emissão de gases de efeito estufa na obtenção do etanol de cana-de-açúcar**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. V. **Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, n. 4, p. 385–394, 2010.

GHG PROTOCOL. **Calculation Tools and Guidance**. GHG Protocol, 2025. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance?ap3c=IGXmCH6WDeDPomoEAGXmCH6mlt-Db9NCNH00dmje0ZqebCmgPw>. Acesso em: 10 nov. 2025.

HARFUCH, L. **ABC+ 2020–2030: o que esperar para o próximo decênio?** Agroanalysis, v. 42, n. 1, p. 28–31, 2022.

HUANG, J. et al. Effects of crop residue management on N₂O emissions from agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry, v. 36, n. 12, p. 1979–1987, 2004.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
. Acesso em: 10 nov. 2025.

MARENGO, J. A.; SOUZA JUNIOR, C. **Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia.** São Paulo: ALANA, 2018.

MELO, V. S. **A importância dos inventários do programa GHG Protocol para a gestão das emissões atmosféricas em empresas no estado do Maranhão.** 2017. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

MCTI. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa.** Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/central-de-conteudo/estimativas-anuais-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa>
. Acesso em: 23 set. 2025.

MCTI. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Plataforma AdaptaBrasil publica novos dados sobre biodiversidade, saúde, recursos hídricos e segurança alimentar.** Brasília, DF, 21 ago. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/08/plataforma-adaptabrasil-publica-novos-dados-sobre-biodiversidade-saude-recursos-hidricos-e-seguranca-alimentar>
. Acesso em: 10 nov. 2025.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da avaliação do ciclo de vida.** 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

NASTARI, P. M. **A importância do setor sucroenergético no Brasil.** Agroanalysis, v. 32, n. 5, p. 1–10, 2012.

OLIVEIRA, A. H. **Carbono edáfico: o elo para o equilíbrio climático e a segurança alimentar.** Revista Arace, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2025.

OLIVEIRA, F. R.; MARTINS, P. C.; NASCIMENTO, L. F. **Plataformas low code e no**

code: tendências e impactos na engenharia de software. Revista de Sistemas e Computação, v. 33, n. 1, p. 88–101, 2023.

OMETTO, J. **AdaptaBrasil MCTI innovative platform for monitoring climate change impacts in Brazil.** In: AGU FALL MEETING, 2021, New Orleans. Abstracts... New Orleans: AGU, 2021.

PACHECO, M. R. P. S. **Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂.** Estudos Avançados, v. 4, n. 8, p. 135–148, 1990.

PERACI, A. L. et al. **Dinâmica do carbono no solo e mitigação de gases de efeito estufa em sistemas de plantio direto.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 9, p. 967–974, 2012.

PEREIRA, R. S.; MENDONÇA, T. F.; ALMEIDA, R. C. **Neutralidade de carbono e a transição para o modelo FreeCarbon: tendências e desafios para o setor agroindustrial.** Revista Brasileira de Sustentabilidade e Inovação, v. 12, n. 2, p. 44–61, 2023.

PINTO, V. B. **Importância das estratégias do plano estadual para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agricultura (Plano ABC+ CE) para mitigação das emissões.** 2024. 100 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

RONCARATTI, C. C. **Modelo global do ciclo biogeoquímico do carbono-enxofre.** 1995. 150 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

RONQUIM, C. C. **Queimadas na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010.

SANTINI, G. A.; PINTO, L. B. **Cana-de-açúcar como base da matriz energética nacional.** Revista de Política Agrícola, v. 20, n. 4, p. 5–15, 2011.

SCHWARTZAUPT, B. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa em uma instituição de ensino superior.** Caderno de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 3, n. 2, p. 1–15, 2016.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. SEEG 2023:**

emissões do Brasil caem 12% em 2023, mas agropecuária e energia crescem. São Paulo: Observatório do Clima, 2023.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Relatório anual – emissões no Brasil 2024. São Paulo: Observatório do Clima, 2024.

SIAMIG BIOENERGIA. Importância da bioeletricidade de cana-de-açúcar para o Brasil. Belo Horizonte, 2025. Disponível em: <https://siamigbioenergia.com.br/importancia-da-bioeletricidade-de-cana-de-acucar-para-o-brasil/>. Acesso em: 23 set. 2025.

SILVA, F. P. Avaliação de impacto do programa de agricultura de baixo carbono no Brasil. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SILVA, A. J. G. Inventário de gases de efeito estufa de Alagoas: setores de energia, agricultura e pecuária. 2024. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.

SILVA, S. P. da; COSTA, A. S. V. da. A importância da biomassa na matriz energética brasileira. Pensar Acadêmico, v. 19, n. 1, p. 1–10, 2021.

SIMAPRO. SimaPro Database Manual: Methods Library, 63 pp., 2016. Disponível em: <<https://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>>. Acesso em: 25 Jan. 2018.

SOUZA, G. A.; CARVALHO, J. P. Desenvolvimento ágil e baixo custo com ferramentas no code: uma revisão sistemática. Revista de Engenharia e Inovação, v. 9, n. 2, p. 55–70, 2022.

SOUZA, J. L. de; PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI M, A. Potencial de sequestro de carbono em solos agrícolas sob manejo orgânico para redução da emissão de gases de efeito estufa. Idesia (Arica), v. 30, n. 1, p. 1–10, 2012.

TORQUATO, S. C. B. Sustentabilidade da cana-de-açúcar: colheita mecanizada e sequestro de carbono. Revista Energia na Agricultura, v. 28, n. 3, p. 30–42, 2013.

TORQUATO, S. A.; JESUS, K. R. E. de. Potencial da bioeletricidade no Brasil: uso da

biomassa da cana-de-açúcar como energia alternativa e complementar. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2016, Ponta Grossa. Anais... Ponta Grossa: UEPG, 2016. p. 80–90.

WRI BRASIL. **Entenda o Plano ABC, uma das principais políticas brasileiras para agricultura de baixo carbono.** São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/entenda-o-plano-abc-uma-das-principais-politicas-brasileiras-para-agricultura-de-baixo-carbono>. Acesso em: 23 set. 2025.