

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS NO IMPACTO AMBIENTAL DA
PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR DECORRENTE DA
SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR
BIOCOMBUSTÍVEIS**

Ricardo Geraldini de Almeida Duarte

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos para
obtenção do Bacharelado em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan

São Carlos

2024

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 09 de setembro de 2024 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan, DEQ/UFSCar

Convidado: Prof. Dr. Marcelo Perecin de Arruda Ribeiro, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ruy de Sousa Júnior, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço muito aos meus pais, Antônio Carlos e Suzel, que sempre me apoiaram durante minha vida e deram todo o suporte necessário para a conclusão da graduação. É uma enorme honra poder presenteá-los com este trabalho.

Agradeço aos meus irmãos, Gabriel e Juliana, por todas as conversas, vivências e aprendizados durante a vida.

Gostaria de agradecer à minha família de São Carlos, que moramos juntos durante a graduação, Arthur, Henrique, João, Leonardo, Pedro C., Pedro J. e Victor, por todos os momentos que compartilhamos, alegrias e tristezas. Agradeço também as minhas amigas Luana e Anna por todas as conversas e por liberarem o uso da máquina de lavar durante toda a graduação. Quero deixar uma homenagem ao Vitor Ikeda, grande mestre, sinto muito sua falta e te dedico este trabalho por toda a convivência e experiências que tivemos juntos.

Deixo também meu agradecimento a todos os amigos e amigas que estiveram presentes durante a graduação e fizeram meu tempo em São Carlos valer a pena.

Para meus amigos de Campinas, agradeço por todas as experiências que me tornaram a pessoa que eu sou, não vou enunciar os nomes pois são muitos e vocês sabem a importância que tem.

Obrigado aos meus líderes no estágio, Eduardo e Miguel, por todos os aprendizados, oportunidades de crescimento, conversas e especialmente por terem estimulado meu interesse por conhecimento e ciência.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar, aos professores, funcionários e instituição, por todo o conhecimento que me foi passado. É um agradecimento especial ao professor Felipe por ter me apoiado e orientado durante a iniciação científica e agora neste presente trabalho.

Agradeço a banca de avaliação, professor Ruy e professor Marcelo, por se debruçarem sobre o tema e pelas discussões.

Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo quantificar e analisar o impacto ambiental associado à produção de cana-de-açúcar, com ênfase no Potencial de Aquecimento Global (GWP) ao longo das etapas de plantio, colheita e transporte. Utilizando a base de dados do programa RenovaCalc e o simulador de processos EMSO, foi realizada uma modelagem computacional para quantificar as emissões de gases de efeito estufa, expressas em $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{cana}}$. Considerando que a Análise do Ciclo de Vida (ACV) depende do consumo de insumos, que varia entre as indústrias produtoras, este estudo aplicou o método de Monte Carlo para conduzir uma análise de incerteza, levando em conta as variações no consumo de matérias-primas e combustíveis em diferentes usinas no Brasil. Além da análise de incerteza, foi realizada uma análise de sensibilidade global para identificar as variáveis que mais influenciam a variação do GWP da cana-de-açúcar. Os modelos também foram utilizados para avaliar os efeitos da substituição de combustíveis convencionais por alternativas mais sustentáveis, como o biodiesel, no transporte da cana e no maquinário agrícola, visando reduzir o impacto ambiental da produção de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, dos produtos finais, como etanol e açúcar. Os resultados indicaram uma variação substancial no impacto ambiental da cana, estimado em $48,36 \pm 8,7 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{cana}}$. A análise de sensibilidade global revelou que o consumo de fertilizantes sintéticos nitrogenados é a principal fonte de variação nas emissões. Além disso, a substituição completa do diesel fóssil por biodiesel permite uma redução de cerca de 20% nas emissões da produção de cana-de-açúcar. Estes achados fornecem informações valiosas para a adoção de práticas agrícolas com menor impacto ambiental de forma a reduzir a pegada ambiental do etanol.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, emissões, análise de incerteza, biocombustíveis.

ABSTRACT

This study aims to quantify and analyze the environmental impact associated with sugarcane production, with an emphasis on the Global Warming Potential (GWP) throughout the stages of planting, harvesting, and transportation. Using the RenovaCalc program database and the EMSO process simulator, computational modeling was performed to quantify greenhouse gas emissions, expressed in $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{cane}}$. Considering that Life Cycle Assessment (LCA) depends on input consumption, which varies among producing industries, this study applied the Monte Carlo method to conduct an uncertainty analysis, accounting for variations in the consumption of raw materials and fuels across different mills in Brazil. In addition to the uncertainty analysis, a global sensitivity analysis was performed to identify the variables that most influence the variation in sugarcane GWP. The models were also used to evaluate the effects of replacing conventional fuels with more sustainable alternatives, such as biodiesel, in sugarcane transportation and agricultural machinery, aiming to reduce the environmental impact of sugarcane production and, consequently, the final products, such as ethanol and sugar. The results indicated a substantial variation in the environmental impact of sugarcane, estimated at $48.36 \pm 8.7 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{cane}}$. The global sensitivity analysis revealed that the consumption of synthetic nitrogen fertilizers is the main source of variation in emissions. Moreover, the complete replacement of fossil diesel with biodiesel allows for a reduction of approximately 20% in sugarcane production emissions. These findings provide valuable insights for adopting agricultural practices with lower environmental impact and thus reducing the environmental footprint of ethanol.

Keywords: sugarcane, emissions, uncertainty analysis, biofuels.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR	3
2.1.1. Preparo do solo	4
2.1.2. Plantio da cana.....	5
2.1.3. Tratos culturais	6
2.1.4. Colheita	7
2.1.5. Operações Pós-Colheita e Renovação do Solo.....	8
2.2. PRODUÇÃO DE ETANOL E AÇÚCAR	10
2.3. IMPACTO AMBIENTAL E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)	14
2.3.1. Análise do ciclo de vida	14
2.3.2. Fases da análise de ciclo de vida	15
2.3.3. Escopos de emissão	17
2.4. PROGRAMA RENOVABIO E FERRAMENTA RENOVACALC	18
2.5. ANÁLISE DE INCERTEZA E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	20
2.5.1. Análise de incerteza.....	20
2.5.2. Análise de sensibilidade	22
3. METODOLOGIA	24
3.1. FERRAMENTA RENOVACALC	24
3.2. COLETA DE DADOS DAS USINAS	27
3.3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO	28
3.4. TRATAMENTO DOS DADOS	31
3.4.1. Análise de correlação e agrupamento.....	31
3.4.2. Amostragem de dados	32
3.5. ANÁLISE DE INCERTEZA E SENSIBILIDADE	35
3.5.1. Análise de incerteza.....	35
3.5.2. Análise de sensibilidade	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1. DADOS TRATADOS	38
4.1.1. Análise dos componentes principais (PCA).....	42
4.2. RESULTADOS DETERMINÍSTICOS	43
4.3. ANÁLISE DE INCERTEZAS	46

4.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	49
4.5. USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS.....	51
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	52
5.1. CONCLUSÕES	52
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO A.....	61
APÊNDICE A	63
APÊNDICE B	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma simplificado da produção de cana-de-açúcar e de plantio	4
Figura 2.2	Etapas do plantio da cana-de-açúcar	6
Figura 2.3	Ciclos da cana-planta e cana-soca	9
Figura 2.4	Fluxograma da fabricação de açúcar, etanol e energia elétrica	13
Figura 2.5	Estrutura da avaliação do ciclo de vida	14
Figura 2.6	Volume de controle e fluxos considerados na análise de ciclo de vida	15
Figura 2.7	Emissões de escopo 1, 2 e 3	18
Figura 2.8	Exemplificação de análise de incertezas e análise determinística	21
Figura 3.1	Exemplificação de emissões atribuídas à produção de cana-de-açúcar pelo consumo de ureia	27
Figura 3.2	Interação de modelos e fluxograma no EMSO	30
Figura 4.1	Matriz de gráficos de correlação entre as novas variáveis	40
Figura 4.2	Análise dos componentes principais	41
Figura 4.3	Impacto ambiental, medido em GWP, das diferentes fontes de emissão usando variáveis agrupadas	42
Figura 4.4	Impacto ambiental, medido em GWP, das diferentes fontes de emissão usando variáveis não agrupadas	43
Figura 4.5	Razão entre correlações para diferentes quantidades de amostras	45
Figura 4.6	Histograma do GWP da cana-de-açúcar a partir dos dados amostrados	46
Figura 4.7	Histograma do GWP da cana-de-açúcar a partir dos dados reais das usinas	47
Figura 4.8	Índices de Sobol calculados	48
Figura 4.9	GWP da cana-de-açúcar em função da fração de biodiesel utilizada	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Entradas de dados agrícolas para produtor primário	25
Tabela 4.1	Variáveis resultantes do tratamento de dados	38
Tabela A.1	Emissões do ciclo de vida dos insumos	60
Tabela A.2	Emissões da combustão dos combustíveis	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1	Matriz de correlação das variáveis agrupadas	39
-------------------	--	----

1. INTRODUÇÃO

Os biocombustíveis emergem como uma alternativa sustentável e estratégica para a matriz energética global, respondendo aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e à necessidade urgente de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Entre os principais biocombustíveis, o etanol se destaca por sua capacidade de ser produzido a partir de diversas matérias-primas renováveis, contribuindo significativamente para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar é amplamente reconhecido como um dos biocombustíveis mais eficientes em termos energéticos, devido ao balanço positivo entre a energia adicionada na sua produção e a energia obtida no produto final (Goldemberg et al., 2004).

A cana-de-açúcar desempenha um papel crucial na economia e na matriz energética brasileira, consolidando-se como uma das principais culturas agrícolas do país (Verotti, 2020). Sua importância vai além da produção de etanol, e abrange a produção de açúcar, um dos principais produtos de exportação do país. O etanol de cana-de-açúcar, além de ser uma fonte renovável de energia, é valorizado por sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa em comparação aos combustíveis fósseis, contribuindo de maneira efetiva para a mitigação das mudanças climáticas (Goldemberg et al., 2004; Seabra; Macedo, 2011). No entanto, a produção da cana-de-açúcar envolve uma cadeia produtiva complexa, na qual os insumos agrícolas, como fertilizantes, defensivos, corretivos e combustíveis, exercem uma influência direta na pegada de carbono final dos produtos subsequentes da cana (Oliveira; Vaughan; Rykiel, 2005).

A quantificação desses insumos utilizados é essencial para a realização de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV, do inglês *Life-cycle analysis (LCA)*), uma metodologia amplamente utilizada para avaliar os impactos ambientais de um produto ao longo de todas as fases de sua produção, desde a obtenção das matérias-primas até a disposição final (ISO 14040, 2006). A ACV permite identificar os pontos críticos ao longo da cadeia produtiva e propor melhorias que podem reduzir o impacto ambiental associado à produção de biocombustíveis (Cherubini; Strømman, 2011). Na medida em que a cana-de-açúcar é matéria-prima para produção de etanol, o impacto ambiental deste biocombustível está associado não só ao processo de transformação da cana-de-açúcar, mas sua produção em si.

Neste contexto, a realização de uma ACV está sujeita a incertezas significativas, especialmente considerando produções agrícolas diversificadas como a da cana-de-açúcar. Essas incertezas decorrem das variações nos consumos de insumos, que diferem entre os

produtores de cana e etanol (Huijbregts, 1998). Tais variações podem impactar diretamente os resultados da ACV, levando a diferentes pegadas de carbono para o mesmo produto em diferentes condições de produção (Lloyd; Ries, 2007). Assim, as análises de incerteza e sensibilidade tornam-se fundamentais para fornecer informações mais robustas sobre o impacto ambiental da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, do etanol produzido (Groen et al., 2014). A aplicação de métodos de análise de incerteza e sensibilidade permitem quantificar as variações nas emissões de gases de efeito estufa associadas às diferentes práticas agrícolas e industriais, possibilitando uma visão mais clara sobre os impactos ambientais e a identificação de oportunidades para melhorar a sustentabilidade do processo produtivo (Lloyd; Ries, 2007).

Além disso, o consumo de combustíveis no processo produtivo de cana-de-açúcar e etanol é um dos principais fatores que contribuem para as emissões de CO₂, influenciando diretamente a pegada de carbono do etanol (Seabra; Macedo, 2011). A transição para o uso de biocombustíveis, como o biodiesel e o biometano, no transporte da cana e no maquinário agrícola, pode ser uma estratégia eficaz para reduzir essas emissões, melhorando o perfil de sustentabilidade do etanol, o que reforça sua posição como um combustível de baixo carbono (Macedo; Seabra; Silva, 2008; ANP, 2024).

Ferramentas como o RenovaCalc, um programa de cálculo da intensidade de carbono dos biocombustíveis produzidos no Brasil e geração de uma nota de eficiência energético-ambiental, têm se mostrado fundamentais para proporcionar transparência e permitir uma avaliação detalhada do desempenho ambiental das usinas (Ronquim Filho et al., 2022). A ferramenta faz parte do programa RenovaBio, que busca fomentar iniciativas para reduzir as emissões, visto que permite a geração dos chamados créditos de descarbonização (CBIO) gerando receita para as indústrias que reduzem suas emissões carbono para a atmosfera (ANP, 2024).

Diante disso, este trabalho busca quantificar e analisar o impacto ambiental associado à produção de cana-de-açúcar, com ênfase no Potencial de Aquecimento Global (GWP) e na importância da aplicação de métodos para a análise de incerteza e sensibilidade nas variáveis envolvidas. Através da modelagem computacional e da aplicação do método de Monte Carlo e de Sobol, pretende-se estimar o nível de incerteza no impacto da cana-de-açúcar e verificar as variáveis que mais contribuem para essa variabilidade. Além disso, o presente trabalho busca quantificar o impacto na redução do GWP da cana-de-açúcar por meio da substituição do diesel fóssil por biodiesel em diferentes concentrações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

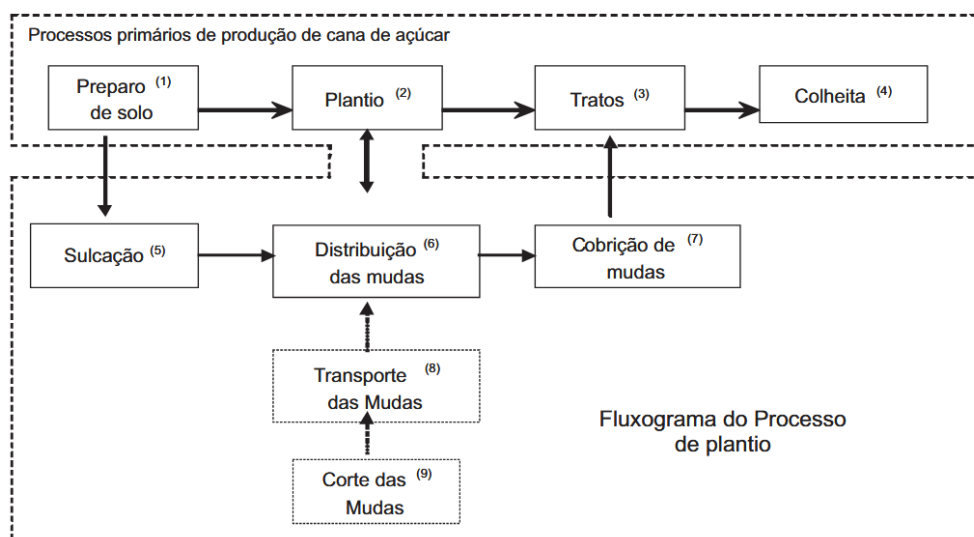
A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas mais importantes do Brasil, desempenhando um papel fundamental na economia nacional e na matriz energética do país. Em 2023, o Brasil foi responsável por aproximadamente 40% da produção mundial de cana-de-açúcar, com uma colheita estimada em mais de 665 milhões de toneladas (CONAB, 2023), sendo a principal matéria-prima para a produção de açúcar e etanol, este que representou cerca de 53% do consumo de combustíveis leves no Brasil (UNICA, 2023).

A produção agrícola da cana-de-açúcar envolve uma série de etapas, que incluem o preparo do solo, o plantio, os tratos culturais, a colheita e as operações pós-colheita. O preparo do solo é a fase inicial, que estabelece as condições adequadas para o desenvolvimento da planta. O plantio, por sua vez, envolve operações como a sulcação, distribuição e cobertura das mudas, que são determinantes para o bom estabelecimento da cultura. Após o plantio, os tratos culturais são necessários para promover o crescimento saudável da cana, incluindo a aplicação de fertilizantes, irrigação e controle de pragas. A colheita, que pode ser manual ou mecanizada, é seguida pelas operações pós-colheita e renovação do solo, fundamentais para manter a produtividade do canavial ao longo dos ciclos de cultivo (Barros; Milan, 2010; Santiago; Rossetto, 2022a).

Nesse contexto, Cavalett et al. (2015) desenvolveram um modelo computacional denominado CanaSoft, para simular e avaliar as etapas agrícolas da produção de cana-de-açúcar de forma integrada. Este modelo abrange desde a preparação do solo, passando pelo plantio, cultivo, colheita e transporte, até a aplicação de insumos e recuperação de resíduos. O modelo permite a análise de diferentes cenários produtivos, considerando variáveis como sistemas de plantio (mecanizado ou semi-mecanizado), tipos de colheita (manual, mecanizada, com ou sem queima) e estratégias de recuperação de palha. Os resultados gerados pelo modelo incluem inventários econômicos, ambientais e sociais, fornecendo informações detalhadas sobre consumo de recursos, emissões de gases de efeito estufa, custos operacionais e impactos ambientais associados a diferentes práticas agrícolas (Cavalett et al. 2015).

Para ilustrar os processos envolvidos na etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar, a Figura 2.1 apresenta um fluxograma simplificado, detalhando o processo de plantio e os processos primários que serão explorados nas próximas sessões.

Figura 2.1 – Fluxograma simplificado da produção de cana-de-açúcar e de plantio.



Fonte: adaptado de Barros; Milan, 2010.

2.1.1. Preparo do solo

O preparo do solo é a etapa inicial para o plantio da cana-de-açúcar. Nessa fase, operações como aração, gradagem e subsolagem são realizadas para melhorar as condições do solo. A escolha adequada do local e a preparação do solo são essenciais para maximizar a produtividade da cana e minimizar impactos ambientais, como erosão e degradação do solo (Santiago; Rossetto, 2022a). A aração consiste em revolver o solo, descompactando-o e promovendo a incorporação de matéria orgânica, o que melhora a aeração e facilita o desenvolvimento radicular. Em seguida, a gradagem quebra torrões e nivela a superfície do solo, criando um ambiente homogêneo para o plantio. A subsolagem, que é particularmente importante em solos compactados, facilita a ramificação das raízes, permitindo uma maior busca por nutrientes e água (Nutrição de safras, 2024).

Além dessas operações mecânicas, a calagem é uma prática agrônômica essencial para a correção da acidez do solo. A quantidade de calcário a ser aplicada é determinada com base em uma análise do solo, levando em consideração a acidez atual, a capacidade tampão do solo e as necessidades da cultura. Esse ajuste é crucial para melhorar a disponibilidade de nutrientes, corrigir deficiências de cálcio e magnésio, e aumentar a eficiência dos fertilizantes aplicados posteriormente, garantindo um ambiente adequado para o crescimento das plantas (Raij; Quaggio; Cantarella, 1996).

2.1.2. Plantio da cana

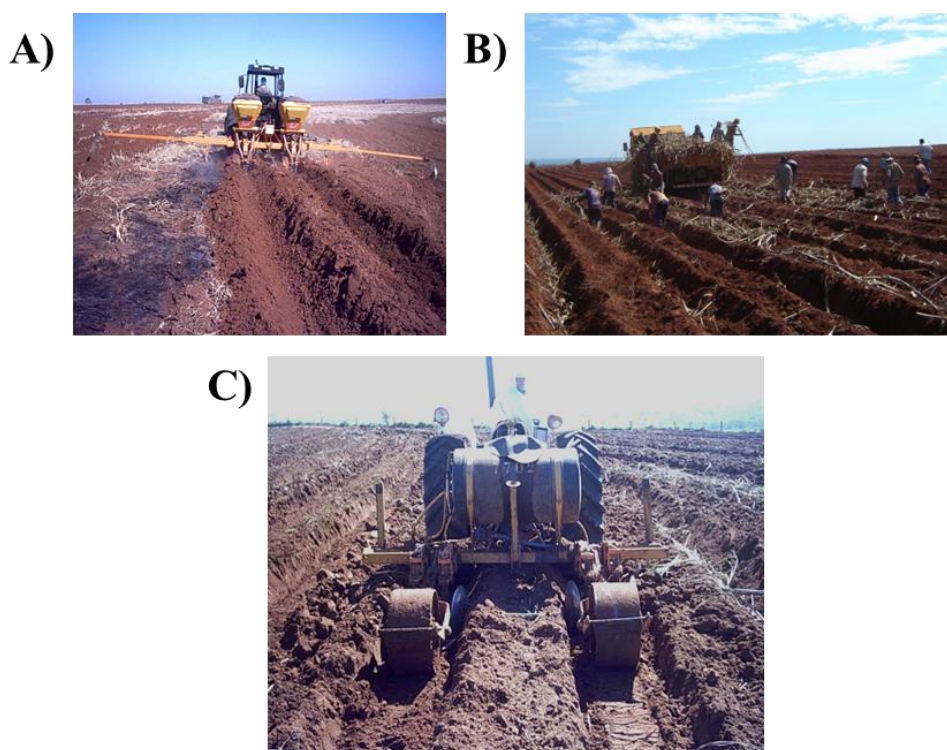
O plantio da cana-de-açúcar envolve uma série de operações técnicas para garantir o bom estabelecimento da cultura. Esse estabelecimento impacta diretamente a produtividade ao longo de seu ciclo, que geralmente dura de 5 a 6 anos (cortes) (Scarpari; Beauclair, 2004). Após esse período, é necessária a reforma do canavial ou replantio da cana, sendo que o custo da reforma precisa ser liquidado durante o ciclo da cana. O processo do plantio começa com a sulcação, que consiste na abertura de sulcos no solo com profundidades entre 25 a 30 centímetros (Rossetto; Santiago, 2022). Essa profundidade deve ser ajustada de acordo com o tipo de solo e as condições climáticas da região, garantindo o adequado desenvolvimento das raízes e proteção das mudas (Casagrande, 1991). Além disso, os sulcos facilitam a aplicação de insumos como fertilizantes e corretivos, permitindo que os implementos utilizados para a sulcação também efetuem a adubação e aplicação de defensivos simultaneamente (Rossetto; Santiago, 2022).

Após a sulcação, ocorre a distribuição das mudas, que são segmentos de colmos (caules) cortados em pedaços com gemas vegetativas, de onde partirá o brotamento da cana. As mudas, geralmente com oito a dez meses de idade, são cultivadas em condições favoráveis, bem fertilizadas e cuidadas. O uso de mudas por hectare, pode variar de 10 a 18 toneladas, dependendo da variedade da cana e das condições do solo e do clima (Landell et al., 2013; Rossetto; Santiago, 2022). Antes da distribuição, as mudas precisam passar por etapas de corte, carregamento e transporte. O corte das mudas é geralmente realizado no campo, com o uso de facões ou máquinas específicas que cortam os colmos em pedaços de 30 a 40 centímetros com cerca de 3 a 4 gemas, que são adequados para o plantio (Landell et al., 2013; Aude, 1993). Após o corte, as mudas são carregadas em veículos para serem transportadas até a área de plantio. A distribuição pode ser feita manualmente ou com o auxílio de plantadeiras mecanizadas, que realizam essa tarefa de forma uniforme, garantindo um plantio mais eficiente (Teixeira, 2016).

A etapa final do plantio é a cobertura (fechamento) das mudas com solo, que as protege contra intempéries e pragas, além de garantir o contato necessário com a umidade do solo, favorecendo o brotamento e o enraizamento. A cobertura é realizada de maneira uniforme, com uma camada de solo suficiente para proteger, mas não enterrar demais as mudas, o que poderia dificultar a emergência dos brotos (Silva et al., 2017). A escolha da época de plantio também é fundamental, geralmente ocorrendo na estação chuvosa, para assegurar a umidade adequada no solo, essencial para o brotamento das mudas. No Brasil, a janela de plantio

varia conforme a região, sendo mais comum entre os meses de outubro e abril, quando as condições climáticas são mais favoráveis (Landell et al., 2005). A Figura 2.2 apresenta imagens para representar as etapas do plantio e as modalidades manuais ou mecanizada das etapas.

Figura 2.2 – Etapas do plantio da cana-de-açúcar



A) Sulcação mecanizada; B) Distribuição manual das mudas; C) Cobrição mecanizada

Fonte: adaptado de Teixeira, 2016.

2.1.3. Tratos culturais

Os tratos culturais incluem a adubação, a irrigação, o controle de pragas e doenças, e o manejo de plantas daninhas. A adubação é uma das práticas mais importantes, envolvendo a aplicação de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos. O nitrogênio é um nutriente chave para o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, promovendo o desenvolvimento foliar e a capacidade fotossintética da planta. De acordo com as recomendações técnicas, a aplicação de nitrogênio varia de 30 a 60 kg/ha na fase inicial da cana-planta e de 60 a 120 kg/ha nas soqueiras, que são brotações da cana após a colheita da safra anterior podendo, exceder 120 kg/ha em casos específicos, conforme as exigências nutricionais da cultura e as condições do solo (Cantarella; Rosseto, 2014). Além do nitrogênio, o fósforo e o potássio

são aplicados em quantidades adequadas para assegurar o desenvolvimento radicular e a resistência da planta a estresses ambientais. A adubação fosfatada é recomendada em doses que variam entre 40 a 180 kg/ha de P_2O_5 , dependendo do teor de fósforo no solo e das exigências da cultura. O potássio, por sua vez, é aplicado em doses que variam entre 100 a 200 kg/ha de K_2O , especialmente em solos pobres em potássio (Cantarella; Rosseto, 2014).

Além dos fertilizantes sintéticos, a cana-de-açúcar se beneficia do uso de insumos orgânicos, como a vinhaça e a torta de filtro, que são subprodutos da produção de etanol e açúcar. A vinhaça é rica em potássio e matéria orgânica, e sua aplicação no solo não só fornece nutrientes, mas também melhora a estrutura e a retenção de água, contribuindo para um ciclo de nutrientes mais sustentável (Silva et al., 2023). A torta de filtro, outro subproduto, é utilizada como corretivo orgânico, ajudando a melhorar a fertilidade do solo e fornecendo nutrientes adicionais às plantas (Almeida Junior, 2011).

A irrigação é uma prática crucial, especialmente em regiões onde há déficit hídrico. Métodos de irrigação como sulcos, aspersão ou gotejamento podem ser empregados e asseguram que a cana-de-açúcar receba a quantidade necessária de água, essencial para o seu crescimento e desenvolvimento (Rezende; Andrade Junior, 2023).

Outro aspecto vital dos tratos culturais é o controle de pragas e doenças, este é realizado através da aplicação de defensivos agrícolas, como herbicidas, inseticidas e fungicidas, ou pela combinação dos defensivos com métodos biológicos e culturais, denominado manejo integrado de pragas (MIP) (Tinoco; Silva; Rocha, 2023). Além disso, o manejo de plantas daninhas é essencial para evitar que essas competidoras afetem a produtividade da cana-de-açúcar, visto que estas competem por luz, água e nutrientes, podendo reduzir significativamente a produtividade se não forem controladas adequadamente. O controle pode ser feito manualmente, mecanicamente ou através da aplicação de herbicidas seletivos, dependendo do tipo de infestação e das condições da área de cultivo (Silva et al., 2018).

2.1.4. Colheita

A colheita é a etapa que precede a produção industrial do etanol e açúcar e é de extrema importância para que a matéria-prima chegue em condições adequadas para o processamento nas usinas. O planejamento da colheita da cana-de-açúcar visa otimizar todas as práticas relacionadas a essa atividade, garantindo o retorno do investimento feito durante o cultivo,

proporcionando lucro ao produtor (Rossetto, 2022). Existem duas formas de realizar a colheita: a manual e a mecanizada.

A colheita manual, tradicionalmente praticada, envolve o corte da cana com facões após a queima das partes secas da planta. A queima é realizada para remover a palha e facilitar o corte, deixando os colmos expostos e mais acessíveis para a colheita. No entanto, essa prática tem sido progressivamente abandonada devido aos seus impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e a poluição do ar, além de estar associada a condições de trabalho muitas vezes precárias (Torquato, 2013). Em resposta a essas preocupações, legislações ambientais e trabalhistas tem buscado promover a transição para métodos de colheita mais sustentáveis. O principal exemplo dessa transição é a Lei da Queima da Cana (Lei nº 11.241/2002), sancionada em setembro de 2002, que trata da queima controlada da cana-de-açúcar para despalha e de sua gradual eliminação.

Em contraponto, a colheita mecanizada, uma alternativa moderna, tem sido amplamente adotada no Brasil, especialmente após as regulamentações. Esta forma de colheita envolve o uso de colhedoras automotrizes, que cortam, limpam e picam a cana, deixando a palha no campo e recolhendo apenas os colmos para o transporte até a usina. Esse método tem a vantagem de ser mais eficiente e menos dependente de mão-de-obra, permitindo colheitas em larga escala com maior rapidez (Torquato, 2013). Além disso, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar evita a emissão de CO₂ resultante da queima da palha e ao deixá-la no campo, ela opera como cobertura vegetal, de forma a proteger o solo contra a erosão e ajudar a manter a umidade, aumentando os estoques de carbono orgânico nas camadas superficiais. Ao se decompor, a palha também adiciona matéria orgânica, contribuindo para a saúde e fertilidade do solo a longo prazo (Souza; Marcelo; Centurion, 2012).

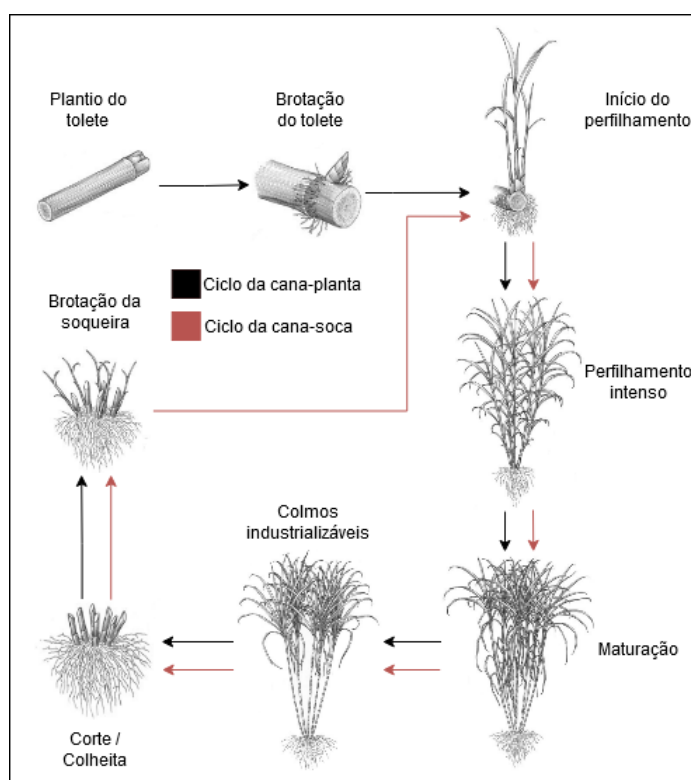
Outra consideração importante é a maturidade da cana no momento da colheita. A cana deve ser colhida no ponto de maturação ideal, quando o teor de sacarose nos colmos é máximo, para assegurar a melhor eficiência de conversão na usina (Marin et al., 2013). As épocas de colheita da cana são entre os meses de abril e novembro, para a Região Centro-Sul, e entre novembro e abril, para a Região Nordeste (Rossetto, 2022).

2.1.5. Operações Pós-Colheita e Renovação do Solo

As operações pós-colheita e a renovação do solo são etapas cruciais para garantir a continuidade da produtividade do canavial ao longo dos anos. Essas operações são

necessárias após vários ciclos de colheita, quando a produtividade começa a declinar devido ao esgotamento dos nutrientes do solo e ao desgaste das plantas remanescentes, conhecidas como soqueiras (Scarpari; Beauclair, 2004). A Figura 2.3 ilustra o ciclo da cana-de-açúcar desde o plantio da muda (tolete) até a colheita. Existem dois ciclos principais: o ciclo da cana-planta, que ocorre quando a cana é plantada pela primeira vez a partir de mudas e passa pelo primeiro corte; e o ciclo das soqueiras ou cana-soca, que começa após o corte da cana-planta e dura cerca de 12 meses (Da Silva, 2012). Os ciclos seguintes, são denominados de cana-ressoca nos demais cortes até a última colheita (Santiago; Rossetto, 2022b).

Figura 2.3 – Ciclos da cana-planta e cana-soca



Fonte: adaptado de Cheavegatti-Gianotto et al., 2011.

Após a última colheita do ciclo produtivo, a retirada da cana remanescente e a destruição das soqueiras são realizadas para preparar o solo para um novo ciclo de plantio. Esse processo pode ser realizado de maneira mecânica, utilizando implementos agrícolas que cortam e revolvem as soqueiras, facilitando a decomposição dos restos vegetais e a incorporação dos mesmos ao solo (Santiago; Rossetto, 2022b). A renovação do solo após a destruição das soqueiras envolve práticas como a calagem, adubação orgânica, e o preparo do solo, já descritos anteriormente.

Além da calagem, a adubação orgânica é frequentemente utilizada na renovação do solo. A aplicação de insumos como esterco, torta de filtro, e a própria palha da cana ajuda a restaurar a matéria orgânica do solo, melhorando sua estrutura e capacidade de retenção de água, de forma que contribui para a melhoria da fertilidade do solo (Almeida Junior, 2011).

Além das operações de manejo do solo, o transporte da cana-de-açúcar do campo até a usina após a colheita é uma etapa crítica, visto que, a cana-de-açúcar deve ser transportada rapidamente, pois a qualidade da cana começa a deteriorar-se logo após o corte, resultando em perdas de sacarose e diminuindo a eficiência da produção de açúcar e etanol (Vian; Marin, 2022). No Brasil, a distância média percorrida para o transporte da cana é de aproximadamente 20 a 30 km, dependendo da localização da usina em relação ao canavial (Macedo; Seabra; Silva, 2008).

Cerca de 95% da cana-de-açúcar colhida no país é transportada por meio da malha rodoviária (Rossetto, 2022). Diversos tipos de veículos podem ser usados para esse transporte, incluindo tratores, caminhões, carretas e até animais de tração, porém o predominante é via caminhões, que possuem grande capacidade de carga e são adaptados para o transporte de cana picada ou inteira. No entanto, o uso de caminhões movidos a diesel ainda é predominante, o que gera emissões significativas de CO₂, contribuindo para o impacto ambiental da produção. A busca por alternativas de biocombustíveis, como o biodiesel para o transporte da cana, tem sido explorada como uma forma de reduzir as emissões de CO₂ e aumentar a sustentabilidade do processo produtivo.

2.2. PRODUÇÃO DE ETANOL E AÇÚCAR

Ao chegar à usina, a cana-de-açúcar, transportada dos campos, é inicialmente submetida a uma etapa de recepção, onde passa por uma pesagem e inspeção para verificar sua qualidade e o teor de impurezas. Após essa verificação, a cana é direcionada para o processo industrial, onde é transformada em produtos como açúcar, etanol e energia elétrica.

A primeira operação é a moagem (extração da sacarose), na qual, após a remoção de impurezas, a cana é conduzida por meio de esteiras rolantes para picadores e desfibradores, onde o caldo é separado do bagaço. Através do esmagamento da cana pelos rolos das moendas, é realizada a extração do caldo, rico em sacarose, que será destinado a produção de açúcar e etanol. O bagaço da cana, também gerado no processo, é utilizado como combustível das caldeiras, para produção de vapor de processo e energia elétrica, em um processo denominado cogeração (Jesus, 2004). A partir da queima do bagaço, são geradas

cinzas, que tem sido utilizadas como fertilizantes na etapa agrícola da produção de cana-de-açúcar (UDOP, 2022)

O caldo extraído segue para a etapa de tratamento do caldo, passando por uma série de tratamentos físico-químicos para purificação antes de ser enviado para as próximas etapas. O processo inclui a passagem por peneiras para remover impurezas grossas, seguido pela sulfitação com SO_2 e a caleação com leite de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que auxiliam na coagulação de matérias coloidais, desinfecção do caldo e elevação do pH (Jesus, 2004). Em seguida, o caldo é aquecido para reduzir sua viscosidade e facilitar a decantação (Longati, 2018). Durante a decantação, ocorre a sedimentação de impurezas e materiais coloidais, formando um lodo chamado torta de filtro. Este lodo, rico em matéria orgânica, fosfatos e micronutrientes, é separado do caldo clarificado e, posteriormente, prensado para remover o excesso de água (Santos; Abreu; Baldanza, 2009). A torta de filtro tem se tornado um subproduto valioso, visto que hoje é comumente utilizado como fertilizante na produção de cana-de-açúcar, contribuindo para o retorno de nutrientes ao solo (Malavolta; Gomes; Alcarde, 2002).

Após o tratamento do caldo, surge uma bifurcação, para a produção de etanol ou para a produção de açúcar. No caso da produção de açúcar, a mistura tratada passará pela evaporação e sofrerá a maior variação de massa de todo o processo a fim de concentrar o caldo, elevando o grau Brix da mistura (teor de açúcares solúveis na mistura), inicialmente com cerca de 85% de água até valores próximos de 40% (Junior, 2015). O processo de concentração do caldo é usualmente realizado em evaporadores de múltiplo efeito, nos quais o vapor gerado no primeiro evaporador é utilizado como fonte de aquecimento no segundo e assim sucessivamente até um condensador no final do processo, condensando o vapor gerado (Longati, 2018).

Seguindo a evaporação, o caldo, agora denominado xarope, passa pela cristalização, onde é cozido em cristalizadores até atingir um estado de supersaturação. Núcleos cristalinos de açúcar são adicionados para promover a formação de cristais maiores a partir do xarope. Este processo resulta em uma mistura de cristais de açúcar e xarope, que é então centrifugada para separar o açúcar cristal do licor-mãe, que é reciclado para maximizar a produção de açúcar (Junior, 2015). Os cristais resultantes da cristalização ainda têm certa umidade, por isso seguem para a secagem, realizada em tambores rotativos por meio de ar quente para secar o açúcar e ar frio, em contracorrente, para esfriá-lo antes de sair do equipamento. O açúcar resultante da secagem já está pronto para ser ensacado e comercializado como açúcar

crystal, ou ainda, ser utilizado como matéria-prima para outros produtos como o açúcar refinado ou açúcar líquido (Horii, 1999).

Na produção de etanol, o caldo tratado é misturado ao melaço, ou mel fermentado, resultante da centrifugação no processo de produção do açúcar, com o objetivo de elevar a concentração de açúcares na mistura. Essa mistura, denominada mosto, é então utilizada na fermentação. Nas indústrias, a levedura *Saccharomyces cerevisiae* é comumente empregada para este processo devido à sua eficiência em converter açúcares em etanol, mesmo em condições de alta osmolaridade e concentração de etanol (Zhao; Bai, 2009). Em condições anaeróbicas, ou seja, na ausência de oxigênio, a levedura metaboliza a maior parte dos açúcares presentes no mosto através de um processo conhecido como glicólise seguido pela fermentação alcoólica, produzindo majoritariamente etanol e CO₂ (Basso et al., 2008).

O vinho resultante da fermentação possui uma concentração de etanol que varia entre 7,0% e 10,0% em massa, dependendo do rendimento do processo fermentativo. Este vinho é então direcionado para a etapa de destilação (Furlan, 2012). Na destilação, ocorre a separação dos componentes do vinho, que inclui principalmente água, etanol, álcoois superiores, ácido acético e aldeído, utilizando-se as diferenças nos pontos de ebulição dessas substâncias. Para que o etanol anidro atenda ao requisito de pureza superior a 99% em massa, o etanol hidratado passa por uma etapa adicional de desidratação. Esta desidratação pode ser realizada por destilação extrativa (utilizando monoetilenoglicol - MEG), azeotrópica (utilizando ciclo-hexano) ou por peneiras moleculares (Longati, 2018).

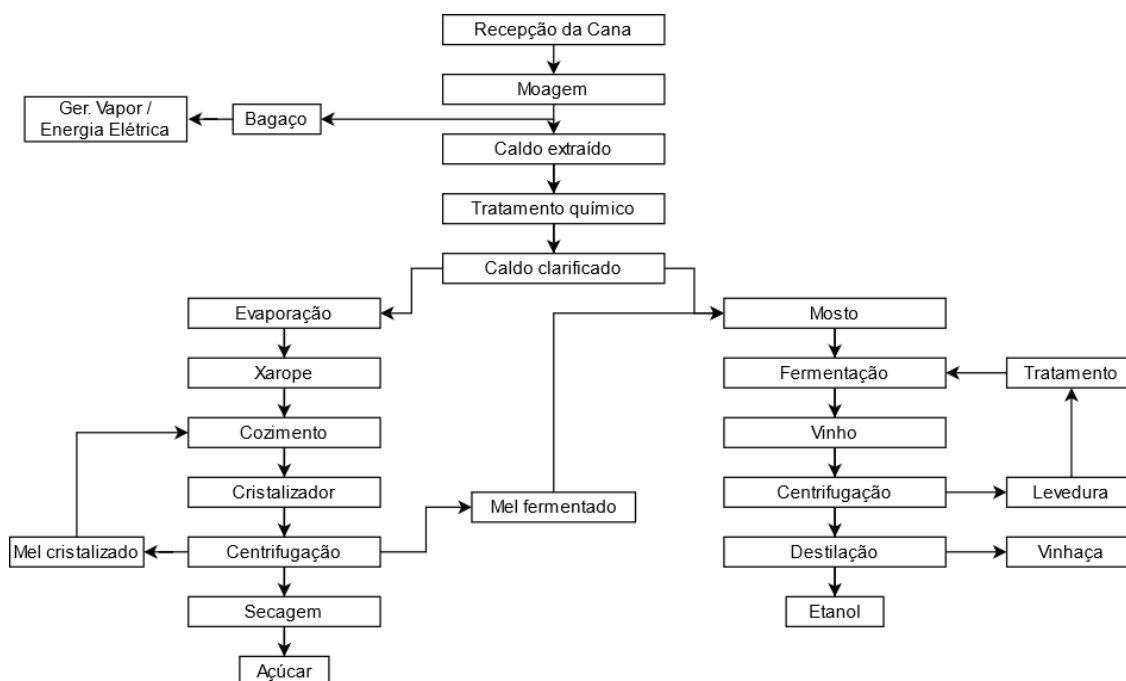
Durante o processo de destilação, é gerada a vinhaça, um subproduto da fermentação do caldo de cana-de-açúcar. Para cada litro de etanol produzido, são gerados aproximadamente 10 a 15 litros de vinhaça (Longati, 2018). Apesar da utilização eficiente da cana-de-açúcar nas biorrefinarias, uma fração considerável do conteúdo energético da planta permanece na vinhaça como matéria orgânica residual da fermentação. A vinhaça é caracterizada como um efluente de destilarias com alto poder poluente, mas também com alto valor fertilizante, devido à sua riqueza em nutrientes minerais, principalmente potássio, nitrogênio e fósforo, além de um elevado teor de matéria orgânica, sendo muito utilizada como fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar. (Espanha-Gamboa et al., 2011).

Nesse contexto, Souza (2021) modelou detalhadamente as etapas industriais da produção de etanol e açúcar utilizando o software Aspen Plus. A modelagem abrangeu tanto destilarias anexas quanto autônomas, permitindo uma análise comparativa entre o processo convencional e o integrado com a técnica de fermentação extrativa por stripping com CO₂.

As etapas modeladas da produção de etanol incluíram desde a extração e tratamento do caldo, passando pela fermentação, destilação e desidratação, até a cogeração de energia elétrica. Adicionalmente, foram modeladas as etapas de produção de açúcar, desde a concentração do caldo até a cristalização e centrifugação. As simulações realizadas demonstraram que a integração de processos intensificados, como a fermentação extrativa e a otimização das etapas de produção de açúcar e etanol, pode aumentar significativamente a eficiência energética, reduzir a produção de vinhaça e melhorar a recuperação de açúcares, evidenciando a importância da modelagem para a otimização da produção na indústria sucroalcooleira.

As principais operações unitárias relativas ao processo de produção de açúcar, etanol e energia elétrica referentes a usina foram esquematizadas na Figura 2.4:

Figura 2.4 – Fluxograma da fabricação de açúcar, etanol e energia elétrica



Fonte: Adaptado de Duarte; Furlan; Elias, 2023

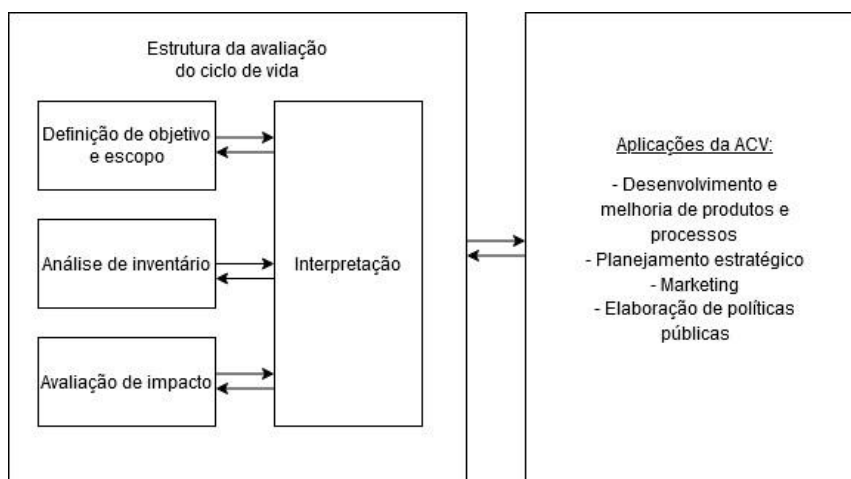
2.3. IMPACTO AMBIENTAL E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)

2.3.1. Análise do ciclo de vida

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta utilizada para avaliar os impactos ambientais associados a todos os estágios de vida de um produto, processo ou serviço. O ciclo de vida de um produto começa com a extração das matérias-primas, onde são utilizados recursos naturais, tanto materiais quanto energéticos. Em seguida, o processo avança para as etapas de produção, distribuição, uso e consumo do produto. Finalmente, considera-se a fase de descarte, que inclui as possibilidades de reciclagem e reuso, até a disposição final, quando há o retorno ao meio ambiente (Longati, 2018). O principal propósito da ACV é fornecer uma visão abrangente e sistematizada dos impactos ambientais, permitindo a identificação de oportunidades para melhorias em termos de sustentabilidade e eficiência ambiental. A ACV é normatizada internacionalmente pelas normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que estabelecem os princípios e as diretrizes para a realização dessas análises. Essas normas garantem que o processo de avaliação seja conduzido de maneira consistente e científica, facilitando a comparação de resultados e a aplicação das conclusões em diferentes contextos (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006).

A utilização dessa ferramenta permite identificar os estágios do processo ou tecnologias que apresentam os maiores impactos ambientais, fornecendo um guia para melhorias tanto no nível de processos, quanto organizacional. Além disso, a ACV é uma ferramenta poderosa para embasar políticas públicas e legislações que respeitem o meio ambiente, incentivando práticas sustentáveis e inovação tecnológica em direção a processos mais limpos, e ofereçam incentivos para organizações que adotem práticas ambientalmente responsáveis. No âmbito prático, a ACV é dividida em quatro fases, apresentadas na Figura 2.5. Sendo elas: definição do objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos ambientais e interpretação dos resultados (ABNT 14040, 2009).

Figura 2.5 – Estrutura da avaliação do ciclo de vida



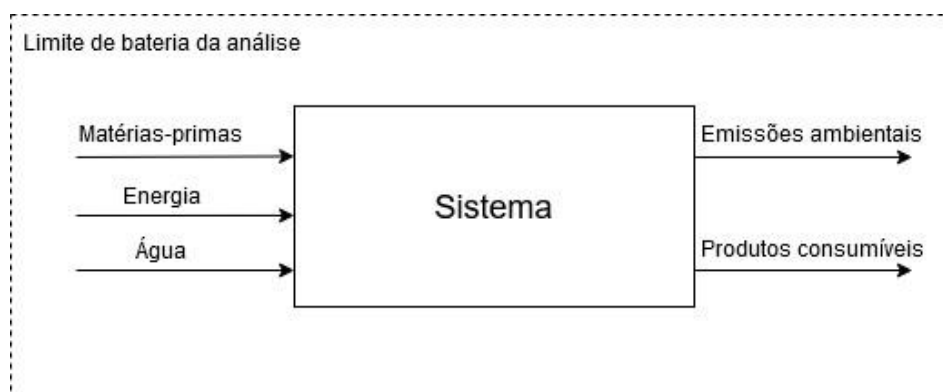
Fonte: adaptado de ABNT 14040 (2009) apud Longati, 2018.

2.3.2. Fases da análise de ciclo de vida

A primeira fase da ACV é a definição do objetivo e escopo, onde são estabelecidos os propósitos específicos do estudo, os limites de bateria do sistema a ser considerado e as principais hipóteses. Essa fase é crucial para determinar o foco da análise e garantir que os resultados sejam relevantes para a tomada de decisão. O objetivo deve considerar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo, o público-alvo e se será utilizado como um estudo comparativo (ABNT, 2009). O escopo deve definir claramente os limites do sistema, suposições e limitações do modelo, profundidade e grau de detalhe do estudo, tipos de impactos a serem analisados, os processos incluídos na análise e a unidade funcional utilizada para mensuração, fornecendo uma referência com a qual as entradas e saídas podem ser relacionadas (e.g. 1 tonelada de produto) (Curran, 2013).

Na segunda fase da ACV, deve-se construir um inventário do ciclo de vida, todos os fluxos de entrada e saída relacionados ao sistema em análise são quantificados. Isso inclui o consumo de matérias-primas, energia, água, emissões ambientais, geração de resíduos e os produtos consumíveis gerados no processo. Esta fase requer a coleta de dados precisos e a modelagem dos processos envolvidos, utilizando ferramentas como bancos de dados de ACV e softwares especializados (Curran, 2013). A Figura 2.6 ilustra um possível volume de controle para o inventário de uma avaliação do ciclo de vida.

Figura 2.6 – Volume de controle e fluxos considerados na ACV



Fonte: adaptado de Elias, 2020

Na etapa de avaliação dos impactos ambientais, os dados do inventário são convertidos em indicadores ambientais. Nesta fase, os fluxos de materiais e energia são associados a diferentes categorias de impacto e tais categorias diferem dependendo da metodologia utilizada. Categorias comuns são: depleção abiótica, eutrofização, acidificação, potencial de aquecimento global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*), diminuição da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade humana e ecotoxicidade no ecossistema (Saur, 2015). A ACV utiliza modelos de caracterização para quantificar esses impactos, fornecendo uma visão detalhada dos principais desafios ambientais relacionados ao ciclo de vida do produto ou processo. A ênfase em uma categoria de impacto específica, pode variar conforme os objetivos do estudo. No contexto de descarbonização e busca por produtos que possuem menos emissões de gases de efeito estufa associados, o potencial de aquecimento global (GWP) muitas vezes recebe maior atenção. No entanto, é essencial analisar outros indicadores, pois eles podem revelar diferentes perspectivas sobre os impactos ambientais de um processo, além das emissões de gases de efeito estufa (Guinée et al., 2011).

A fase final da ACV é a interpretação dos resultados, que também ocorre concomitantemente com as anteriores, já que pode alterar o rumo das análises, onde as informações obtidas nas etapas anteriores são analisadas em relação aos objetivos definidos inicialmente. A interpretação busca identificar as principais fontes de impacto ambiental, avaliar a sensibilidade dos resultados em relação às hipóteses e dados utilizados, e propor recomendações para a melhoria do desempenho ambiental (ISO 14044:2006).

Diversos estudos têm utilizado a ACV para modelar e avaliar os impactos ambientais da produção de etanol, abrangendo desde a fase agrícola até o processamento industrial. Dias (2015) compilou diversos trabalhos como os de Macedo, Seabra e Silva (2008), Seabra et al.

(2011b) e Rocha et al. (2014), que analisam as emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais associados ao ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar, destacando sua eficiência em comparação com combustíveis fósseis. Esses estudos reforçam a importância da ACV como uma ferramenta essencial para avaliar e compreender os impactos ambientais dos biocombustíveis.

Um trabalho que deve ser destacado é o estudo de Cavalett et al. (2013), que teve como objetivo comparar os impactos ambientais do etanol de cana-de-açúcar com os da gasolina, utilizando diferentes métodos de ACV. Foi modelado todo o ciclo de vida do etanol, desde a produção agrícola, passando pelo processamento industrial, até a distribuição e o uso final, comparando os resultados em várias categorias de impacto. Os resultados indicaram que o etanol apresenta um impacto significativamente menor no Potencial de Aquecimento Global (GWP), representando uma redução de aproximadamente 67% em comparação ao GWP da gasolina. No entanto, o estudo também revelou que o etanol tem impactos mais elevados em categorias como acidificação e eutrofização, devido às práticas agrícolas da produção de cana-de-açúcar. Cavalett et al. (2013) concluíram que, embora o etanol ofereça vantagens em termos de emissões de gases de efeito estufa, é crucial considerar uma ampla gama de categorias de impacto para uma avaliação completa da sustentabilidade ambiental dos biocombustíveis.

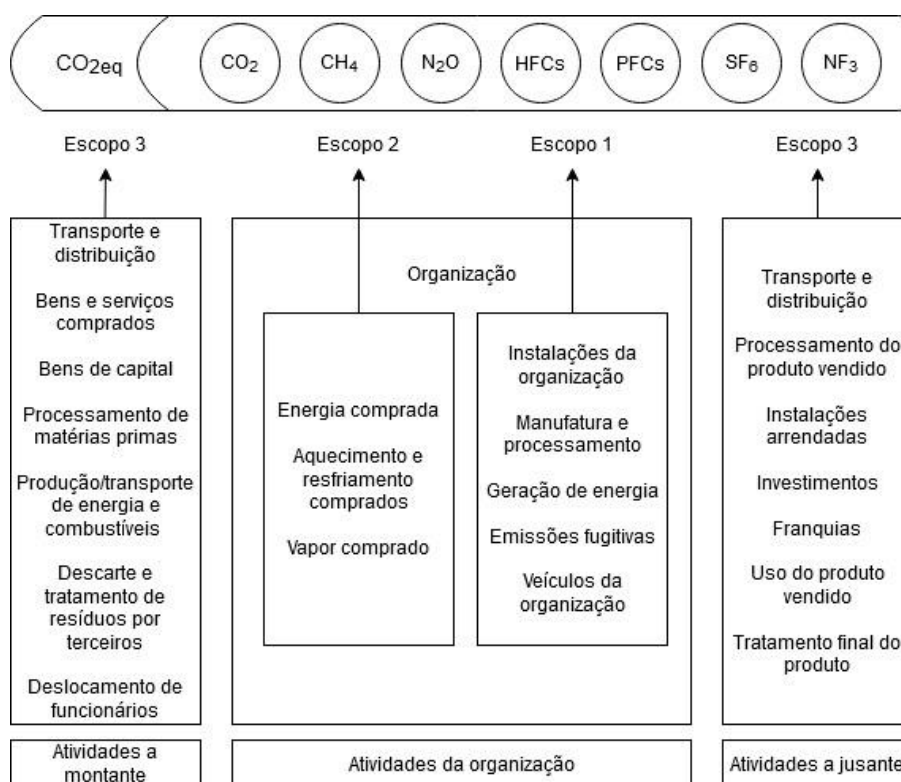
2.3.3. Escopos de emissão

No contexto de organizações, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) são frequentemente categorizadas em três escopos para facilitar sua quantificação e gerenciamento. O Escopo 1 inclui as emissões diretas de GEE provenientes de fontes que são de propriedade ou controladas pela organização, como as emissões de processo, veículos ou caldeiras. O Escopo 2 refere-se às emissões indiretas de GEE associadas à produção de eletricidade, calor ou vapor comprados e consumidos pela organização. Já o Escopo 3 abrange todas as outras emissões indiretas que ocorrem na cadeia de valor da organização, incluindo desde a extração de matérias-primas até a disposição final dos produtos, mesmo que essas emissões não sejam controladas diretamente pela organização (WRI, 2015).

Comparada à Análise do Ciclo de Vida (ACV), a análise das emissões divididas em escopos não se concentra na avaliação de um produto específico, mas sim em todas as emissões associadas a uma organização ao longo de sua cadeia de valor. Essa classificação é frequentemente referida em metas de redução de emissões (e.g. reduzir em 15% as

emissões de escopo 1 e 2 da organização até 2030). Tal distinção entre os escopos é importante, pois permite uma interpretação mais detalhada de qual escopo é o mais crítico num contexto de redução das emissões global. A inclusão de emissões de Escopo 3, por exemplo, pode revelar impactos significativos que não são capturados apenas pelas emissões diretas (Escopo 1) e indiretas de energia (Escopo 2). Essa abordagem sistêmica é fundamental para identificar oportunidades de redução de emissões ao longo de toda a cadeia de valor, alinhando as práticas empresariais com os objetivos globais de sustentabilidade (WRI, 2015). A Figura 2.7 apresenta uma representação gráfica dos diferentes escopos e emissões.

Figura 2.7: Emissões de escopo 1, 2 e 3



Fonte: Adaptado de WRI, 2015.

2.4. PROGRAMA RENOVABIO E FERRAMENTA RENOVACALC

O RenovaBio é uma política pública, instituída pelo governo brasileiro em 2017 (Lei nº 13.576/2017), que visa promover a expansão sustentável da produção de biocombustíveis, focando na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Sua criação está diretamente ligada aos compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris, em 2016,

onde o país se comprometeu a reduzir suas emissões de GEE em 37% até 2025 e em 43% até 2030, com base nos níveis de 2005 (Cardoso et al., 2020). O RenovaBio foi desenvolvido com o objetivo de garantir previsibilidade e segurança energética para o país, além de incentivar práticas mais sustentáveis em toda a cadeia produtiva e de utilização dos biocombustíveis (Matsuura et al., 2018b).

No cerne do RenovaBio estão os Créditos de Descarbonização, conhecidos como CBIOS. Cada CBIO representa uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) cuja emissão foi evitada através da substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis. O principal objetivo dos créditos é oferecer um incentivo financeiro aos produtores que adotam práticas mais sustentáveis, conseguindo reduzir a intensidade de carbono dos seus biocombustíveis (Cardoso et al., 2020). Esses créditos são comercializados na bolsa de valores, permitindo que distribuidores de combustíveis cumpram suas metas obrigatórias de descarbonização adquirindo esses créditos (Pereira et al., 2018). Além de promover uma redução efetiva nas emissões de GEE, o mercado de CBIOS também estimula o setor financeiro a apoiar práticas sustentáveis, integrando as questões ambientais nas decisões econômicas (Matsuura et al., 2018a).

A ferramenta RenovaCalc, desenvolvida pela EMBRAPA, desempenha um papel essencial dentro do RenovaBio, pois é através dela que se calcula a intensidade de carbono (IC) dos biocombustíveis produzidos, em gCO_{2eq}/MJ (Ronquim Filho et al., 2022). Utilizando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), a RenovaCalc permite que os produtores insiram dados específicos sobre suas operações para calcular as emissões de GEE em todas as etapas do ciclo de vida do biocombustível, desde a produção agrícola até a fase industrial. Esta ferramenta é fundamental para o processo de certificação do RenovaBio, uma vez que a nota de eficiência energético-ambiental gerada pela RenovaCalc determina quantos CBIOS uma unidade produtora pode emitir. Essa nota reflete o desempenho ambiental do produtor e incentiva a adoção de práticas que aumentem a eficiência no uso de recursos e minimizem o impacto ambiental (Matsuura et al., 2018b).

A nota de eficiência energético-ambiental é obtida ao comparar a intensidade de carbono do biocombustível produzido com a de um combustível fóssil equivalente, como a gasolina ($87,4 gCO_{2eq}/MJ$) ou o diesel ($86,5 gCO_{2eq}/MJ$). Quanto maior for a redução nas emissões de GEE em comparação ao combustível fóssil de referência, maior será a nota de eficiência. Além disso, a substituição do consumo de combustíveis fósseis por biocombustíveis no próprio processo de produção pode reduzir significativamente a

intensidade de carbono final do biocombustível, melhorando a nota de eficiência. Por exemplo, ao invés de utilizar uma frota rodando com diesel A, aumentar a fração de biodiesel pode reduzir o impacto no produto final. Adicionalmente, uma nota elevada indica que as práticas produtivas são mais sustentáveis e eficientes, o que pode aumentar a competitividade do biocombustível no mercado, além de atrair investidores e parceiros comerciais (Matsuura et al., 2018a; Ronquim Filho et al., 2022).

2.5. ANÁLISE DE INCERTEZA E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

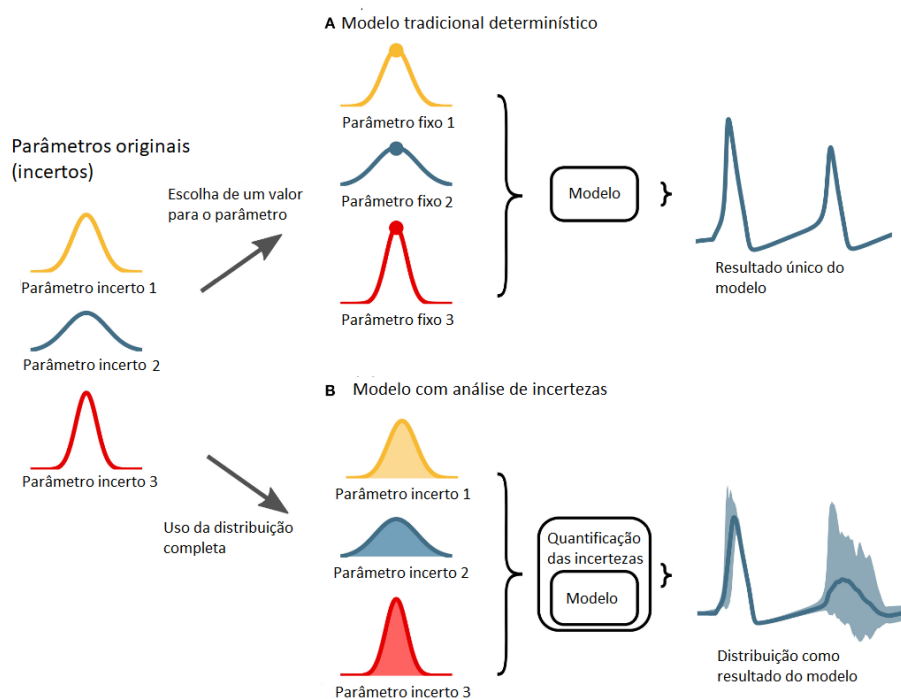
A análise de incerteza e a análise de sensibilidade são metodologias importantes para a construção e avaliação de modelos numéricos, especialmente em contextos onde as entradas dos modelos possuem uma variabilidade significativa. A análise de sensibilidade examina como as incertezas nas saídas de um modelo podem ser distribuídas entre diferentes fontes de incerteza nos dados de entrada, ajudando a identificar quais variáveis têm maior influência sobre os resultados finais (Saltelli et al., 2008). Por sua vez, a análise de incerteza foca em quantificar a incerteza das saídas do modelo, proporcionando uma medida de confiança nos resultados obtidos. Na prática, essas análises são geralmente realizadas de forma sequencial, começando com a análise de incerteza para quantificar o grau de incerteza presente, seguida pela análise de sensibilidade para identificar as entradas mais críticas.

2.5.1. Análise de incerteza

A análise de incerteza é uma ferramenta que avalia como as incertezas nas variáveis de entrada podem afetar o comportamento das variáveis resposta em sistemas complexos. Esta abordagem considera que as variáveis de entrada não são conhecidas com precisão absoluta e, portanto, avalia como essas incertezas se propagam através do modelo, determinando a confiabilidade dos resultados (Saltelli et al., 2008). A caracterização da variabilidade nas saídas do modelo pode incluir o uso de distribuições de probabilidade, intervalos de confiança e outros parâmetros estatísticos (Helton, 1997). A incerteza nas entradas de um modelo pode ter diversas origens, incluindo variações nos dados experimentais, erros de medição, suposições simplificadas feitas durante o processo de modelagem e a variabilidade nos consumos de insumos para o mesmo processo produtivo, que pode ocorrer devido a diferenças regionais, condições operacionais ou práticas adotadas (Morgan; Henrion, 1990). Essas incertezas se propagam através do modelo, influenciando

diretamente a confiabilidade das saídas (Beven, 2009), como demonstrado pela Figura 2.7, que compara a análise de incertezas com a abordagem tradicional determinística de modelos.

Figura 2.7 – Exemplificação de análise de incertezas e análise determinística



Fonte: adaptado de Tennøe, 2018

Uma das metodologias mais empregadas para realizar análise de incerteza é o método de Monte Carlo, que baseia-se na geração de um grande número de simulações, onde as variáveis de entrada são amostradas aleatoriamente de acordo com distribuições de probabilidade especificadas (Metropolis; Ulam, 1949). A partir dessas simulações, é possível construir uma distribuição de resultados que reflete a incerteza das saídas do modelo (Rubinstein; Kroese, 2016). Esse método é especialmente útil em sistemas onde as interações entre variáveis de entrada e resposta não são lineares, ou seja, onde as incertezas em uma variável de entrada podem ter efeitos complexos e desproporcionais nas saídas do modelo. Neste contexto, Duarte, Furlan e Elias (2023) realizaram uma análise técnico-econômica de uma usina sucroalcooleira e empregaram a análise de incertezas no âmbito dos preços de commodities e matéria-prima da usina. A partir de uma distribuição de preços de cana-de-açúcar, etanol, açúcar e energia elétrica, determinaram se o investimento adicional para que a usina fosse flexível na produção de etanol e açúcar seria compensado pela vantagem de aproveitar as valorizações de uma ou outra commodity.

No entanto, o método de Monte Carlo apresenta desafios, especialmente quando as variáveis de entrada estão correlacionadas (Saltelli et al., 2004). A amostragem independente de variáveis correlacionadas pode levar a resultados que não refletem a realidade do sistema modelado. Para mitigar esse problema, uma das técnicas mais utilizadas é a Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*). A PCA transforma as variáveis correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas (componentes principais), permitindo que as amostras sejam geradas de forma independente sem perder a relação estatística entre as variáveis originais (Jolliffe, 2002). Essa técnica, portanto, melhora a precisão dos resultados do método de Monte Carlo em contextos onde as correlações entre as variáveis de entrada são significativas (Helton; Davis, 2003).

2.5.2. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é frequentemente utilizada para complementar a análise de incerteza. Enquanto a análise de incerteza quantifica a variação nas saídas do modelo devido à incerteza nas entradas, a análise de sensibilidade identifica quais variáveis de entrada têm maior influência sobre as saídas, permitindo que os modeladores priorizem esforços na obtenção de dados mais precisos ou na calibração dos parâmetros mais sensíveis (Saltelli, 2008). Dentro do escopo da análise de sensibilidade, distinguem-se as abordagens local e global. A análise de sensibilidade local examina a resposta do modelo a pequenas variações nas entradas em torno de um ponto específico, geralmente mantendo as outras variáveis constantes (Helton; Davis, 2003). Essa abordagem é mais simples e menos custosa do ponto de vista computacional, sendo frequentemente aplicada em modelos considerados lineares ou aproximadamente lineares em torno do ponto de operação escolhido (Saltelli et al., 2004).

Em contraste, a análise de sensibilidade global avalia o impacto das incertezas nas variáveis de entrada em todo o espaço possível das entradas, considerando variações simultâneas em múltiplos parâmetros. Entre os métodos de análise global, destacam-se o método de Sobol e o método FAST (*Fourier Amplitude Sensitivity Test*). O método de Sobol decompõe a variância da saída do modelo em contribuições atribuíveis a cada variável de entrada e suas interações, sendo amplamente utilizado devido à sua robustez em modelos complexos e não lineares (Sobol, 1993; Saltelli et al., 2008). O método FAST, por sua vez, utiliza a transformação de Fourier para avaliar a sensibilidade, sendo particularmente

eficiente em cenários que demandam rapidez ou recursos computacionais limitados (Saltelli et al., 2008).

No estudo de Strunge et al. (2023), a análise de sensibilidade global foi aplicada a um modelo de mineralização de CO₂ na indústria de cimento, utilizado para produzir materiais cimentícios suplementares. O estudo comparou várias metodologias de análise de sensibilidade e destacou que a análise local, comumente empregada, muitas vezes não captura adequadamente as interações entre variáveis críticas. Em contraste, a aplicação de métodos de análise de sensibilidade global, como os baseados em variância, trouxe uma compreensão mais aprofundada das incertezas e identificou os parâmetros que mais influenciam os custos e a viabilidade econômica do processo de mineralização.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizadas as premissas e relações estabelecidas na ferramenta RenovaCalc para produção de Etanol 1G (ANP, 2024). O cálculo das emissões de CO_{2eq} da produção de cana-de-açúcar foi realizado no simulador de processos EMSO e a análise de incerteza e sensibilidade no ambiente EMSOpy, que conecta bibliotecas em Python com o simulador.

3.1. FERRAMENTA RENOVACALC

A RenovaCalc é uma ferramenta desenvolvida para quantificar a intensidade de carbono (IC) dos biocombustíveis, expressa em gCO_{2eq}/MJ, a partir de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) atribucional (alocando aos insumos do processo impactos ambientais estáticos), que abrange desde a produção agrícola até a combustão do biocombustível (Scachetti, 2016). A ferramenta está estruturada em planilhas de Excel e contém informações específicas para diferentes rotas de produção de biocombustíveis, incluindo o etanol de cana-de-açúcar (1G e 2G), milho, combustível HEFA, biodiesel e biometano (ANP, 2024).

Os dados solicitados pelo RenovaCalc são divididos em três principais fases: agrícola, industrial e de distribuição. Para a fase agrícola, os dados incluem a área total cultivada, a produção total de cana, o consumo de corretivos e fertilizantes, e o consumo de combustíveis e eletricidade. Na fase industrial, são necessários dados sobre a quantidade de cana processada, rendimento de etanol anidro e hidratado, consumo de biocombustíveis e eletricidade, entre outros. Já na fase de distribuição, é preciso informar o sistema logístico utilizado e a distância média de transporte. A planilha do RenovaCalc ao considerar a energia gerada pela combustão do biocombustível produzido, considera seu uso final, sendo assim denominada uma abordagem do berço ao túmulo (do inglês, *cradle-to-grave*) (Matsuura et al., 2018b).

No presente trabalho, o escopo de avaliação do ciclo de vida está reduzido à fase agrícola, ou seja do berço à porta da indústria (do inglês, *cradle-to-industry gate*), compreendendo o plantio, colheita e transporte da cana-de-açúcar até a porta da indústria, sem considerar a transformação para etanol e açúcar. Os insumos da produção agrícola são categorizados como "produtor primário" ou "produtor padrão". O "produtor primário" utiliza dados primários fornecidos pelo produtor, enquanto o "produtor padrão" recorre a valores médios nacionais penalizados, incentivando a adoção de dados mais precisos e específicos para uma avaliação ambiental mais representativa (Matsuura et al., 2018b).

A Tabela 3.1 apresenta os dados a serem inseridos pela usina produtora de biocombustível considerando o “produtor primário”. No caso do “produtor padrão”, os dados a serem inseridos são os mesmos do produtor primário até a palha recolhida e os outros consumos já são pré-determinados.

Tabela 3.1: Entradas de dados agrícolas para produtor primário

Informações gerais	
Área total	ha
Produção total colhida para moagem	t cana
Quantidade comprada pela unidade produtora de biocombustível	t cana
Teor de impurezas vegetais (base úmida)	kg/t cana
Umidade das impurezas vegetais	%
Teor de impurezas minerais	kg/t cana
Palha recolhida (base seca)	t palha
Área Queimada	ha
Corretivos:	
Calcário calcítico	kg/t cana
Calcário dolomítico	kg/t cana
Gesso	kg/t cana
Fertilizantes sintéticos	
Ureia	kg N/t cana
Fosfato monoamônico (MAP)	kg N/t cana
Fosfato monoamônico (MAP)	kg P ₂ O ₅ /t cana
Fosfato diamônico (DAP)	kg N/t cana
Fosfato diamônico (DAP)	kg P ₂ O ₅ /t cana
Nitrato de amônio	kg N/t cana
Solução de nitrato de amônio e ureia (UAN)	kg N/t cana
Amônia anidra	kg N/t cana
Sulfato de amônio	kg N/t cana
Nitrato de amônio e cálcio (CAN)	kg N/t cana
Superfosfato simples (SSP)	kg P ₂ O ₅ /t cana
Superfosfato triplo (TSP)	kg P ₂ O ₅ /t cana
Cloreto de potássio (KCl)	kg K ₂ O/t cana
Outros*	kg N/t cana
Outros*	kg P ₂ O ₅ /t cana
Outros*	kg K ₂ O/t cana

Tabela 3.1 (continuação): Entradas de dados agrícolas para produtor primário

Fertilizantes orgânicos	
Vinhaça	L/t cana
Concentração de N	g N/L
Torta de Filtro (base úmida)	kg/t cana
Concentração de N	g N/kg
Cinzas e fuligem (base úmida)	kg/t cana
Concentração de N	g N/kg
Outros*	kg/t cana
Concentração de N	g N/kg
Outros*	kg/t cana
Concentração de N	g N/kg
Combustíveis e eletricidade	
Diesel - B10	L/t cana
Diesel - B11	L/t cana
Diesel - B15	L/t cana
Diesel - BX	L/t cana
Teor de biodiesel na mistura	%
Diesel - B20	L/t cana
Diesel - B30	L/t cana
Biodiesel - B100	L/t cana
Gasolina C	L/t cana
Etanol hidratado	L/t cana
Biometano de terceiros	Nm ³ /t cana
Biometano próprio	Nm ³ /t cana
Eletricidade da rede - mix médio	kWh/t cana
Eletricidade - PCH	kWh/t cana
Eletricidade - biomassa	kWh/t cana
Eletricidade - eólica	kWh/t cana
Eletricidade - solar	kWh/t cana

*"Outros" refere-se a diferentes fertilizantes utilizados pelos produtores e inclui um campo para a especificação do fertilizante em questão.

Fonte: adaptado de ANP, 2024

O consumo de agrotóxicos (herbicidas, inseticidas e pesticidas) é um parâmetro fixo que depende apenas da área plantada mesmo para o caso de “produtor primário”, podendo ser um ponto de melhoria na ferramenta visto que pode variar dependendo do produtor.

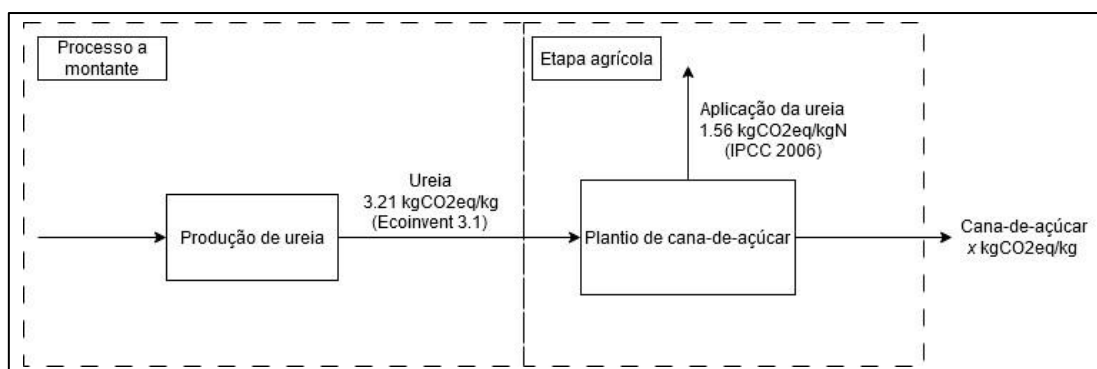
As estimativas de emissão na RenovaCalc abrangem tanto as emissões geradas durante a produção dos insumos utilizados no processo, quanto aquelas decorrentes do uso destes insumos na produção da cana-de-açúcar. Isso significa que, por exemplo, no caso do consumo de combustíveis, a ferramenta considera não apenas as emissões envolvidas na combustão, mas também as emissões de todo o ciclo de vida de produção do combustível. As emissões associadas aos processos a montante referem-se àquelas que ocorrem antes do insumo ser utilizado, incluindo a extração de matérias-primas, fabricação e transporte destes.

Já as emissões no processo de produção da cana-de-açúcar são aquelas que acontecem diretamente na plantação, decorrentes da aplicação de fertilizantes, queima de combustíveis e resíduos agrícolas.

A RenovaCalc utiliza fatores de emissão específicos. Para os processos a montante, a ferramenta se baseia no banco de dados Ecoinvent v.3.1 (Wernet et al., 2016), que oferece inventários detalhados de ciclo de vida para diferentes insumos. Além disso, alguns dos insumos possuem dados de produção e processamento nacional, com base em informações de instituições como a Embrapa e o LNBR.

A Figura 3.1 busca exemplificar, utilizando a ureia, as emissões que a cana-de-açúcar carrega em sua produção, considerando as emissões dos processos a montante e as emissões de sua produção em si.

Figura 3.1: Exemplificação de emissões atribuídas à produção de cana-de-açúcar pelo consumo de ureia



Fonte: Acervo pessoal

3.2. COLETA DE DADOS DAS USINAS

A avaliação da nota de eficiência energética e a emissão de créditos de descarbonização (CBIOS) das usinas produtoras de biocombustível são asseguradas por firmas inspetoras credenciadas pela ANP, que garantem a certificação da participação das usinas no programa RenovaBio. Atualmente, existem 13 firmas inspetoras credenciadas, entre as quais três — BENRI, SGS e Green Domus — concentram a grande maioria dos processos de certificação, respondendo por cerca de 99% das certificações emitidas (ANP, 2024).

Os sites dessas firmas inspetoras oferecem bancos de consultas públicas, nos quais disponibilizam o painel principal da ferramenta RenovaCalc para cada usina avaliada. Neste

painel, são apresentados dados como as intensidades de carbono, as notas de eficiência energético-ambiental, e informações consolidadas dos consumos nas fases agrícola, industrial e de distribuição. A partir desses bancos de consultas, foram coletados dados da fase agrícola de 38 usinas localizadas em diferentes regiões do país e de variados portes.

Inicialmente, foi realizada uma seleção desses dados, excluindo-se as usinas que utilizaram o "perfil padrão" na etapa agrícola. Dessa forma, foram considerados apenas os dados referentes aos consumos reais de "produtores primários" de cana-de-açúcar.

3.3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A modelagem e simulação da análise de ciclo de vida da cana-de-açúcar, foram realizadas no simulador EMSO (do inglês, *Environment for Modeling Simulation and Optimization* - Soares; Secchi, 2003). A ferramenta é um ambiente de simulação baseado em equações, gratuito, que foi desenvolvido a partir de um projeto iniciado em 2003 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que buscou desenvolver um simulador de processos nacional. O software permite herança e composição, possibilitando construir modelos complexos a partir da integração de modelos mais simples. Outra vantagem da ferramenta é a checagem automática da consistência das unidades de medida, graus de liberdade e das condições iniciais, fornecendo ao mesmo tempo uma linguagem que se assemelha a linguagem matemática usual, possibilitando um bom grau de flexibilidade ao usuário (Soares; Secchi, 2003).

A partir dos dados contidos na ferramenta do RenovaCalc, todas as premissas e relações necessárias para a ACV foram traduzidas para dentro do simulador EMSO. Em um arquivo, foram incluídos os fatores de emissão a montante para os diferentes insumos, capacidades caloríficas e propriedades dos combustíveis, fatores de emissões da combustão e relações de emissões diretas do processo agrícola. Para facilitar o entendimento do código, as premissas foram separadas em diferentes modelos. O código está disponibilizado no Apêndice A.

Visto que o EMSO permite herança e composição, por meio de outro modelo as equações necessárias para o cálculo das emissões do ciclo de vida da cana-de-açúcar foram inseridas, de forma a relacionarem as premissas, presente no modelo citado anteriormente, com os consumos dos insumos. O código utilizado no simulador está disponibilizado no Apêndice B.

As emissões totais da produção de cana-de-açúcar podem ser divididas entre emissões diretas e indiretas (a montante), como demonstrado na Equação 3.1.

$$E_T = EI_T + ED_T \quad (3.1)$$

onde E_T são as emissões totais, em $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{cana}}$, da produção de cana-de-açúcar, EI_T são as emissões indiretas totais do processo e ED_T as emissões diretas totais.

As emissões indiretas totais são calculadas por meio do consumo de cada insumo multiplicado pelo fator de emissão dos processos a montante, Equação 3.2. Os fatores foram retirados da RenovaCalc e estão disponibilizados no Anexo A.

$$EI_T = \sum_i^n C(i) \cdot GWP(i) \quad (3.2)$$

onde i são os insumos, combustíveis e eletricidade utilizados na produção da cana de açúcar, C é o consumo do insumo/fonte de energia e GWP é a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ da produção do insumo/fonte de energia.

As emissões diretas totais, incluem as emissões diretas da agricultura e da queima de combustíveis. A Equação 3.3 apresenta as emissões diretas totais e as equações 3.4 e 3.5 apresentam o cálculo das emissões diretas resultantes da combustão de combustíveis e da agricultura, respectivamente.

$$ED_T = ED_{TA} + ED_{TC} \quad (3.3)$$

$$ED_{TC} = \sum_i^n C(i) \cdot GWP_C(i) \quad (3.4)$$

$$ED_{TA} = ED_F + ED_R + ED_P \quad (3.5)$$

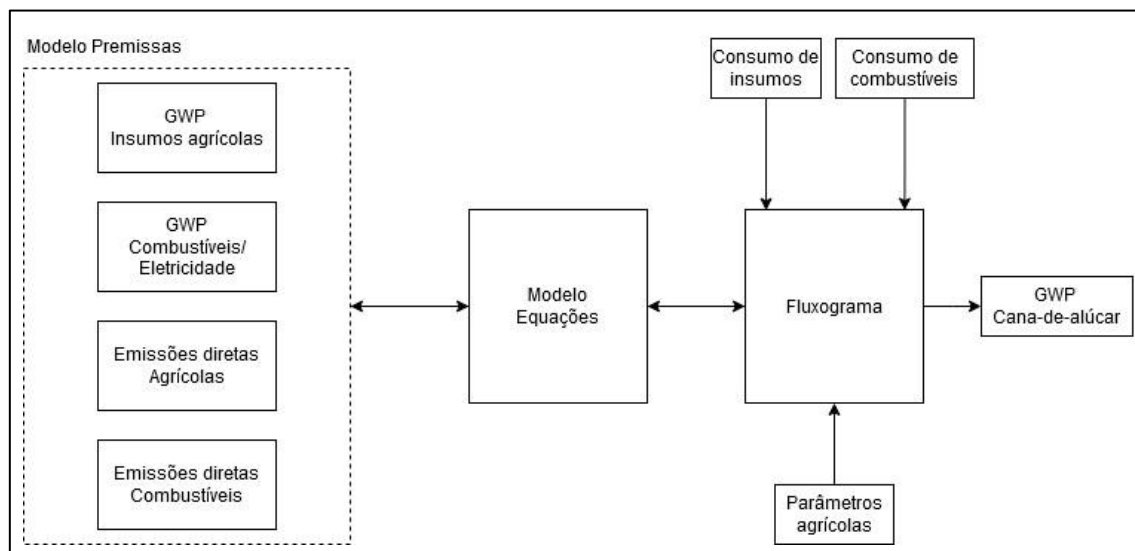
onde ED_{TC} são as emissões diretas totais da combustão de combustíveis, ED_{TA} são as emissões diretas totais da agricultura, i são os combustíveis, GWP_C é a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ decorrente da combustão, ED_F são as emissões diretas da aplicação de fertilizantes, ED_R são as emissões diretas dos resíduos agrícolas e ED_P são as emissões diretas da queima de palha.

Para o cálculo de ED_F , ED_R e ED_P são necessárias equações intermediárias, que relacionam a ocupação de terra, emissões de $\text{N}_2\text{O}_{\text{eq}}$ e CH_4 , consumo de fertilizantes orgânicos e sintéticos e estão disponíveis no código do Apêndice B.

Em posse dos modelos de premissas e o modelo de equações, foi criado um fluxograma, que efetivamente permite ao usuário especificar a quantidade de cana

produzida, as variáveis gerais (informações gerais da Tabela 3.1), os consumos específicos de cada insumo, combustível e fonte de eletricidade no processo agrícola. O fluxograma então, faz a comunicação com os modelos referenciados e calcula potencial de aquecimento global da cana-de-açúcar em $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{cana}}$. A Figura 3.2 representa essa interação entre os modelos e fluxograma.

Figura 3.2: Interação de modelos e fluxograma no EMSO



Fonte: Acervo pessoal

3.4. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados das usinas coletados tiveram que ser tratados, o que incluiu a limpeza para eliminar inconsistências e o agrupamento em categorias relevantes. Em seguida, foram geradas distribuições estatísticas para a análise de incerteza e sensibilidade.

3.4.1. Análise de correlação e agrupamento

A partir dos dados coletados, buscou-se gerar distribuições para que as variáveis fossem amostradas para a realização da análise de incerteza. A hipótese estabelecida é que o consumo de insumos agrícolas possui um limite máximo, de forma que o aumento no consumo de um insumo implicaria na redução de outro com função similar. Por essa razão, pressupôs-se que algumas variáveis estariam correlacionadas. Para investigar essas correlações, foi gerada a matriz de correlação entre as variáveis utilizando a equação de correlação de Pearson, Equação 3.6.

$$\rho = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (3.6)$$

onde x_i e y_i representam os valores das variáveis, \bar{x} e \bar{y} são as médias aritméticas das variáveis e n são o número de variáveis.

A análise de correlação indica a relação linear entre as variáveis e apresenta valores entre -1 e 1, onde o sinal indica se a correlação é positiva ou negativa e o valor indica a intensidade da correlação entre elas (Correlation Coefficient, 2008). Além disso, gráficos de dispersão entre as variáveis foram utilizados para uma análise visual das correlações.

Adicionalmente foi realizada uma seleção das variáveis relevantes para a análise. Foram descartados os insumos que não apresentavam consumo ou variação significativa. Outras variáveis foram combinadas para formar novas métricas, como a produtividade (t/ha), calculada pela razão entre produção total e área cultivada. O agrupamento de variáveis foi necessário, dado que o espaço amostral era limitado e muitas usinas apresentavam consumo de determinados insumos, mas não de outros. Isso resultava em um desvio padrão alto e uma média baixa para algumas variáveis, o que poderia levar à geração de valores negativos durante a amostragem – algo que não faz sentido físico, especialmente para variáveis de consumo. A Equação 3.7 apresenta, como exemplo, o agrupamento do consumo de calcário calcítico e dolomítico e gesso em uma só variável, consumo de corretivos traduzidos em

calcário calcítico. Essa tradução foi realizada por meio das emissões totais da cana-de-açúcar resultantes do consumo de cada insumo, ou seja, considerando emissões diretas e indiretas.

$$C'(n_1) = \frac{C(n_1) \cdot GWP_T(n_1) + C(n_2) \cdot GWP_T(n_2) + C(n_3) \cdot GWP_T(n_3)}{GWP_T(n_1)} \quad (3.7)$$

onde, C' representa o consumo de corretivos traduzido em calcário calcítico, C representa o consumo do insumo n , em $\text{kg}_{\text{insumo}}$, GWP_T representa as emissões totais na cana-de-açúcar resultante do consumo do insumo n , em $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kg}_{\text{insumo}}$, n_1 representa calcário calcítico, n_2 representa calcário dolomítico e n_3 representa gesso.

3.4.2. Amostragem de dados

A fim de determinar as distribuições das variáveis resultantes, utilizou-se a biblioteca *Fitter* em Python (Cokelaer et al., 2020), que testa diferentes distribuições estatísticas e identifica a que melhor se adapta aos dados observados. Como uma exigência era evitar a geração de valores negativos, priorizou-se a distribuição lognormal. A distribuição lognormal é particularmente adequada nesse contexto porque, ao transformar os dados para o espaço logarítmico (\ln) e retornar ao espaço original por exponenciação, garante-se que todos os valores gerados são positivos, eliminando a possibilidade de valores negativos. Durante o processo de amostragem, os dados foram transformados com logaritmo natural (\ln) e amostrados da distribuição normal equivalente, sendo análogo a amostrar da lognormal.

A partir da comprovação das correlações, a técnica de Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*) foi utilizada para realizar a amostragem de dados descorrelacionados. A PCA é uma técnica estatística que transforma um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas em um conjunto de variáveis linearmente independentes, chamados de componentes principais (PC, do inglês *principal component*) (Nelles, 2001). Esses componentes são combinações lineares das variáveis originais e são obtidas de forma que a primeira componente retém a maior variabilidade dos dados, e cada componente subsequente retém a maior variância possível sob a restrição de ser ortogonal (descorrelacionada) às anteriores. Isso resulta em um novo espaço de variáveis (PCs) onde as correlações originais entre as variáveis são eliminadas, simplificando a análise sem perder a essência da informação contida nos dados (Nelles, 2001). A seguir, está apresentado um passo a passo das etapas necessárias para a realização da técnica de PCA.

I) Centralização e escalonamento dos dados: Subtrai-se a média de cada variável dos dados originais, e divide-se pelo desvio padrão de modo que cada variável tenha média zero e desvio padrão 1, de forma a remover o viés (em inglês, *bias*) dos dados, e padronizar as variáveis, garantindo comparabilidade e evitando que variáveis com maiores magnitudes dominem a análise. A Equação 3.8 representa a matriz dos dados iniciais, obtido das usinas e a Equação 3.9 representa a centralização e escalonamento.

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & \cdots & x_{m,n} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$X_{C_i} = \frac{(X_i - \bar{X}_i)}{\sigma_i} \quad (3.9)$$

onde n são o número de variáveis, m é o número de pontos, X ($m \times n$) é a matriz dos dados originais, \bar{X}_i é a média dos valores da i -ésima coluna de X , σ_i é o desvio padrão da i -ésima coluna de X e X_{C_i} é a i -ésima coluna da matriz X_C ($m \times n$) dos dados centralizados e escalonados.

II) Cálculo da Matriz de Covariância: Uma vez que os dados estão centralizados e escalonados, a matriz de covariância C ($n \times n$) é equivalente a matriz de correlação e captura como duas variáveis variam juntas, sendo necessária pois o PCA busca as direções ao longo das quais a variância dos dados é maximizada. Esta é calculada a partir dos matriz de dados centralizados e escalonados pela Equação 3.10:

$$C = \frac{1}{(n-1)} X_C^T X_C \quad (3.10)$$

onde n é o número de observações.

III) Decomposição em Autovalores e Autovetores: A matriz de covariância é então decomposta para encontrar os autovalores e autovetores. Os autovalores indicam a quantidade de variância explicada por cada componente principal, enquanto os autovetores representam as direções principais no espaço dos dados descorrelacionados. Estes são determinados por meio da solução da igualdade apresentada na Equação 3.11. No presente trabalho, a solução da igualdade foi realizada utilizando o método “*eig*” de álgebra linear da biblioteca em Python, Numpy (Harris et al., 2020).

$$CV = \lambda V \quad (3.11)$$

onde λ ($n \times 1$) é o vetor dos autovalores e V ($n \times n$) é a matriz dos autovetores.

Neste momento, em posse dos autovalores e autovetores, foi realizada a geração de um novo conjunto de dados a partir das distribuições com desvio padrão igual a raiz dos autovalores ($\sigma(x)=\sqrt{\text{var}(x)}$). Como o objetivo era gerar uma amostragem no espaço original dos dados, foram necessários os passos a seguir para retornar ao espaço original e ajustar a ordem de grandeza das variáveis originais.

IV) Transformação dos Dados: Os dados gerados no espaço dos componentes principais são revertidos e retornam ao espaço original dos dados. Esta transformação é realizada aplicando-se a matriz dos autovetores aos dados no espaço dos componentes principais, revertendo o processo inicial e trazendo os dados de volta ao sistema de coordenadas original, como apresentado na Equação 3.12.

$$U_C = YV^T \quad (3.12)$$

onde U_C ($n \times z$) é a matriz dos novos dados no espaço original, Y ($n \times z$) é a matriz dos dados no espaço dos componentes principais e z é a quantidade de dados gerados.

V) Reversão da centralização e escalonamento dos dados: Finalmente, para que os dados gerados voltem à sua escala original, são adicionados de volta o desvio padrão e a média a cada variável, Equação 3.13.

$$U = U_C * \sigma + \bar{X} \quad (3.13)$$

onde U ($n \times z$) é a matriz dos novos dados gerados.

No espaço descorrelacionado dos dados, os autovalores foram gerados a partir de uma distribuição normal truncada em três desvios padrões, para evitar a geração de valores extremos que poderiam ocorrer se a distribuição normal fosse completa. A truncagem da normal é necessária para limitar os valores gerados dentro de um intervalo plausível, para garantir que as simulações reflitam condições realistas e não valores extremos não observados nos dados reais.

Desta forma, foram gerados diversos conjuntos de dados com diferentes tamanhos: 1000, 2000, 5000, 10.000, 20.000, 50.000 e 100.000 conjuntos. Em seguida, foi realizada uma comparação das correlações das variáveis de cada um desses conjuntos de dados com a correlação obtida com 100.000 dados, para entender a partir de quantos dados os valores convergiam. Essa análise de convergência foi visualizada por meio de gráficos que comparavam as correlações de variáveis escolhidas aleatoriamente nos diferentes conjuntos de dados.

3.5. ANÁLISE DE INCERTEZA E SENSIBILIDADE

As análises de incerteza e de sensibilidade foram realizadas por meio de bibliotecas em Python atreladas ao EMSO para a realização do cálculo do GWP da cana-de-açúcar. A comunicação entre o simulador de processos EMSO e o Python foi realizada através do protocolo de comunicação CAPE-OPEN (ELIAS, 2020), por meio de uma interface denominada EMSOpy. Desta forma, o EMSO pode ser utilizado como uma função no Python, de forma que a rotina em Python modifica as variáveis dentro do simulador e recebe como resposta a variável que está sendo analisada, neste caso o potencial de aquecimento global da cana. Ou seja, o Python varia as variáveis (i_1, i_2, \dots, i_k) e tem como retorno as variáveis resposta $(f(i_1, i_2, \dots, i_k))$.

3.5.1. Análise de incerteza

A partir do conjunto de dados gerados utilizando PCA e a amostragem aleatória da distribuição lognormal truncada, passou-se para a realização da análise de incerteza. Por meio da análise de convergência dos dados gerados explicada anteriormente, definiu-se que o conjunto de 20.000 amostras seria utilizado para a análise de incerteza. Então, utilizando a interface EMSOpy, a simulação foi realizada para cada um dos 20.000 conjuntos de consumo de insumos, de forma que obteve-se uma distribuição de GWP da cana-de-açúcar referente às diferentes quantidades de insumos e combustíveis utilizadas pelos produtores de cana ao redor do país.

3.5.2. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada por meio do método de Sobol. Esta técnica permite decompor a variância total de uma saída de modelo em componentes atribuíveis a diferentes variáveis de entrada, tanto isoladamente quanto em interação, de forma a quantificar a contribuição de cada variável de entrada à variabilidade da saída de um modelo. O método foi aplicado por meio da biblioteca SALib, em Python (Herman, Usher, 2017).

O método é caracterizado pelo uso de sequências de baixa discrepância, especificamente as sequências de Sobol, para realizar a amostragem dos espaços de entrada. Essas sequências quasi-aleatórias são utilizadas para preencher o espaço de entrada de maneira mais uniforme do que a amostragem puramente aleatória, como no método de Monte Carlo. A baixa discrepância das sequências de Sobol faz com que as amostras estejam

distribuídas de forma sistemática e abrangente, minimizando lacunas e sobreposições, e proporcionando uma cobertura mais eficiente do espaço de entrada (Saltelli et al., 2008).

Inicialmente, duas matrizes de amostragem A e B são geradas, cada uma contendo N amostras das d variáveis de entrada. É possível representar essas matrizes por meio das Equações 3.14 e 3.15.

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & \cdots & A_{Nd} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$B = \begin{pmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N1} & \cdots & B_{Nd} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

A partir dessas matrizes A e B , são geradas matrizes híbridas $A_B^{(i)}$ e $B_A^{(i)}$, onde $A_B^{(i)}$ é formada substituindo-se a i -ésima coluna de A pela i -ésima coluna de B , e $B_A^{(i)}$ faz o inverso, como apresentado nas Equações 3.16 e 3.17.

$$A_B^{(i)} = \begin{pmatrix} B_{1i} & \cdots & A_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{Ni} & \cdots & A_{Nd} \end{pmatrix}, \quad (3.16)$$

$$B_A^{(i)} = \begin{pmatrix} A_{1i} & \cdots & B_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{Ni} & \cdots & B_{Nd} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

O método de Sobol então avalia o modelo $f(X)$ para todas essas combinações, permitindo o cálculo dos índices de sensibilidade. O índice de sensibilidade de primeira ordem (S_i) é calculado como a fração da variância da saída Y , $f(X)$, que é explicada pela variação em uma única variável de entrada X_i , enquanto o índice de sensibilidade total (S_{Ti}) captura o efeito de X_i incluindo todas as suas interações com outras variáveis. Esses índices são dados pelas Equações 3.18 e 3.19, respectivamente.

$$S_i = \frac{Var[E[f(X)|X_i]}{Var[f(X)]} \quad (3.18)$$

$$S_{Ti} = 1 - \frac{Var[E[f(X_{\sim i})|X_i]}{Var[f(X)]} \quad (3.19)$$

onde $X_{\sim i}$ representa todas as variáveis exceto X_i , $Var[f(X)]$ é a variância total da saída e $Var[f(X_{\sim i})]$ é a variância da saída dado um valor fixo para X_i , ou seja, sem variância. E é a esperança matemática, ou seja, o valor esperado (média) da função $f(x)$ dada uma variável x .

A amostragem de Sobol foi realizada a partir das variáveis agrupadas, utilizando a distribuição uniforme e sendo traduzida para uma distribuição lognormal truncada em dois desvios padrão. Ou seja, nessa análise não foi considerada a correlação entre as distribuições. Existem algumas propostas de tratamento da amostragem e do cálculo dos índices de sensibilidade global para casos onde as variáveis independentes são correlacionadas, mas, devido a sua complexidade, esse estudo está fora do escopo do presente trabalho. Os dados amostrados foram utilizados no simulador EMSO, a partir da biblioteca EMSOpy, para calcular o Potencial de Aquecimento Global (GWP) da cana-de-açúcar. O EMSO processou essas combinações de entrada, gerando a variável resposta Y correspondente ao GWP para cada conjunto de entradas. A análise de sensibilidade, a partir dos resultados de Y gerados pelo EMSO, foi realizada utilizando os índices de Sobol calculados, S_i e S_{Ti} . Esses índices permitiram identificar a contribuição relativa de cada variável de entrada para a variabilidade do GWP.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados envolvem o tratamento de dados necessários para as análises subsequentes, possibilitando uma avaliação determinística do potencial de aquecimento global (GWP) da produção de cana-de-açúcar, seguida de uma análise de incerteza deste impacto com base na variação dos parâmetros agrícolas e no consumo de insumos reportados pelas usinas, bem como a análise de sensibilidade dessas variações. Por fim, foi avaliado como uso de biodiesel em substituição ao diesel convencional impacta o GWP da cana-de-açúcar.

4.1. DADOS TRATADOS

A partir das consultas públicas disponibilizadas nos sites das firmas inspetoras credenciadas pela ANP foram coletados dados de produção agrícola de 38 usinas produtoras de etanol. Dessas 38, três foram descartadas por usarem dados agrícolas “padrão”, o que distorceria a análise da variação nos consumos efetivamente realizados pelos produtores de cana. Além disso, apenas 11% das usinas reportaram dados de palha recolhida, e isso acarretou em uma dificuldade na amostragem dos dados posteriormente, por este motivo, foram excluídas 4 usinas da análise, restando apenas as usinas que utilizavam dados agrícolas “primários” e não recolhiam palha.

Dentre as variáveis que são entrada na RenovaCalc, de todas as usinas produtoras coletadas, algumas variáveis não possuíam consumo e foram descartadas, sendo elas: amônia anidra; biometano de terceiros e próprio; eletricidade de fontes PCH, biomassa, eólica e solar. Outras variáveis possuíam dados reportados para a maioria das usinas porém algumas não possuíam consumos, de forma que o desvio padrão dos dados em relação à média era muito grande, o que impossibilitava a amostragem coerente. Por isso, foram utilizados dados determinísticos (média) para estes consumos, sendo excluídos da análise de incerteza e sensibilidade, sendo eles: gasolina C, etanol hidratado e eletricidade da rede.

As variáveis foram agrupadas e relacionadas de forma que facilitassem o entendimento e possibilitassem a amostragem. A Tabela 4.1 apresenta as variáveis após os agrupamentos e relações realizadas.

Tabela 4.1: Variáveis resultantes do tratamento de dados

Variável	Unidade
Produtividade ¹	t cana/ha
Teor de impurezas vegetais (b.u)	kg/t cana
Teor de impurezas minerais	kg/t cana
Fração queimada ²	-
Corretivos	kg N/t cana
Fertilizantes nitrogenados ³	kg N/t cana
Fertilizantes fosfatados ⁴	kg P ₂ O ₅ /t cana
Fertilizantes potássicos ⁵	kg K ₂ O/t cana
Fertilizantes orgânicos	g N/t cana
(Bio)diesel ⁶	MJ/t cana

¹Produtividade = Produção colhida/Área total; ²Fração queimada = Área queimada/Área total; ³Fertilizantes sintéticos nitrogenados traduzidos em consumo de ureia; ⁴Fertilizantes sintéticos fosfatados traduzidos em consumo de SSP; ⁵Fertilizantes sintéticos potássicos traduzidos em KCl; ⁶Consumo de diesel e biodiesel foram agrupados em termos de energia para realização da análise de substituição do fóssil pelo biocombustível

Fonte: Acervo pessoal

Anteriormente ao agrupamento e readequação de dados, havia sido realizada a matriz de correlação entre os dados para analisar se os consumos eram correlacionados. Então, a partir das novas variáveis, foi utilizada a correlação de Person (Equação 3.6) para confirmar as correlações entre os dados agrupados. O Quadro 4.1 apresenta a matriz de correlação para as 10 variáveis apresentadas na Tabela 4.1, denominadas em ordem por X_n para facilitar a visualização do quadro.

Quadro 4.1: Matriz de correlação das variáveis agrupadas

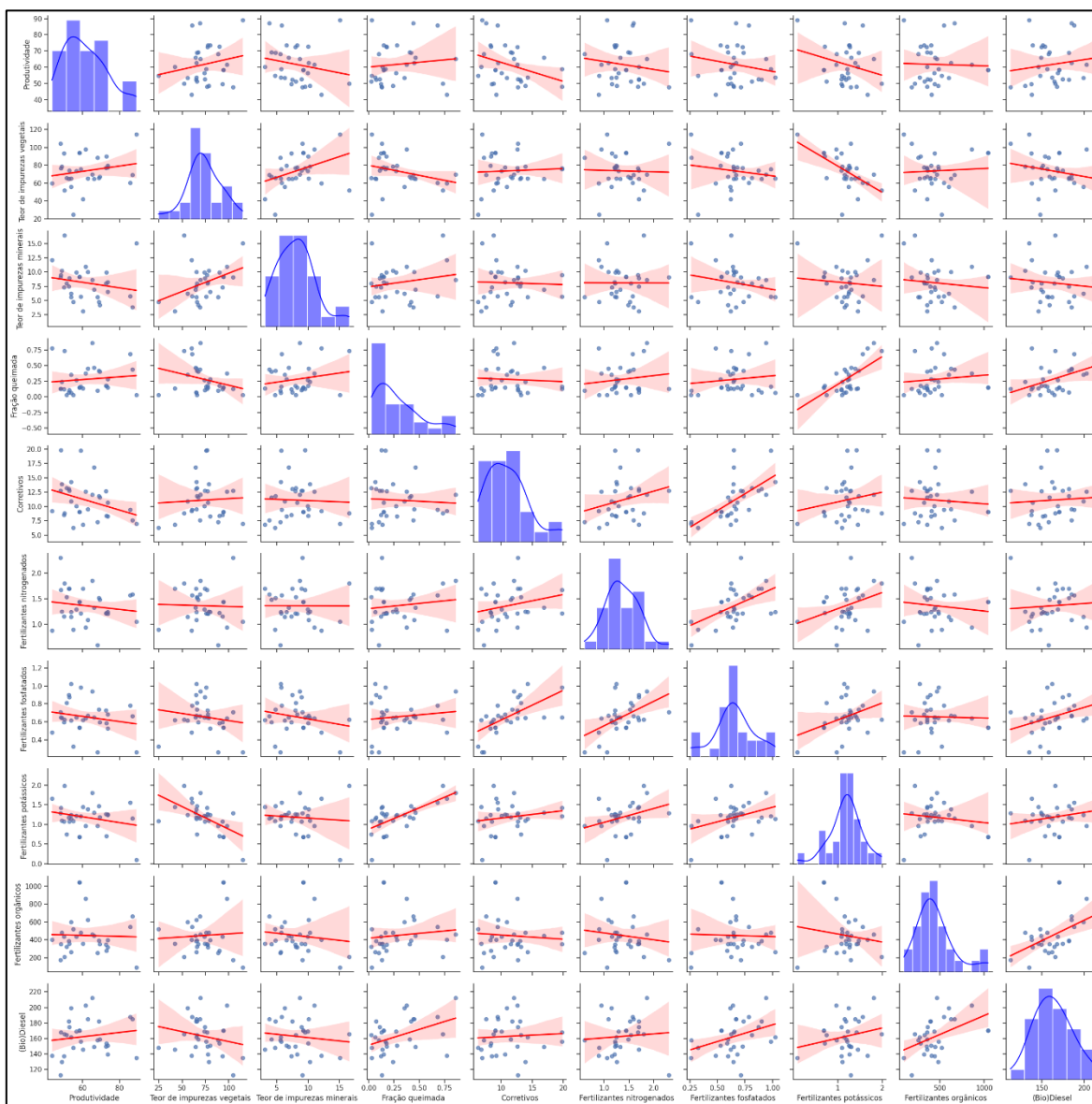
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
X ₁	1,00									
X ₂	0,20	1,00								
X ₃	-0,19	0,39	1,00							
X ₄	0,11	-0,28	0,19	1,00						
X ₅	-0,33	0,05	-0,04	-0,06	1,00					
X ₆	-0,14	-0,03	0,00	0,14	0,25	1,00				
X ₇	-0,19	-0,16	-0,20	0,13	0,62	0,51	1,00			
X ₈	-0,25	-0,58	-0,09	0,69	0,18	0,33	0,37	1,00		
X ₉	-0,03	0,06	-0,11	0,11	-0,07	-0,12	-0,03	-0,15	1,00	
X ₁₀	0,15	-0,21	-0,12	0,41	0,06	0,08	0,35	0,21	0,47	1,00

Fonte: Acervo pessoal

A partir da matriz de correlação, observa-se a existência de variáveis correlacionadas, destacando-se as correlações entre o consumo dos fertilizantes, entre o consumo de corretivos e fertilizantes, entre o teor de impurezas e os fertilizantes potássicos, além da correlação entre o consumo de fertilizantes orgânicos e (bio)diesel. No entanto, considerando o tamanho relativamente pequeno do conjunto de dados analisado (31 amostras), é possível que algumas correlações observadas sejam coincidências estatísticas.

Utilizando a biblioteca *Seaborn* em Python (Waskom, 2021), foi gerada uma matriz de gráficos que apresenta a dispersão dos dados e as correlações entre as variáveis, incluindo a linha de tendência acompanhada de uma área sombreada que indica a dispersão em torno dessa linha. Na diagonal da matriz, foram plotados histogramas com curvas de densidade de probabilidade, geradas por meio da Estimativa de Densidade Kernel (KDE). A Figura 4.1 apresenta essa matriz de gráficos de correlação.

Figura 4.1: Matriz de gráficos de correlação entre as novas variáveis



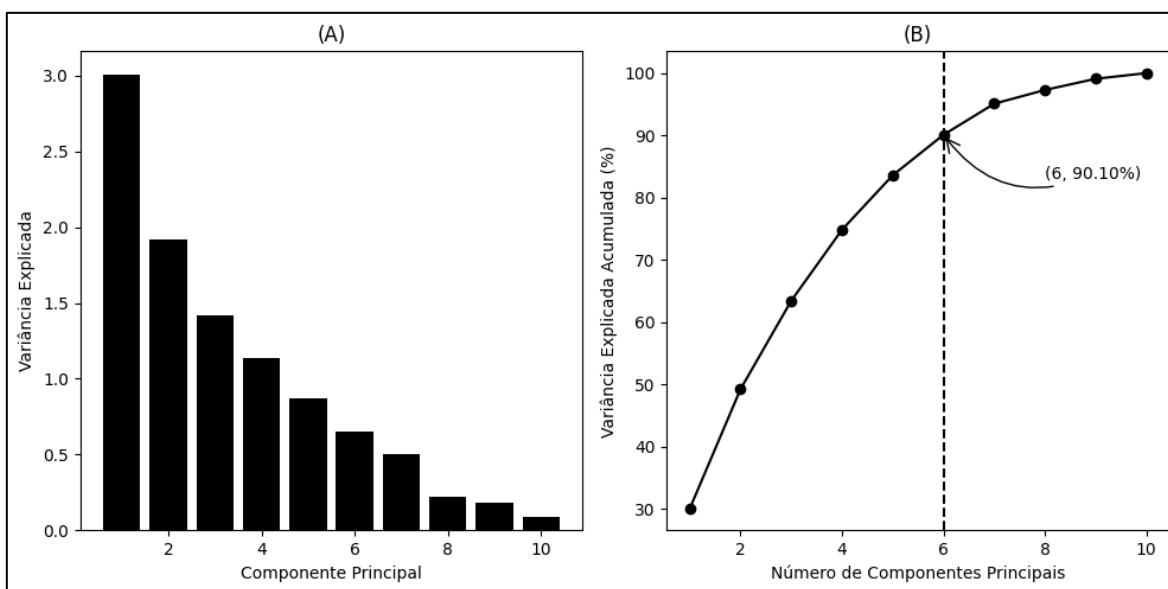
Fonte: Acervo pessoal

A partir dos histogramas e das curvas de distribuição de probabilidade, observa-se que os dados exibem um comportamento similar a distribuições normais e lognormais. No entanto, em algumas variáveis como a fração queimada, fertilizantes orgânicos e (bio)diesel, percebe-se a cauda alongada típica da distribuição lognormal, sugerindo que essa curva pode descrever melhor os comportamentos dos dados. Por meio da biblioteca *Fitter* (Cokelaer et al., 2020), determinou-se que ambas as distribuições descrevem de forma semelhante o comportamento dos dados, porém como a prioridade era evitar a geração de dados negativos durante a amostragem, prosseguiu-se para as análises de incerteza e sensibilidade com o uso da lognormal.

4.1.1. Análise dos componentes principais (PCA)

Após a confirmação das correlações entre as novas variáveis, foi realizada a Análise de Componentes Principais (PCA) para que a amostragem fosse conduzida em um espaço de dados descorrelacionados. Como descrito na Equação 3.11, a PCA baseia-se em autovalores e autovetores, onde os autovalores indicam a variância explicada por cada componente principal. A partir dos autovalores ordenados de forma decrescente, foi gerada a Figura 4.2, que mostra a variância explicada por cada componente principal, bem como a variância acumulada. Além disso, foi incluída uma indicação do número de componentes principais necessários para explicar pelo menos 90% da variância dos dados, uma prática comum na aplicação da PCA para redução de dimensionalidade, embora não tenha sido utilizada neste trabalho.

Figura 4.2: Análise dos componentes principais



A) Variância explicada por componente principal; B) Variância explicada acumulada dos componentes principais

Fonte: Acervo pessoal

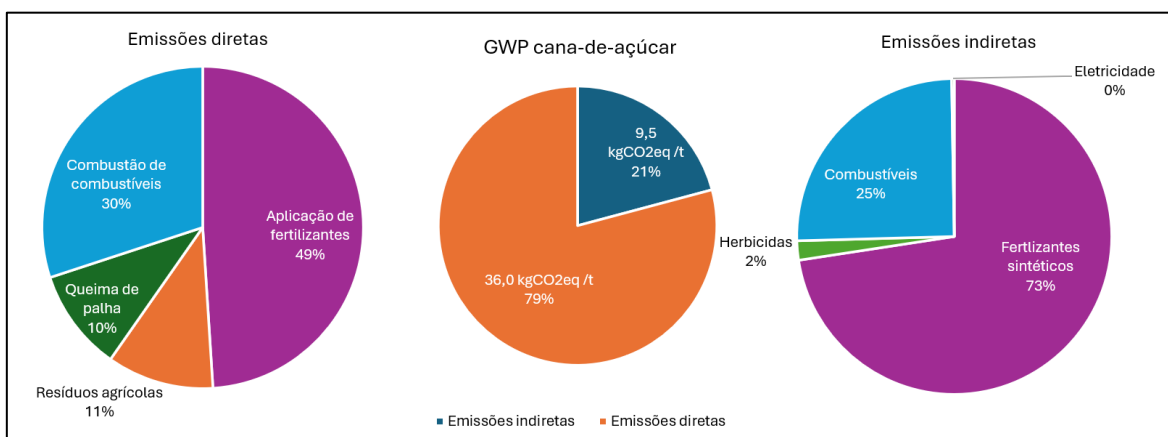
4.2. RESULTADOS DETERMINÍSTICOS

A partir das médias dos dados agrupados coletados das usinas, foi realizada uma análise determinística do impacto ambiental em GWP da produção de cana-de-açúcar, de forma a avaliar quais fontes de emissão são as mais relevantes. Para esta análise, como o consumo de (bio)diesel foi agrupado em MJ/t_{cana} foi considerada uma fração de biodiesel no diesel de 12% (B12) para fazer a tradução, pois os dados das usinas se concentram nos anos de 2019 a 2022, período em que a fração de biodiesel oscilou consideravelmente e aumentou 1% ao ano, de 2019 a 2021, chegando a 13% (ANP, 2022). No entanto, essa fração foi reduzida para 10% (B10) no final de 2021 e permaneceu assim em 2022.

A partir dos valores determinísticos agrupados, determinou-se que o impacto ambiental da produção de cana-de-açúcar é de 45,5 kgCO_{2eq}/t_{cana}, considerando as etapas de preparo do solo, plantio, tratos culturais, colheita e transporte até as usinas produtoras de etanol. A título de comparação, calculou-se o GWP da cana utilizando os dados agrícolas padrão da ferramenta RenovaCalc, que utiliza valores médios nacionais penalizados, e o impacto ambiental é de 65,14 kgCO_{2eq}/t_{cana}, sendo 43,2% maior que os dados primários coletados neste trabalho.

O impacto ambiental pode ser decomposto em diferentes fontes de emissão ao longo do processo. A Figura 4.3 ilustra a contribuição de cada uma dessas fontes para o impacto ambiental total, divididas em emissões diretas e indiretas.

Figura 4.3: Impacto ambiental, medido em GWP, das diferentes fontes de emissão usando variáveis agrupadas

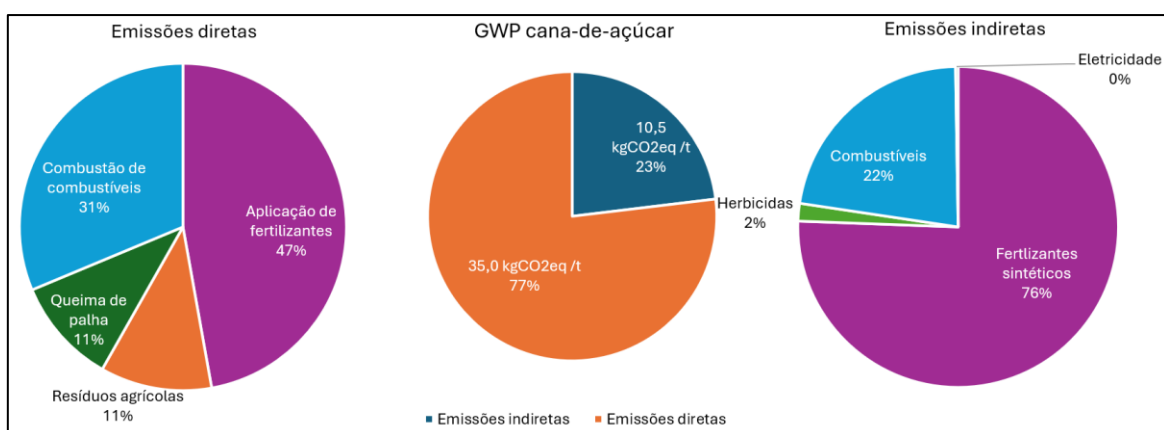


Fonte: Acervo pessoal

Observa-se que as emissões diretas, representando 79% do GWP total (36,0 kgCO_{2eq}/t), são majoritariamente atribuídas à aplicação de fertilizantes (49%), seguida pela combustão de combustíveis (30%), queima de palha (10%) e resíduos agrícolas (11%). As emissões indiretas, correspondendo a 21% do GWP total (9,5 kgCO_{2eq}/t), são majoritariamente associadas aos fertilizantes sintéticos (73%), com contribuições menores dos combustíveis (25%) e herbicidas (2%), sendo a eletricidade praticamente irrelevante quando comparado ao todo (~0%). Esses resultados evidenciam a contribuição predominante dos fertilizantes nas emissões, tanto diretas quanto indiretas, como os principais responsáveis pelo impacto ambiental da produção de cana-de-açúcar.

Como a análise foi realizada utilizando variáveis agrupadas, foi gerado um gráfico no mesmo formato do apresentado na Figura 4.3, mas considerando os dados desagrupados, conforme foram reportados pelas usinas produtoras. No entanto, para variáveis relacionadas entre si, como o consumo e as concentrações de nitrogênio na vinhaça; torta de filtro e cinzas; produção colhida, área queimada e área plantada, essas relações foram estabelecidas antes de se calcular a média. A Figura 4.4 apresenta a distribuição das emissões considerando a média dos dados reportados pelas usinas sem agrupamento.

Figura 4.4: Impacto ambiental, medido em GWP, das diferentes fontes de emissão usando variáveis não agrupadas



Fonte: Acervo Pessoal

A partir da comparação da Figura 4.4 com a Figura 4.3 percebe-se que o GWP total da cana-de-açúcar se preservou após o agrupamento das variáveis. No entanto, observa-se uma diferença na distribuição entre emissões diretas e indiretas. O modelo agrupado apresenta um aumento de 2,86% nas emissões diretas em relação as variáveis desagrupadas, enquanto

as emissões indiretas são menores. Além disso, percebe-se que as emissões decorrente da aplicação de fertilizantes foi levemente superestimada.

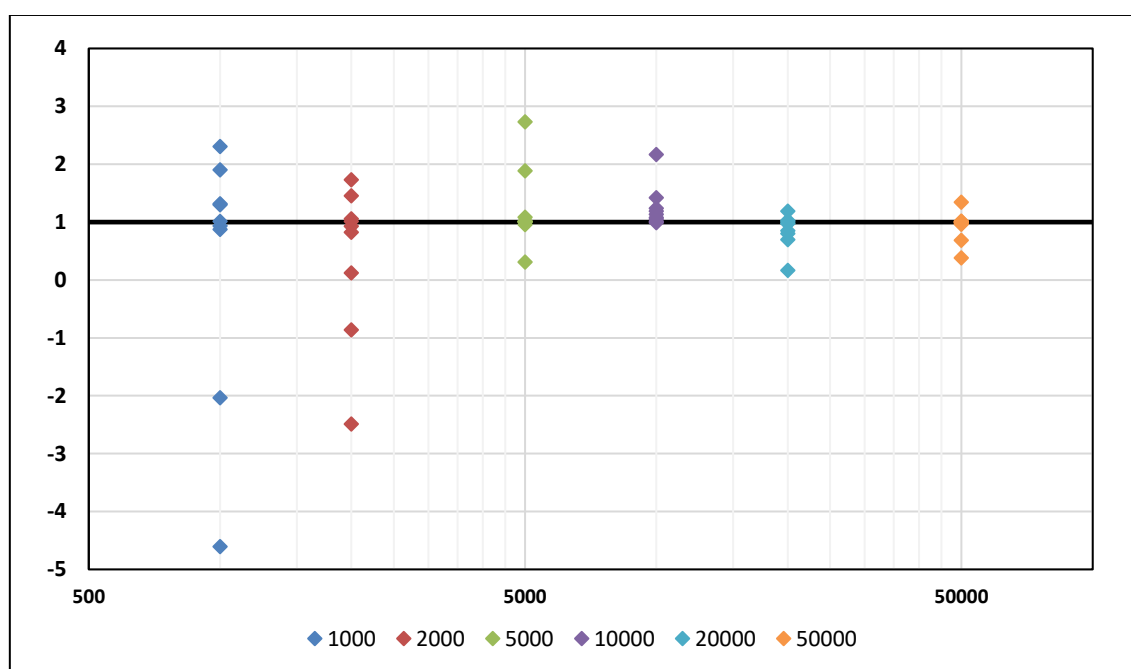
Esse aumento nas emissões diretas pode ser explicado pelo agrupamento dos fertilizantes sintéticos nitrogenados, que foi realizado em termos de ureia. A ureia, ao ser aplicada, gera emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), o que faz com que o modelo agrupado superestime essas emissões. Ao analisar os dados desagrupados das usinas, a emissão de GEEs pela aplicação de ureia é de 1,17 kgCO_{2eq}/t_{cana}; já no modelo agrupado, esse valor sobe para 2,28 kgCO_{2eq}/t_{cana}, resultando em uma superestimação de aproximadamente 81,2%. Apesar desse aumento nas emissões diretas, o modelo agrupado compensa essa variação por meio de uma redução nas emissões indiretas. Isso ocorre porque o agrupamento considera o impacto ambiental total (emissões diretas e indiretas) de cada insumo.

No caso dos corretivos, a tradução em calcário dolomítico, que emite GEEs na aplicação, em contraste com o gesso, que não gera emissões, também contribuiu para um pequeno aumento nas emissões diretas, de apenas 0,3%. Ou seja, o agrupamento das variáveis resultou em uma superestimação das emissões diretas, principalmente relacionadas à aplicação de fertilizantes. No entanto, essa superestimação foi compensada pela redução das emissões indiretas, o que manteve o GWP total da produção de cana-de-açúcar praticamente inalterado. Isso demonstra que o modelo agrupado é adequado para avaliar o impacto ambiental total, embora possa não refletir com precisão as diferentes fontes de emissão.

4.3. ANÁLISE DE INCERTEZAS

Em posse dos autovalores e autovetores, foi realizada a amostragem aleatória dos dados a partir da distribuição normal truncada em 3σ utilizando os autovalores como variância. Então, foram gerados conjuntos com quantidades diferentes de dados. A análise da estabilização das quantidade de amostras foi realizada por meio da Figura 4.3, que apresenta a razão entre as correlações obtidas para diferentes quantidades de amostras em comparação com 100.000 iterações, demonstrando a aproximação dos dados.

Figura 4.5: Razão entre correlações para diferentes quantidades de amostras



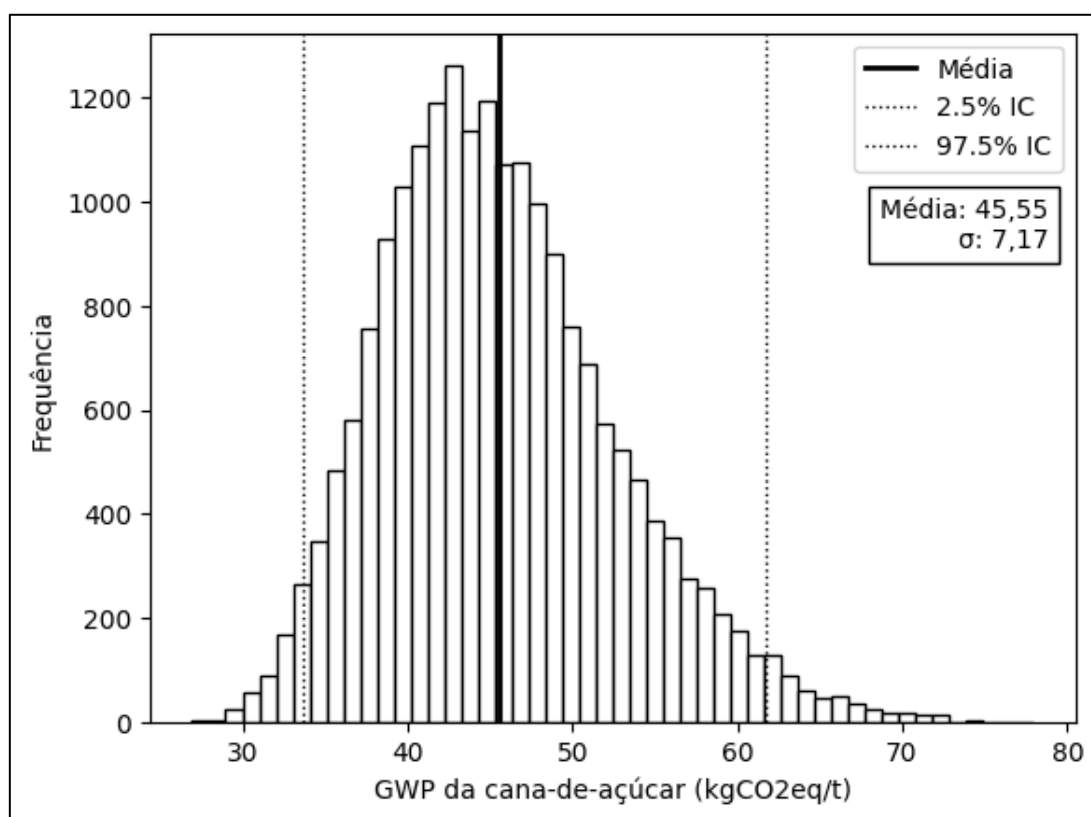
Fonte: Acervo pessoal

É possível observar que a partir de 20.000 iterações as correlações já estão muito próximas das obtidas com 100.000 iterações, enquanto abaixo desse valor ainda há um desvio considerável. Embora em 10.000 iterações a estabilização esteja relativamente próxima, para garantir maior segurança na análise de incerteza, foram determinadas 20.000 amostras como base para a realização da análise.

A única variável que apresenta um limite físico é a fração queimada, que não pode exceder o valor de 1, já que a área queimada está limitada à área plantada. Em cerca de 4% dos dados amostrados, esse limite foi ultrapassado, e nesses casos, o valor foi ajustado para 1.

Em posse dos 20.000 conjuntos de variáveis, utilizando-se a interface EMSOpy, calculou-se o potencial de aquecimento global (GWP) da cana-de-açúcar para cada um desses conjuntos, gerando assim uma distribuição do impacto ambiental da cana em função das incertezas nos parâmetros agrícolas, consumos de insumos e de (bio)diesel. O GWP resultante da análise de incertezas é de $45,55 \pm 7,17$ kgCO_{2eq}/t_{cana}. A distribuição está representada na Figura 4.6.

Figura 4.6: Histograma do GWP da cana-de-açúcar a partir dos dados amostrados

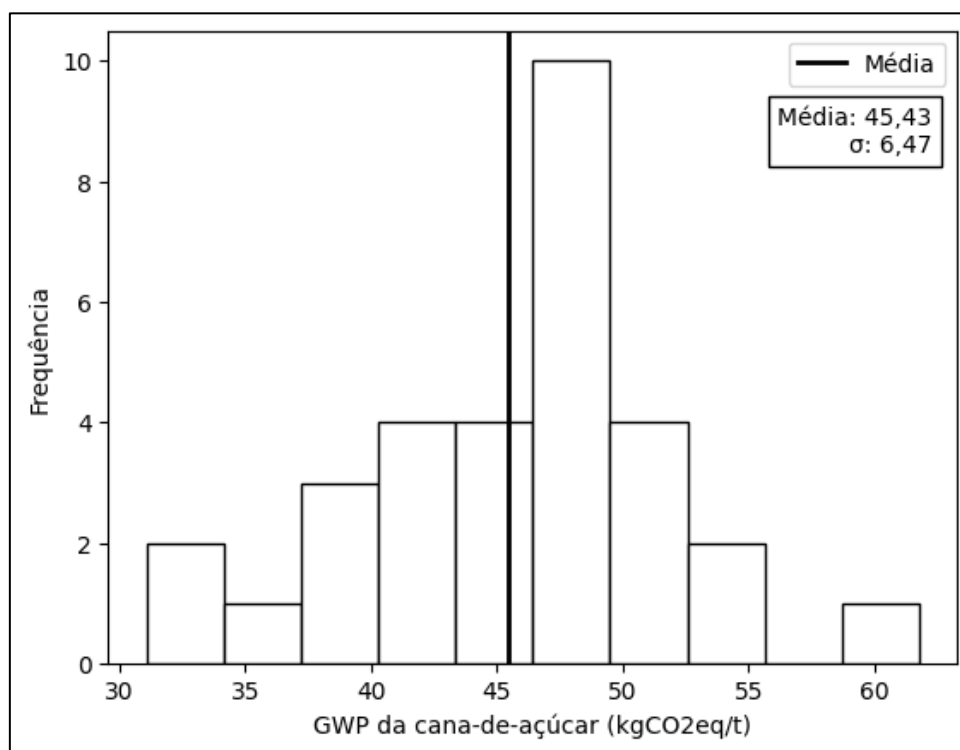


Fonte: Acervo pessoal

A distribuição dos dados é assimétrica à direita, representando que a maioria das simulações resultou em valores de GWP concentrados em torno de um intervalo central, com cauda estendida para valores mais altos. O intervalo de confiança de 95% abrange aproximadamente de 34 a 61 kgCO_{2eq}/t, refletindo a variabilidade nas práticas agrícolas. Essa variação é atribuída aos diferentes parâmetros agrícolas, quantidades de insumos e combustíveis utilizados pelos diferentes produtores, impactando diretamente o GWP da cana-de-açúcar em cada cenário.

Visando a comparação da distribuição gerada a partir da amostragem, foi calculado o GWP a partir dos dados agrupados reais das usinas. Dessa forma, gerou-se o histograma apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7: Histograma do GWP da cana-de-açúcar a partir dos dados reais das usinas



Fonte: Acervo pessoal

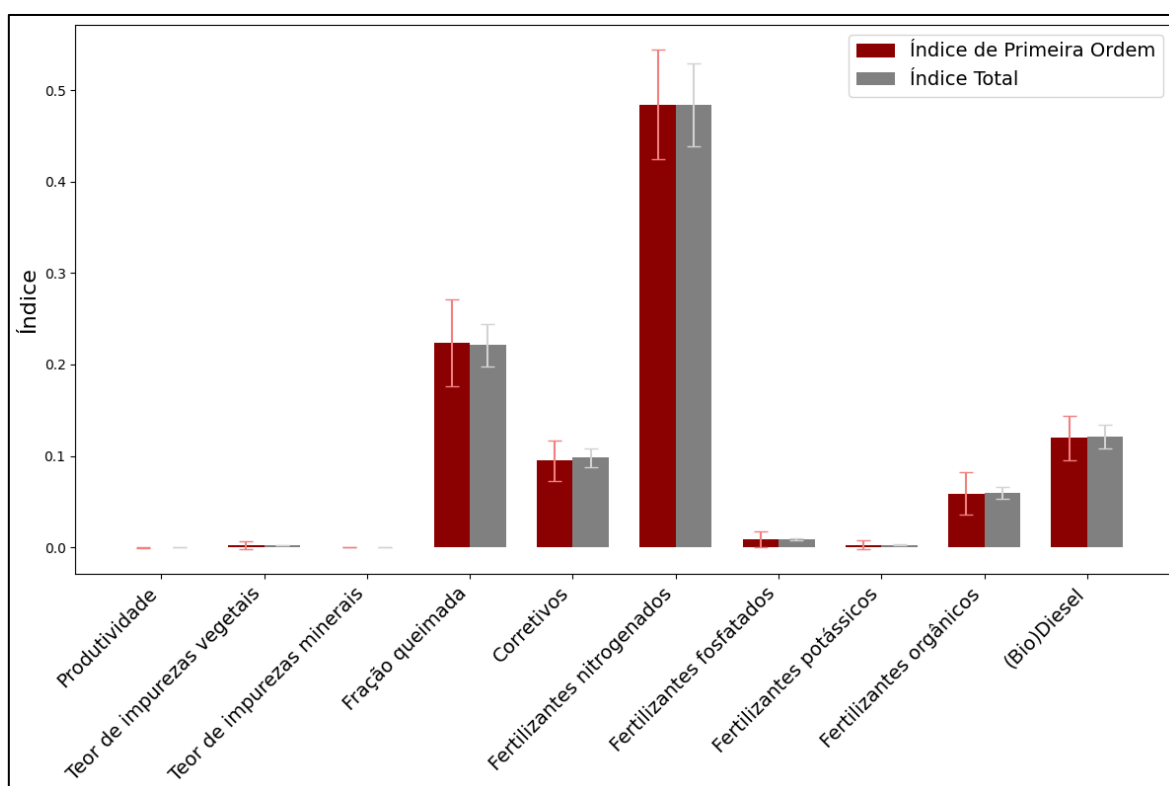
A distribuição dos dados reportados pelas usinas é caracterizada por um conjunto de dados relativamente limitado, com uma frequência de valores mais baixa e uma maior variabilidade observada. A preservação da média entre as duas distribuições (45,55 e 45,43 kgCO_{2eq}/t, respectivamente) demonstra a consistência do modelo. Além disso, o uso de uma amostragem mais robusta, com um conjunto de dados ampliado, permitiu um refinamento das incertezas capturadas no modelo. Esse refinamento é refletido pelo aumento do desvio padrão e pela cauda mais alongada à direita em relação à média, o que demonstra uma maior capacidade de captar as variações extremas no impacto ambiental da produção de cana-de-açúcar.

4.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A partir do método de amostragem de Sobol, foram geradas $N = 1024$ amostras das $d = 10$ variáveis, distribuídas em 12.228 ($N \cdot (d + 2)$) conjuntos de pontos, considerando as matrizes de amostragem e as matrizes híbridas. Então, estes conjuntos de pontos foram utilizados no simulador EMSO para o cálculo do potencial de aquecimento global (GWP) da cana-de-açúcar, gerando assim a matriz de resposta (Y).

A partir da amostragem em relação a matriz de resposta foram gerados os índices decorrelacionados de Sobol de primeira ordem e totais para cada uma das variáveis, permitindo quantificar a contribuição relativa de cada variável na variabilidade do GWP da cana-de-açúcar, assim como as interações entre as variáveis. Os índices de primeira ordem e totais estão apresentados de forma gráfica na Figura 4.8.

Figura 4.8: Índices de Sobol calculados



Fonte: Acervo pessoal

A análise de sensibilidade global revela que os fertilizantes sintéticos nitrogenados possuem um índice de primeira ordem próximo de 0,5, indicando que essa variável sozinha explica parte significativa da variação no Potencial de Aquecimento Global (GWP) da cana-

de-açúcar. Esse valor elevado sugere que mudanças no consumo desses fertilizantes têm um impacto direto e substancial nas emissões totais, destacando-os como o fator mais influente na análise. O índice total, que é muito próximo do índice de primeira ordem, indica que, além do impacto direto, as interações entre os fertilizantes nitrogenados e outras variáveis são mínimas, reforçando a importância crítica do controle dessa variável. A fração queimada se demonstra como a segunda maior fonte de variação no GWP da cana-de-açúcar, com um índice de primeira ordem próximo de 0,2, ressaltando que a variação entre as usinas na prática de queima de palha para a colheita tem uma influência relevante nas emissões do plantio de cana.

Além disso, o consumo de corretivos e (bio)diesel apresentam índices de Sobol menores porém relevantes, tanto na primeira ordem quanto no total. Isso significa que, embora essas variáveis contribuam para a variação no GWP, sua influência é relativamente menor. Novamente, a pequena diferença entre os índices de primeira ordem e total para essas variáveis sugere que suas contribuições são principalmente diretas, com interações limitadas com outras variáveis do modelo. A proximidade entre os valores dos índices, estando dentro do erro da análise, indica que não se pode rejeitar a hipótese de que o modelo em questão é puramente aditivo, ou seja, não inclui relações entre as variáveis independentes.

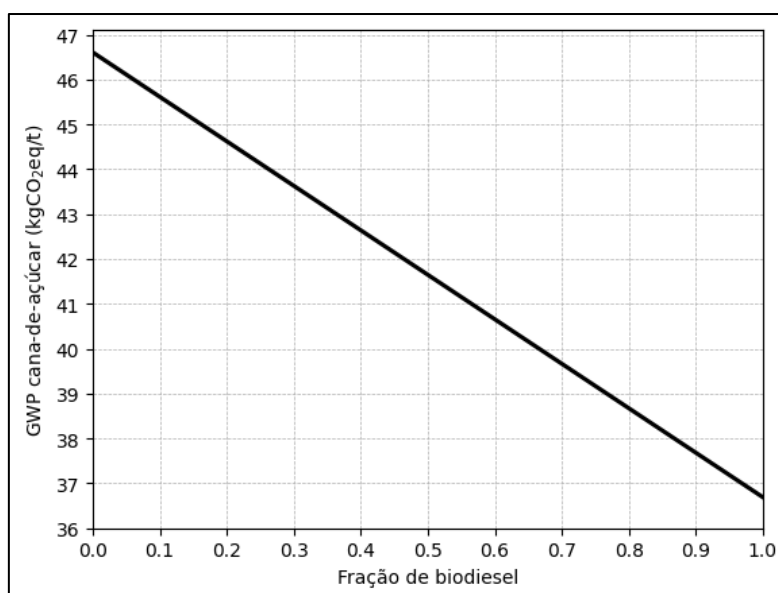
Variáveis como produtividade e teor de impurezas vegetais e minerais exibem índices de Sobol praticamente insignificantes, indicando que têm uma influência desprezível na variância do GWP. Dessa forma, seria possível, por exemplo, fixar essas variáveis em seus valores médios sem prejuízo às análises posteriores.

4.5. USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

A partir do modelo desenvolvido, com variáveis agrupadas, foi avaliado o possível impacto positivo causado pelo aumento da fração de biodiesel no diesel, tanto nas atividades agrícolas quanto no transporte da cana-de-açúcar. Utilizando a capacidade calorífica e a densidade dos combustíveis B0 (diesel) e B100 (biodiesel), foi calculado o impacto ambiental da cana-de-açúcar, em $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{t}_{\text{cana}}$, em função da fração de biodiesel utilizada.

O GWP da cana-de-açúcar apresenta uma dependência linear em relação a fração de biodiesel, como apresentado na Figura 4.9. Considerando a substituição completa do diesel convencional por biodiesel, o GWP diminui cerca de 46,54 para 36,60 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{t}$, representando uma redução de aproximadamente 21,4% no impacto ambiental da produção de cana. A mistura de biodiesel em março de 2024 é de 14% (B14) o que implica em um GWP de 45,24 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{t}$ (MME, 2024).

Figura 4.9: GWP da cana-de-açúcar em função da fração de biodiesel utilizada



Fonte: Acervo pessoal

Entretanto, implementar frações elevadas de biodiesel, como as representadas nas extremidades do gráfico, apresenta desafios práticos. O biodiesel, embora menos poluente, pode ser mais caro de produzir e possui desafios de compatibilidade com motores atuais (Nguyen et al., 2023). Considerando esses desafios, uma fração de biodiesel entre 20% e 50% pode ser uma meta mais viável, proporcionando uma redução de cerca de 4% a 10% nas emissões de CO_2eq associadas a produção de cana-de-açúcar.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. CONCLUSÕES

A partir de dados reportados por usinas brasileiras no contexto do RenovaBio, estimou-se as emissões médias da produção de cana-de-açúcar associada às etapas de plantio, colheita e transporte da cana em $45,55 \pm 7,17$ kgCO_{2eq}/t_{cana}. Tal dado apresenta uma grande variabilidade, a qual foi analisada por meio do método de Monte Carlo. Dentre as diferentes fontes de emissão do processo, o consumo de fertilizantes se mostrou como a principal fonte de emissão, representando cerca de 49% das emissões diretas e 73% das emissões indiretas. Em segundo lugar se coloca o uso de combustíveis, diesel e biodiesel, representando cerca de 30% das emissões diretas e 25% das emissões indiretas.

Utilizando o método de Sobol de análise de sensibilidade global, determinou-se que o consumo de fertilizantes sintéticos nitrogenados é a principal fonte de variabilidade no impacto ambiental da cana-de-açúcar, destacando a necessidade de um controle mais rigoroso sobre essa variável para mitigar as emissões associadas a produção de cana. Neste contexto de redução de emissões, foi avaliada a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, como o biodiesel, o qual se mostrou uma estratégia eficaz para a redução do GWP, com potencial para uma redução de aproximadamente 21% nas emissões totais, caso o diesel fóssil seja completamente substituído.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Desenvolvimento de novas estratégias de amostragem: Sugere-se a exploração de outras técnicas de amostragem que possibilitem a manutenção das variáveis originais do RenovaCalc, evitando o agrupamento de dados, aumentando a precisão e a representatividade dos resultados obtidos.
2. Ampliação da base de dados: A coleta de informações adicionais de usinas pode fortalecer a geração de uma distribuição de GWP mais robusta e também evitar a necessidade de agrupamento de variáveis.
3. Integração com a produção de etanol: Expandir a análise de ciclo de vida para incluir o processo industrial de produção de etanol, permitindo uma avaliação mais completa do impacto do biocombustível. Essa integração trará informações sobre como as variáveis agrícolas influenciam o produto final.
4. Análise de incerteza e sensibilidade dos fatores de emissão: Uma abordagem adicional de análise de incerteza e sensibilidade pode ser implementada para determinar como as incertezas nos fatores de emissão dos insumos influenciam no potencial de aquecimento global da cana-de-açúcar. Isso permitirá identificar quais variáveis são mais críticas para assegurar que o GWP associado seja mais robusto e precisamente determinado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida**. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **RenovaBio — Política Nacional de Biocombustíveis**. ANP, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 11 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **Mistura de biodiesel passa a ser de 13% a partir de hoje**. ANP, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3. Acesso em 23 ago. 2024.

ALMEIDA JÚNIOR, A. B. et al. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1004-1013, 2011.

AUDE, M. I. S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 241-248, 1993.

BARROS, F. F.; MILAN, M. **Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar**. Bragantia, Campinas v. 69, n. 1, p. 221-229, 2010.

BASSO, L. C., DE AMORIM, H. V., DE OLIVEIRA, A. J., & LOPES, M. L. Yeast selection for fuel ethanol production in Brazil. **FEMS Yeast Research**, 8(7), 1155-1163, 2008

BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. **Alcoolbrás**, São Paulo, n. 106, p. 72-80, 10 out. 2006.

BEVEN, K. **Environmental Modelling: An Uncertain Future?**. CRC Press, 2009.

CANTARELLA H.; ROSSETO, R. *Fertilizers for sugarcane*, p.405-422. In Luis Augusto Barbosa Cortez (Coord.). *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*, São Paulo: Editora **Edgard Blücher**, 2014.

CARDOSO, M. et al. **RenovaBio**, uma análise sobre o programa e sua influência no desenvolvimento do mercado de biometano. **Revista Brasileira de Energia**, 26(3), 47-58, 2020.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 157, 1991.

CAVALETT, O. et al. The Agricultural Production Model. In: BONOMI, A. et al. (Eds.). **Virtual Biorefinery: Green Energy and Technology**. Springer, p. 13-42, 2016.

CAVALETT, O., CHAGAS, M.F., SEABRA, J.E.A., BONOMI, A. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment** 18 (3), 647–658, 2013.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A. et al. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 62-89, 2011.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H.. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 437-451, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar, Safra 2022/23. **Boletim de Safra**, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 11 ago. 2024.

COKELAER, T.; BRIAN, T.; STRINGARI, C. E.; BRODA, E.; PRUESSE, E. **cokelaer/fitter: v1.2.3 synchronised on PyPI**. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3995055>. Acesso em: 17 ago. 2024.

CORRELATION COEFFICIENT. In: DODGE, Yadolah (Ed.). **The Concise Encyclopedia of Statistics**. New York, NY: Springer, 2008

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. **Current Opinion in Chemical Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 273–277, 2013.

DA SILVA, J. P. N.; DA SILVA, M. R. N. **Noções da Cultura da Cana-de-Açúcar**. 1ª ed. Inhumas – GO: IFG, 2012.

DIAS, M. O. S. et al. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35-51, 2015

DUARTE, R. G. A; FURLAN, F. F; ELIAS, A. M; **Quanta flexibilidade é suficiente? Efeito do mix de produção no desempenho econômico de usinas de açúcar e etanol**. In: Jornada de jovens pesquisadores da AUGM, XXX, Assunção, Paraguai 2023. Disponível em: http://grupomontevideo.org/jji/2023/EjeInterdisciplinario/2Produccionsostenibleycalidaddevida/Geraldini_de_Almeida_Duarte_Ricardo_362/Geraldini_de_Almeida_Duarte_Ricardo_362.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024

ELIAS, A. M. **Contribuições da engenharia de sistemas em bioprocessos à transição para a economia neutra em carbono: Análise Tecno-Econômica-Ambiental de biorrefinarias**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

ESPAÑA-GAMBOA, E. et al. Vinasses: characterization and treatments. **Waste Management & Research**, v. 29, n. 12, p. 1235-1250, 2011.

FURLAN, F. F. **Desenvolvimento de Ambiente integrado para simulação e otimização estática da produção de etanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar por rota bioquímica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). UFSCar, São Carlos, 2012.

GOLDEMBERG, J; COELHO, S. T.; NASTARI, P. M.; LUCON, O. Ethanol learning curve—the Brazilian experience. **Biomass and Bioenergy**, 26(3), 301-304, 2004.

GROEN, E. A.; HEIJUNGS, R.; BOKKERS, E. A. M.; DE BOER, I. J. M. Methods for uncertainty propagation in life cycle assessment. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 316-325, 2014.

GUINÉE, J. B., et al. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **Environmental Science & Technology**, 45(1), 90-96, 2011.

HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; VAN DER WALT, S. J. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, p. 357-362, 2020.

HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M. A. J. A review of approaches to treat uncertainty in LCA. **International Congress on Environmental Modelling and Software**, Osnabrück, Alemanha, 2004.

HELTON, J. C. Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, 57 (1-4), 3-76, 1997.

HELTON, J. C.; DAVIS, F. J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. **Reliability Engineering & System Safety**, 81(1), 23-69, 2003.

HERMAN, J.; USHER, W. SALib: An open-source Python library for sensitivity analysis. **Journal of Open Source Software**, v. 2, n. 9, 2017.

HORII, J.; BLUMER, S. A. G.; RIBEIRO, C. A. F. **Fundamentos de tecnologia sucroalcooleira**. [S.l: s.n.], 1999.

HUIJBREGTS, M. A. J. Application of uncertainty and variability in LCA: Part I: A general framework for the analysis of uncertainty and variability in life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 5, p. 273-280, 1998.

ISO. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. **International Organization for Standardization**, 2006.

ISO. ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. **International Organization for Standardization**, 2006.

JESUS, C. D. F. **Validação da simulação dinâmica das etapas de evaporação e cristalização da produção de açúcar com dados obtidos em plantas industriais**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis** (2nd ed.). Springer-Verlag, 2002.

JUNIOR, M. M. **Três diferentes abordagens de modelagem e simulação do processo de cristalização na produção de açúcar no simulador EMSO**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

LANDELL, M. G. A. et al. Sistema de Multiplicação de cana-de-açúcar-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. Campinas: **Instituto Agrônômico**, 16 p. 2013

LANDELL, M. G. A. et al. Variedades de cana-de-açúcar para o Centro-Sul do Brasil :15a liberação do programa cana IAC. Campinas, 197p. (**Série Tecnologia APTA, Boletim técnico IAC**, 197), 2005.

LLOYD, S. M.; RIES, R. Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: A survey of quantitative approaches. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 161-179, 2007.

LONGATI, A. A. **Implementação de unidade de processo para geração de energia empregando vinhaça e integração na biorrefinaria de produção de etanol**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008

MALAVOLTA, E.; GOMES, F. P.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, p.66-67, 2002.

MARIN, F. R. et al. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, v. 117, n. 1-2, p. 227-239, 2013.

MATSUURA, M. et al. A RENOVACALC APLICADA AO BIOCOMBUSTÍVEL ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR. **VI Congresso Brasileiro Sobre Gestão do Ciclo de Vida, GCV2018**. Brasília: IBICT e ABCV, 2018a.

MATSUURA, M. et al. RENOVACALC: A CALCULADORA DO PROGRAMA RENOVABIO. **VI Congresso Brasileiro Sobre Gestão do Ciclo de Vida, GCV2018**. Brasília: IBICT e ABCV, 2018b.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo Method. **Journal of the American Statistical Association**, 44(247), 335-341, 1949.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). “Mistura de 14% de biodiesel no diesel começa a valer nesta sexta-feira.” **MME**, 2024Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mistura-de-14-de-biodiesel-no-diesel-comeca-a-valer-nesta-sexta-feira>. Publicado em: 29 fev. 2024. Acesso em: 20 ago. 2024.

MORGAN, M. G.; HENRION, M. **Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis**. Cambridge University Press, 1990.

NELLES, O. **Nonlinear Systems Identification with Local Linear Neuro-Fuzzy Models**, Springer-Verlag, Nova Iorque, 2001.

NGUYEN, V. G. et al. A comprehensive review on the use of biodiesel for diesel engines. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 12, n. 4, p. 720-740, 2023.

NUTRIÇÃO DE SAFRAS. **Desenvolvimento radicular**, 2024. Disponível em: <https://nutricaodesafras.com.br/desenvolvimento-radicular>. Acesso em: 11 ago. 2024.

OLIVEIRA, M. E. D.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL, E. J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **BioScience**, 55(7), 593-602, 2005.

PEREIRA, G. et al. **O Planeta, o Brasil e o RenovaBio**. 2018. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opiniao_-_renovabio.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Calagem e adubação para culturas anuais e perenes. In: RAIJ, B. van et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. p. 11-37.

REZENDE, R. S.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; Manejo de cana: Irrigação. **EMBRAPA**, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/irrigacao>. Acesso em: 11 ago. 2024.

ROCHA, M. H. et al., Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: a meta-analysis. **Renewable Sustainable Energy Reviews**. 37, 435–459, 2014.

RONQUIM FILHO, A.; ARAUJO, G. J. F.; CEZARINO, L. O. RenovaBio: conceito, objetivos, e importância desta política pública para a indústria sucroenergética. **Revista Direito UFMS**, Campo Grande, MS, v. 8, p. 120 – 145, 2022.

ROSSETTO, R. Planejamento da colheita: Colheita. **EMBRAPA**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/planejamento-da-colheita/colheita>. Acesso em: 11 ago. 2024

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Plantio. **EMBRAPA**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/plantio>. Acesso em: 11 ago. 2024

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. **Simulation and the Monte Carlo Method** (3rd ed.). John Wiley & Sons, 2016.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; Ratto, M. **Global sensitivity analysis: The primer**. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATIO, M. **Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models**. John Wiley & Sons, 2004.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Correção e adubação: Preparo do solo. **EMBRAPA**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/preparo-do-solo>. Acesso em: 11 ago. 2024.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Manejo: Rotação e reforma. **EMBRAPA**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/rotacao-e-reforma>. Acesso em: 11 ago. 2024.

SANTOS, J. R.; ABREU, N. R.; BALDANZA, R. F. O Impacto do Marketing Verde nas Indústrias Sucroalcooleiras de Alagoas. **Revista Econômica do Nordeste**, v.40, n.2, 2009.

SAUR, K. **Life Cycle Impact Assessment**. Dordrecht: Springer Netherlands v.2, 2015.

SCACHETTI, M. T. **Avaliação consequencial do ciclo de vida: discussão e aplicação comparativa com a abordagem atribucional**, 2016. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F.. Estimativa da maturação e otimização na cana-de-açúcar. **NotasIQ**, v. 13, n. 8, p. 8, 2004.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production. **Energy Policy**, 39(7), 421-430, 2011.

SEABRA, J.E.A et al. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**. 5, 519–532, 2011.

SILVA, J. E. A. R. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SILVA, J. H. B. et al. Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 2, p. 1-8, 2023.

SILVA, G. S. et al. Manejo de plantas daninhas no sistema de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 17, n. 1, p. 86-94, 2018.

SIN, G. et al. Global sensitivity analysis in wastewater treatment plant model applications: prioritizing sources of uncertainty. **Water Research**, v. 45, n. 2, p. 639-651, 2011.

SOUZA, H. A.; MARCELO, A. V.; CENTURION, J. F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 658-663, 2012.

SOUZA, F. M. **Análise da viabilidade técnica e econômica da integração do processo de recuperação de etanol por arraste (stripping) com CO₂ na indústria sucoenergética**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

STRUNGE, T.; RENFORTH, P.; VAN DER SPEK, M. Uncertainty quantification in the techno-economic analysis of emission reduction technologies: a tutorial case study on CO₂ mineralization. **Frontiers in Energy Research**, v. 11, 2023.

TEIXEIRA, E. B. Plantio de Cana-de-Açúcar. Apresentação de slides. **Grupo Unialco - Alcoolvale Açúcar e Álcool S/A**, Janeiro 2016.

TENNØE, S.; HALNES, G.; EINEVOLL, G. T. Uncertainpy: A Python Toolbox for Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis in Computational Neuroscience. **Frontiers in Neuroinformatics**, v. 12, 2018.

TINOCO, T. J.; SILVA, P. L.; ROCHA, A. P. S. Manejo integrado de pragas e doenças em sistemas agrícolas. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 11, p. 22675-22697, 2023.

TORQUATO, S. A. Mecanização da colheita da cana-de-açúcar: benefícios ambientais e impactos na mudança do emprego no campo em São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 29, p. 49-61, 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). RenovaCalc: Ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida e Certificação de Biocombustíveis. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar**, 2020. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/etanol/>. Acesso em: 11 ago. 2024.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). Mercado de Etanol. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar**, 2023. Disponível em: <https://www.unica.com.br>. Acesso em: 11 ago. 2024.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA (UDOP). Vinhaça e cinzas viram fertilizante em canaviais. **UDOP**, 2022. Disponível em: <https://udop.com.br/noticia/2022/4/11/vinhaca-e-cinzas-viram-fertilizante-em-canaviais.html>. Acesso em: 11 ago. 2024.

VIAN, C. E. F.; MARIN, F. R. Pós-produção: Logística e transporte. **EMBRAPA**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/logistica-e-transporte>. Acesso em: 11 ago. 2024.

VEROTTI, A. Do etanol ao açúcar. **União Nacional da Bioenergia (UDOP)**, Araçatuba, 08/08/2020. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2020/06/09/do-etanol-ao-acucar.html>. Acesso em: 13 mai. 2021.

Waskom, M. L. Seaborn: statistical data visualization. **Journal of Open Source Software**, 6(60), 3021, 2021;

WRI. Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. **World Resources Institute**, 2015. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>. Acesso em: 11 ago. 2024.

WERNET, G., et al. "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology." **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 21(9): 1218-1230, 2016.

ZHAO, X. Q.; BAI, F. W. Mechanisms of yeast stress tolerance and its manipulation for efficient fuel ethanol production. **Journal of Biotechnology**, 144(1), 23-30, 2009.

ANEXO A

Tabela A.1: Emissões do ciclo de vida dos insumos

Emissões do ciclo de vida (gCO _{2eq} /unidade)			
Insumo/combustível	[Un.]	Emissões	Referência
Calcário calcítico	kg	36,8	Ecoinvent V.3.1
Calcário dolomítico	kg	36,8	Ecoinvent V.3.1
Gesso	kg	2,8	Ecoinvent V.3.1
N - Ureia	kg	3211,2	Ecoinvent V.3.1
N - MAP - Fosfato Monoamônico	kg	3262,5	Ecoinvent V.3.1
P ₂ O ₅ - MAP - Fosfato Monoamônico	kg	1662,3	Ecoinvent V.3.1
N - DAP - Fosfato diamônico	kg	3369,9	Ecoinvent V.3.1
P ₂ O ₅ - DAP - Fosfato diamônico	kg	1446,5	Ecoinvent V.3.1
N - Nitrato de Amônio	kg	8226,6	Ecoinvent V.3.1
N - UAN - Nitrato de amônio Ureia	kg	5697,0	Ecoinvent V.3.1
N - Amônia anidra	kg	1976,1	Ecoinvent V.3.2
N - Sulfato de Amônio	kg	1803,3	Ecoinvent V.3.1
N - CAN - Nitrato de amônio cálcio	kg	8313,2	Ecoinvent V.3.1
N - Nitrato de cálcio	kg	2780,4	Ecoinvent V.3.1
P ₂ O ₅ - SSP - Superfosfato Simples	kg	2367,7	Ecoinvent V.3.1
P ₂ O ₅ - TSP - Superfosfato Triplo	kg	1876,4	Ecoinvent V.3.1
K ₂ O - KCl - Cloreto de potássio	kg	455,2	Ecoinvent V.3.1
N - Outros	kg	3211,2	Ecoinvent V.3.2
P ₂ O ₅ - Outros	kg	2367,7	Ecoinvent V.3.3
K ₂ O - Outros	kg	455,2	Ecoinvent V.3.4
Glifosato	kg	11505,7	Ecoinvent V.3.1
2,4 - D	kg	5081,7	Ecoinvent V.3.1
Pesticidas, geral	kg	10742,5	Ecoinvent V.3.1
Eletricidade BR Mix - Alta Voltagem	kWh	145,8	Ecoinvent V.3.1
Eletricidade - PCH	kWh	4,3	Ecoinvent V.3
Eletricidade - biomassa	kWh	79,3	Ecoinvent V.3
Eletricidade - eólica	kWh	147,4	Ecoinvent V.3
Eletricidade - solar	kWh	80,7	Ecoinvent V.3
Eletricidade BR Mix - Média Voltagem	kWh	149,7	Ecoinvent V.3.1
Gás Natural	Nm ³	120,7	Ecoinvent V.3.1
Diesel (B0)	kg	556,1	Ecoinvent V.3.1. BEN 2016
Biodiesel (B100)	kg	986,9	RenovaCalc - Típico
GLP	kg	693,9	Ecoinvent V.3.1
Gasolina A	kg	839,5	Ecoinvent V.3
Etanol anidro	kg	547,1	RenovaCalc
Cavaco de madeira	kg	34,2	Ecoinvent V.3.1.
Lenha	kg	34,2	Ecoinvent V.3.1.
Biometano	kg	7,5	RenovaCalc
Óleo combustível	kg	556,1	Ecoinvent V.3.1. BEN 2016
Calor, MJ	kg	94,0	Ecoinvent V.3.1.

Fonte: Adaptado de ANP, 2024 (RenovaCalc)

Tabela A.2: Emissões da combustão dos combustíveis

Emissões da combustão			
Insumo/combustível	[Un.]	Emissões	Referência
Diesel A (B0)	kg	3155,7	Ecoinvent (2007); CTBE
Biodiesel (B100)	kg	16,5	GHG protocol
Biometano (Nm ³)	Nm3	168,0	GHG protocol
Gás Natural	Nm3	2878,6	GHG protocol
GLP	kg	2878,6	GHG protocol
Etanol Anidro	kg	12,4	GHG protocol
Etanol hidratado	kg	17,5	GHG protocol
Gasolina A	kg	3147,5	GHG protocol

Fonte: Adaptado de ANP, 2024 (RenovaCalc)

APÊNDICE A

CÓDIGO EMSO - PREMISAS RENOVACALC

using "types";

Model AgriculturalInputsEmissions

gCO2eq / kg

PARAMETERS

calcitic_limestone_GWP as positive (Brief = "Calcitic limestone GWP", Unit = 'g/kg'); #Calcário calcítico
dolomitic_limestone_GWP as positive (Brief = "Dolomitic limestone GWP", Unit = 'g/kg'); #Calcário dolomítico

gypsum_GWP as positive (Brief = "Gypsum GWP", Unit = 'g/kg'); #Gesso

urea_GWP as positive (Brief = "N - Urea GWP", Unit = 'g/kg'); #N - Ureia

N_MAP_GWP as positive (Brief = "N - Monoammonium phosphate (MAP) GWP", Unit = 'g/kg'); #N - MAP - Fosfato Monoamônico

P_MAP_GWP as positive (Brief = "P2O5 - Monoammonium phosphate (MAP) GWP", Unit = 'g/kg'); #P2O5 - MAP - Fosfato Monoamônico

N_DAP_GWP as positive (Brief = "N - Diammonium phosphate (DAP) GWP", Unit = 'g/kg'); #N - DAP - Fosfato diamônico

P_DAP_GWP as positive (Brief = "P2O5 - Diammonium phosphate (DAP) GWP", Unit = 'g/kg'); #P2O5 - DAP - Fosfato diamônico

ammonium_nitrate_GWP as positive (Brief = "N - Ammonium nitrate GWP", Unit = 'g/kg'); #N - Nitrato de Amônio

urea_ammonium_nitrate_GWP as positive (Brief = "N - UAN - Urea Ammonium Nitrate GWP", Unit = 'g/kg'); #N - UAN - Nitrato de amônio Ureia

anhydrous_ammonia_GWP as positive (Brief = "N - Anhydrous ammonia GWP", Unit = 'g/kg'); #N - Amônia anidra

ammonium_sulfate_GWP as positive (Brief = "N - Ammonium sulfate GWP", Unit = 'g/kg'); #N - Sulfato de Amônio

calcium_ammonium_nitrate_GWP as positive (Brief = "N - CAN - Calcium Ammonium Nitrate GWP", Unit = 'g/kg'); #N - CAN - Nitrato de amônio cálcio

calcium_nitrate_GWP as positive (Brief = "N - Calcium nitrate GWP", Unit = 'g/kg'); #N - Nitrato de cálcio

P_SSP_GWP as positive (Brief = "P2O5 - Single Superphosphate (SSP) GWP", Unit = 'g/kg'); #P2O5 - SSP - Superfosfato Simples

P_TSP_GWP as positive (Brief = "P2O5 - Triple Superphosphate (TSP) GWP", Unit = 'g/kg'); #P2O5 - TSP - Superfosfato Triplo

potassium_chloride_GWP as positive (Brief = "K2O - Potassium chloride (KCl)", Unit = 'g/kg'); #K2O - KCl - Cloreto de potássio

N_others_GWP as positive (Brief = "Other nitrogen agricultural inputs", Unit = 'g/kg'); #N - Outros

P_others_GWP as positive (Brief = "Other phosphate (P2O5) agricultural inputs", Unit = 'g/kg'); #P2O5 - Outros

K_others_GWP as positive (Brief = "Other potassium chloride (K2O) agricultural inputs", Unit = 'g/kg'); #K2O - Outros

glyphosate_GWP as positive (Brief = "Glyphosate GWP", Unit = 'g/kg'); #Glifosato

dichlorophenol_GWP as positive (Brief = "2,4-Dichlorophenol GWP", Unit = 'g/kg'); #2,4 - D

pesticides_GWP as positive (Brief = "General pesticides GWP", Unit = 'g/kg'); #Pesticidas, geral

corn_seeds_GWP as positive (Brief = "Maize seed GWP", Unit = 'g/kg'); #Sementes de milho

soybean_seeds_GWP as positive (Brief = "Soybean seed GWP", Unit = 'g/kg'); #Sementes de soja

SET

calcitic_limestone_GWP = 36.8 * 'g/kg'; #Lime {RoW}| production, milled, loose | Alloc Rec, U

dolomitic_limestone_GWP = 36.8 * 'g/kg'; #Lime {RoW}| production, milled, loose | Alloc Rec, U

gypsum_GWP = 2.8 * 'g/kg'; #Gypsum, mineral {RoW}| gypsum quarry operation | Alloc Rec, U

urea_GWP = 3211.21 * 'g/kg'; #Urea, as N {RoW}| production | Alloc Rec, U

N_MAP_GWP = 3262.51 * 'g/kg'; #Nitrogen fertiliser, as N {RER}| monoammonium phosphate production | Alloc Rec, U

P_MAP_GWP = 1662.29 * 'g/kg'; #Phosphate fertiliser, as P2O5 {RER}| monoammonium phosphate production | Alloc Rec, U

N_DAP_GWP = 3369.91 * 'g/kg'; #Nitrogen fertiliser, as N {RER}| diammonium phosphate production | Alloc Rec, U

$P_DAP_GWP = 1446.52 * 'g/kg'; \#Phosphate\ fertiliser,\ as\ P2O5\ \{RoW\} | diammonium\ phosphate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $ammonium_nitrate_GWP = 8226.57 * 'g/kg'; \#Ammonium\ nitrate,\ as\ N\ \{RoW\} | ammonium\ nitrate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $urea_ammonium_nitrate_GWP = 5696.99 * 'g/kg'; \#Nitrogen\ fertiliser,\ as\ N\ \{RoW\} | urea\ ammonium\ nitrate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $anhydrous_ammonia_GWP = 1976.07 * 'g/kg'; \#Ammonia,\ liquid\ \{RoW\} | ammonia\ production,\ steam\ reforming,\ liquid | Alloc\ Def,\ U$
 $ammonium_sulfate_GWP = 1803.34 * 'g/kg'; \#Ammonium\ sulfate,\ as\ N\ \{RoW\} | ammonium\ sulfate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $calcium_ammonium_nitrate_GWP = 8313.16 * 'g/kg'; \#Nitrogen\ fertiliser,\ as\ N\ \{RoW\} | calcium\ ammonium\ nitrate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $calcium_nitrate_GWP = 2780.36 * 'g/kg'; \#Ammonium\ nitrate,\ as\ N\ \{RoW\} | calcium\ nitrate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $P_SSP_GWP = 2367.66 * 'g/kg'; \#Phosphate\ fertiliser,\ as\ P2O5\ \{RoW\} | single\ superphosphate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $P_TSP_GWP = 1876.38 * 'g/kg'; \#Phosphate\ fertiliser,\ as\ P2O5\ \{RoW\} | triple\ superphosphate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $potassium_chloride_GWP = 455.21 * 'g/kg'; \#Potassium\ chloride,\ as\ K2O\ \{RoW\} | potassium\ chloride\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $N_others_GWP = 3211.21 * 'g/kg'; \#Urea,\ as\ N\ \{RoW\} | production | Alloc\ Rec,\ U$
 $P_others_GWP = 2367.66 * 'g/kg'; \#Phosphate\ fertiliser,\ as\ P2O5\ \{RoW\} | single\ superphosphate\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $K_others_GWP = 455.21 * 'g/kg'; \#Potassium\ chloride,\ as\ K2O\ \{RoW\} | potassium\ chloride\ production | Alloc\ Rec,\ U$
 $glyphosate_GWP = 11505.71 * 'g/kg'; \#Glyphosate\ \{RoW\} | production | Alloc\ Rec,\ U$
 $dichlorophenol_GWP = 5081.67 * 'g/kg'; \#2,4-dichlorophenol\ \{RoW\} | production | Alloc\ Rec,\ U$
 $pesticides_GWP = 10742.52 * 'g/kg'; \#Pesticide,\ unspecified\ \{RoW\} | production | Alloc\ Rec,\ U$
 $corn_seeds_GWP = 1566.09 * 'g/kg'; \#Maize\ seed,\ Swiss\ integrated\ production,\ at\ farm\ \{CH\} | production | Alloc\ Rec,\ U$
 $soybean_seeds_GWP = 1802.42 * 'g/kg'; \#Soybean\ seed,\ for\ sowing\ \{RoW\} | production | Alloc\ Rec,\ U$

end

Model AgriculturalOperationsEmissions

PARAMETERS

straw_collection_GWP as positive (Brief = "Collection of balled straw GWP", Unit = 'g/kg'); #Recolhimento de palha de cana

grains_processing_GWP as positive (Brief = "Processing of grain (cleaning, drying and storage) GWP", Unit = 'g/m^3'); #Processamento de grãos incluindo secagem(limpeza, secagem e armazenamento)

SET

$straw_collection_GWP = 12.0 * 'g/kg'; \# CTBE - Collection\ of\ baled\ straw,\ with\ 50\%\ collection\ rate$
 $grains_processing_GWP = 0.0321 * 'g/m^3'; \#EMBRAPA - Processamento\ do\ milho\ \{BR - Renovabio\} | limpeza,\ secagem\ e\ armazenamento | Alloc\ Def,\ U$

end

Model ElectricityEmissions

PARAMETERS

EEMix_BR_HV_GWP as positive (Brief = "BR Mix high voltage electricity GWP", Unit = 'g/kW/h');

EE_PCH_GWP as positive (Brief = "Hydro (PCH) electricity GWP", Unit = 'g/kW/h');

EE_biomass_GWP as positive (Brief = "Biomass electricity GWP", Unit = 'g/kW/h');

EE_wind_GWP as positive (Brief = "Wind electricity GWP", Unit = 'g/kW/h');

EE_solar_GWP as positive (Brief = "Solar electricity GWP", Unit = 'g/kW/h');

EEMix_BR_MV_GWP as positive (Brief = "BR Mix medium voltage electricity GWP", Unit = 'g/kW/h');

EEMix_US_HV_GWP as positive (Brief = "US Mix high voltage electricity GWP", Unit = 'g/kW/h');

SET

EEMix_BR_HV_GWP = 145.8 * 'g/kW/h'; #Electricity, high voltage, production BR, at grid/BR U

EE_PCH_GWP = 4.25 * 'g/kW/h'; #Electricity, high voltage {RoW}| electricity production, hydro, run-of-river | Alloc Def, U
 EE_biomass_GWP = 79.29 * 'g/kW/h'; #Electricity, high voltage {BR}| cane sugar production with ethanol by-product | Alloc Def, U
 EE_wind_GWP = 147.38 * 'g/kW/h'; #Electricity, high voltage {BR}| electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore | Alloc Def, U
 EE_solar_GWP = 80.73 * 'g/kW/h'; #Electricity, low voltage {RoW}| electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si | Alloc Def, U
 EEMix_BR_MV_GWP = 149.7 * 'g/kW/h'; #Electricity, medium voltage, production BR, at grid/BR U
 EEMix_US_HV_GWP = 759.78 * 'g/kW/h'; #Electricity, high voltage, at grid/US U

end

Model FuelProductionEmissions

#Production of fuels

PARAMETERS

NG_GWP as positive (Brief = "Natural Gas GWP", Unit = 'g/m^3');
 Diesel_B0_GWP as positive (Brief = "Diesel 0% biodiesel GWP", Unit = 'g/kg');
 Biodiesel_B100_GWP as positive (Brief = "Biodiesel 100% GWP", Unit = 'g/kg');
 GLP_GWP as positive (Brief = "Liquefied petrol gas GWP", Unit = 'g/kg');
 GasolineA_GWP as positive (Brief = "Gasoline A GWP", Unit = 'g/kg');
 Ethanol_AnH_GWP as positive (Brief = "Anhydrous ethanol GWP", Unit = 'g/kg');
 Ethanol_Hyd_GWP as positive (Brief = "Anhydrous ethanol GWP", Unit = 'g/kg'); #No value presented on RenovaCalc
 Wood_chips_GWP as positive (Brief = "Wood chips GWP", Unit = 'g/kg');
 Firewood_GWP as positive (Brief = "Firewood GWP", Unit = 'g/kg');
 Biomethane_GWP as positive (Brief = "Biomethane GWP", Unit = 'g/MJ');
 Fuel_Oil_GWP as positive (Brief = "Fuel Oil GWP", Unit = 'g/kg');
 Heat_GWP as positive (Brief = "General heat GWP", Unit = 'g/MJ');

SET

NG_GWP = 120.75 * 'g/m^3'; #Natural gas, high pressure {RoW}| market for | Alloc Def, U
 Diesel_B0_GWP = 556.13 * 'g/kg'; #Diesel, low-sulfur {RoW}| market for | Alloc Def, U
 Biodiesel_B100_GWP = 986.89 * 'g/kg'; #RenovaCalc - BEN 2016 - Tabela VIII.9 – Densidades e Poderes Caloríficos p.226
 GLP_GWP = 693.91 * 'g/kg'; #Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation | Alloc Def, U
 GasolineA_GWP = 839.49 * 'g/kg'; #Petrol, low-sulfur {RoW}| production | Alloc Def, U
 Ethanol_AnH_GWP = 547.12 * 'g/kg'; #RenovaCalc
 Wood_chips_GWP = 34.21 * 'g/kg'; #Wood chips, wet, measured as dry mass {RoW}| wood chips production, hardwood, at sawmill | Alloc Def, U
 Firewood_GWP = 34.21 * 'g/kg'; #Wood chips, wet, measured as dry mass {RoW}| wood chips production, hardwood, at sawmill | Alloc Def, U
 Biomethane_GWP = 7.50 * 'g/MJ'; #RenovaCalc
 Fuel_Oil_GWP = 556.13 * 'g/kg'; #Diesel, low-sulfur {RoW}| market for | Alloc Def, U
 Heat_GWP = 93.98 * 'g/MJ'; #Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}| heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW | Alloc Def, U

end

Model FuelParameters

#Densities, etc

PARAMETERS

Diesel_B0_dens as positive (Brief = "Diesel 0% biodiesel density", Unit = 'kg/l');
 Biodiesel_B100_dens as positive (Brief = "Biodiesel 100% density", Unit = 'kg/l');
 GasolineA_dens as positive (Brief = "Gasoline A density", Unit = 'kg/l');
 Eth_AnH_Gasoline as positive (Brief = "Anhydrous ethanol content in gasoline C", Unit = 'l/l');
 Ethanol_AnH_dens as positive (Brief = "Anhydrous ethanol density", Unit = 'kg/l');
 Ethanol_Hyd_dens as positive (Brief = "Hydrous ethanol density", Unit = 'kg/l');

Biomethane_dens as positive (Brief = "Biomethane (96,5% methane) energy density", Unit ='MJ/l');
#considered for scope 3 (third party)

Diesel_B0_PCI as positive (Brief = "Diesel 0% biodiesel PCI", Unit ='MJ/kg');
Biodiesel_B100_PCI as positive (Brief = "Biodiesel 100% PCI", Unit ='MJ/kg');
biodiesel_diesel_ratio as positive (Brief = "Biodiesel equivalent diesel ratio", Unit ='kg/kg');
Biomethane_PCI as positive (Brief = "Biomethane (96,5% methane) PCI", Unit ='MJ/kg');

SET

Diesel_B0_dens = 0.840 * 'kg/l'; #ANP
Biodiesel_B100_dens = 0.880 * 'kg/l'; #ANP
GasolineA_dens = 0.742 * 'kg/l'; #ANP
Eth_AnH_Gasoline = 0.27 * 'l/l'; #ANP
Ethanol_AnH_dens = 0.791 * 'kg/l'; #ANP
Ethanol_Hyd_dens = 0.809 * 'kg/l'; #ANP
Biomethane_dens = 0.0365544615402297 * 'MJ/l'; #Renovabio

Diesel_B0_PCI = 42.28668 * 'MJ/kg'; #ANP
Biodiesel_B100_PCI = 37.6812 * 'MJ/kg'; #ANP
biodiesel_diesel_ratio = Diesel_B0_PCI / Biodiesel_B100_PCI;
Biomethane_PCI = 48.25 * 'MJ/kg'; #Renovabio

end

Model FuelCombustionEmissions

#Combustion of fuels

PARAMETERS

Diesel_B0_comb_GWP as positive (Brief = "Diesel 0% biodiesel combustion GWP", Unit ='g/kg');
Biodiesel_B100_comb_GWP as positive (Brief = "Biodiesel 100% combustion GWP", Unit ='g/kg');
GasolineA_comb_GWP as positive (Brief = "Gasoline A combustion GWP", Unit ='g/kg');
Ethanol_AnH_comb_GWP as positive (Brief = "Anhydrous ethanol combustion GWP", Unit ='g/kg');
Ethanol_Hyd_comb_GWP as positive (Brief = "Hydrous ethanol combustion GWP", Unit ='g/kg');
Biomethane_comb_GWP as positive (Brief = "Biomethane (96,5% methane) energy combustion GWP",
Unit ='g/m^3');

SET

Diesel_B0_comb_GWP = 3155.67 * 'g/kg'; #Ecoinvent (2007) apud CTBE
Biodiesel_B100_comb_GWP = 16.542 * 'g/kg'; #GHG protocol
GasolineA_comb_GWP = 3147.46034914952 * 'g/kg'; #GHG protocol
Ethanol_AnH_comb_GWP = 12.4065351 * 'g/kg'; #GHG protocol
Ethanol_Hyd_comb_GWP = 17.48784492 * 'g/kg'; #GHG protocol
Biomethane_comb_GWP = 168.040540540541 * 'g/m^3'; #GHG protocol

end

Model AgriculturalDirectEmissions

PARAMETERS

N2Oeq as positive (Brief="N2O CO2 equivalent", Default = 265.0, Unit = 'kg/kg');# AR5 IPCC
CH4eq_fossil as positive (Brief="Fossil CH4 CO2 equivalent", Default = 30.0, Unit = 'kg/kg');# AR5 IPCC
CH4eq_biogenic as positive (Brief="Biogenic CH4 CO2 equivalent", Default = 28.0, Unit = 'kg/kg');# AR5 IPCC
dolomitic_emission as positive (Brief="CO2 emission after application of dolomitic limestone", Unit = 'kg/kg');
calcitic_emission as positive (Brief="CO2 emission after application of calcitic limestone", Unit = 'kg/kg');
urea_emission as positive (Brief="CO2 emission after application of urea", Unit = 'kg/kg');
dry_mass_frac as positive (Brief="Dry sugarcane fraction");# RenovaCalc
straw_ratio as positive (Brief="Straw/sugarcane ratio dry base", Unit = 't/t');# RenovaCalc
Nconc_residue as positive (Brief="Nitrogen content in aboveground residue", Unit = 'kg/t');# RenovaCalc (kgN/tstraw)

root_shoot_ratio as positive (Brief="Underground versus aboveground biomass ratio", Unit = 'kg/kg');#
 RenovaCalc (kgN/tstraw)
 Nconc_root as positive (Brief="Nitrogen content in root dry weight", Unit = 'kg/t');# RenovaCalc (kgN/troot)
 straw_N2O_emission as positive (Brief="Straw N2O emission factor", Unit = 'kg/t');# RenovaCalc
 (kgN/tstraw)
 straw_CH4_emission as positive (Brief="Straw biogenic CH4 emission factor", Unit = 'kg/t');# RenovaCalc
 (kgCH4/tstraw)
 N2O_mineral as positive (Brief="N2O emissions from mineral fertilizers", Unit = 'kg/kg');
 NH3_mineral as positive (Brief="NH3 emissions from mineral fertilizers", Unit = 'kg/kg');
 NO3_mineral as positive (Brief="NO3- emissions from mineral fertilizers", Unit = 'kg/kg');
 N2O_organic as positive (Brief="N2O emissions from organic fertilizers", Unit = 'kg/kg');
 NH3_organic as positive (Brief="NH3 emissions from organic fertilizers", Unit = 'kg/kg');
 NO3_organic as positive (Brief="NO3- emissions from organic fertilizers", Unit = 'kg/kg');
 N2O_residues as positive (Brief="N2O emissions from crop residues", Unit = 'kg/kg');
 NH3_residues as positive (Brief="NH3 emissions from crop residues", Unit = 'kg/kg');
 NO3_residues as positive (Brief="NO3- emissions from crop residues", Unit = 'kg/kg');
 N_loss_ammonia as positive (Brief="Nitrogen loss as ammonia", Unit = 'kg/kg');
 N_loss_nitrate as positive (Brief="Nitrogen loss as nitrate", Unit = 'kg/kg');

SET

dolomitic_emission = 0.13 * (44/12) * 'kg/kg';# IPCC 2006 - 0.13 kg C/kg
 calcitic_emission = 0.12 * (44/12) * 'kg/kg';# IPCC 2006 - 0.12 kg C/kg
 urea_emission = 0.2 * (44/12) / 0.47 * 'kg/kg';# kgCO2/kgN IPCC 2006 - 0.2 kg C/kg
 dry_mass_frac = 0.3; # RenovaCalc
 straw_ratio = 0.14 * 't/t';# RenovaCalc (tstraw/tcane)
 Nconc_residue = 4.77 * 'kg/t';# RenovaCalc (kgN/tstraw)
 root_shoot_ratio = 0.2 * 'kg/kg';# RenovaCalc (kgroot/kgshoot)
 Nconc_root = 5.14 * 'kg/t';# RenovaCalc (kgN/troot)
 straw_N2O_emission = 0.07 * 'kg/t';# RenovaCalc (kgN/troot)
 straw_CH4_emission = 2.70 * 'kg/t';# RenovaCalc (kgN/troot)
 N2O_mineral = 0.01 * 'kg/kg';
 NH3_mineral = 0.1 * (17/14) * 'kg/kg'; # 0,1= Fração de N em fertilizante mineral (sintético) que volatiliza
 como NH3 e NOx
 NO3_mineral = 0.3 * (62/14) * 'kg/kg'; # 0,3= Fração de N nos fertilizante minerais e orgânico que é perdida
 via lixiviação e runoff
 N2O_organic = 0.01 * 'kg/kg';
 NH3_organic = 0.2 * (17/14) * 'kg/kg'; # 0,2= Fração de N em fertilizante orgânico que volatiliza como NH3
 e NOx
 NO3_organic = 0.3 * (62/14) * 'kg/kg'; # 0,3= Fração de N nos fertilizante minerais e orgânico que é perdida
 via lixiviação e runoff
 N2O_residues = 0.01 * 'kg/kg';
 NH3_residues = 0 * 'kg/kg';
 NO3_residues = 0.3 * (62/14) * 'kg/kg'; # 0,3= Fração de N nos fertilizante minerais e orgânico que é perdida
 via lixiviação e runoff
 N_loss_ammonia = 0.01 * 'kg/kg'; # Perdas de Nitrogênio na forma de amônia [kg/ha]
 N_loss_nitrate = 0.0075 * 'kg/kg'; # Perdas de Nitrogênio na forma de nitrato [kg/ha]

VARIABLES

sugarcane_prod as positive (Brief="Sugarcane productivity", Unit = 't/ha');# Calculated on user input
 burned_area_frac as positive (Brief="Fraction of burned area"); # Fração de area queimada (calculated on
 user input)
 N_mineral as positive (Brief="Nitrogen from mineral fertilizers", Unit = 'kg/ha'); # calculated on user input
 N_organic as positive (Brief="Nitrogen from organic fertilizers", Unit = 'kg/ha'); # calculated on user input
 dry_prod as positive (Brief="Dry sugarcane productivity", Unit = 't/ha');
 straw_prod as positive (Brief="Aboveground residue - straw productivity", Unit = 't/ha');
 root_prod as positive (Brief="Root amount - root productivity", Unit = 't/ha');
 straw_impurity as positive (Brief="Straw removed as plant impurity", Unit = 't/ha'); # Palha retirada como
 impureza vegetal
 straw_harvested as positive (Brief="Straw harvested", Unit = 't/ha'); # Palha recolhida

harvested_residues_frac as positive (Brief="Fraction of harvested residues"); # Fração de resíduos recolhidos

N_residues as positive (Brief="Nitrogen from crop residues", Unit = 'kg/ha');

N2Oeq_mineral as positive (Brief="N2Oeq emissions from mineral fertilizers", Unit = 'kg/ha'); #result

N2Oeq_organic as positive (Brief="N2Oeq emissions from organic fertilizers", Unit = 'kg/ha'); #result

N2Oeq_residues as positive (Brief="N2Oeq emissions from crop residues", Unit = 'kg/ha'); #result

burned_straw as positive (Brief="Amount of straw burned", Unit = 't/ha');

N2O_burned_straw as positive (Brief="N2o emitted from straw burning", Unit = 'kg/ha'); #result

CH4_burned_straw as positive (Brief="CH4 emitted from straw burning", Unit = 'kg/ha'); #result

EQUATIONS

dry_prod = sugarcane_prod * dry_mass_frac;

straw_prod = sugarcane_prod * straw_ratio;

root_prod = (dry_prod + straw_prod) * root_shoot_ratio;

harvested_residues_frac = (straw_impurity + straw_harvested) / straw_prod;

N_residues = (Nconc_root * root_prod) + (Nconc_residue * straw_prod * (1 - harvested_residues_frac - burned_area_frac));

#N2Oeq_mineral = N_mineral * (44/28) * 0.01325; #considers NH3; NO3- and N2O emissions

N2Oeq_mineral = (44/28) * (N_mineral * (N2O_mineral + (14/17) * N_loss_ammonia * NH3_mineral + (14/62) * NO3_mineral * N_loss_nitrate));

#N2Oeq_organic = N_organic * 44/28 * 0.01325; #considers NH3; NO3- and N2O emissions

N2Oeq_organic = (44/28) * (N_organic * (N2O_organic + (14/17) * N_loss_ammonia * NH3_organic + (14/62) * NO3_organic * N_loss_nitrate));

#N2Oeq_residues = N_residues * 44/28 * 0.01325; #considers NH3; NO3- and N2O emissions

N2Oeq_residues = (44/28) * (N_residues * (N2O_residues + (14/17) * N_loss_ammonia * NH3_residues + (14/62) * NO3_residues * N_loss_nitrate));

burned_straw = straw_prod * burned_area_frac;

N2O_burned_straw = burned_straw * straw_N2O_emission;

CH4_burned_straw = burned_straw * straw_CH4_emission;

end

APÊNDICE B

CÓDIGO EMSO – EMISSÕES CANA-DE-AÇÚCAR

```
using "types";
using "assumptions_renovacalc";
```

```
Model SugarcaneFarmingEmissions_Primary
```

```
# connection with models
```

```
VARIABLES
```

```
AI_GWP as AgriculturalInputsEmissions (Brief = "Model for agricultural inputs indirect emissions");
```

```
AD_GWP as AgriculturalDirectEmissions (Brief = "Model for agricultural inputs direct emissions");
```

```
FP as FuelParameters (Brief = "Model for fuel parameters");
```

```
FP_GWP as FuelProductionEmissions (Brief = "Model for fuel indirect emissions");
```

```
EE as ElectricityEmissions (Brief = "Model for electricity indirect emissions");
```

```
FC_GWP as FuelCombustionEmissions (Brief = "Model for fuel combustion direct emissions");
```

```
#-----FARMING VARIABLES-----# !!User Input!!
```

```
VARIABLES
```

```
# user necessary inputs
```

```
total_area as positive (Brief = "Total crop area", Unit = 'ha'); #user input
```

```
total_production as positive (Brief = "Total sugar cane harvested (wet basis)", Unit = 't'); #user input
```

```
impurity_content as positive (Brief = "Vegetal impurity content (wet basis)", Unit = 'kg/t'); #user input
```

```
impurity_moisture as positive (Brief = "Vegetal Impurity moisture"); #user input
```

```
impurity_mineral as positive (Brief = "Mineral Impurity content", Unit = 'kg/t'); #user input
```

```
harvested_straw as positive (Brief = "Straw harvested aside from sugarcane (dry basis)", Unit = 't'); #user input
```

```
burned_area as positive (Brief = "Total burned crop area", Unit = 'ha');
```

```
# variables for intermediate calculations
```

```
productivity as positive (Brief = "Total sugar cane productivity", Unit = 'kg/ha');
```

```
land_occupation as positive (Brief = "Total Land occupation", Unit = 'ha/t');
```

```
# Total harvested sugarcane emissions
```

```
harvested_sugarcane_emissions as positive (Brief = "Total emissions associated with harvested sugarcane (Scope 1,2 & 3)", Unit = 'g/t');
```

```
EQUATIONS
```

```
"Total sugarcane productivity"
```

```
productivity = total_production / total_area;
```

```
"Total land occupation"
```

```
land_occupation = total_area / total_production;
```

```
"Total harvested sugarcane emissions (direct + indirect)"
```

```
harvested_sugarcane_emissions = background_emissions + agric_direct_emissions;
```

```
#-----PRIMARY CONSUMPTIONS-----# !!User Input!!
```

```
VARIABLES
```

```
# synthetic fertilizers
```

```
calcitic_limestone as positive (Brief = "Calcitic limestone consumption", Unit = 'kg/t'); # Calcário calcítico (kg/ton cana)
```

```
dolomitic_limestone as positive (Brief = "Dolomitic limestone consumption", Unit = 'kg/t'); # Calcário dolomítico (kg/ton cana)
```

```
gypsum as positive (Brief = "Gypsum consumption", Unit = 'kg/t'); # Gesso (kg/ton cana)
```

```
urea as positive (Brief = "N - Urea consumption", Unit = 'kg/t'); # N - Ureia (kg/ton cana)
```

```
N_MAP as positive (Brief = "N - Monoammonium phosphate (MAP) consumption", Unit = 'kg/t'); # N - MAP - Fosfato Monoamônico (kg/ton cana)
```

```
P_MAP as positive (Brief = "P2O5 - Monoammonium phosphate (MAP) consumption", Unit = 'kg/t'); # P2O5 - MAP - Fosfato Monoamônico (kg/ton cana)
```

```
N_DAP as positive (Brief = "N - Diammonium phosphate (DAP) consumption", Unit = 'kg/t'); # N - DAP - Fosfato diamônico (kg/ton cana)
```

P_DAP as positive (Brief = "P2O5 - Diammonium phosphate (DAP) consumption", Unit = 'kg/t'); # P2O5 - DAP - Fosfato diamônico (kg/ton cana)
 ammonium_nitrate as positive (Brief = "N - Ammonium nitrate consumption", Unit = 'kg/t'); # N - Nitrato de Amônio (kg/ton cana)
 urea_ammonium_nitrate as positive (Brief = "N - UAN - Urea Ammonium Nitrate consumption", Unit = 'kg/t'); # N - UAN - Nitrato de amônio Ureia (kg/ton cana)
 anhydrous_ammonia as positive (Brief = "N - Anhydrous ammonia consumption", Unit = 'kg/t'); # N - Amônia anidra (kg/ton cana)
 ammonium_sulfate as positive (Brief = "N - Ammonium sulfate consumption", Unit = 'kg/t'); # N - Sulfato de Amônio (kg/ton cana)
 calcium_ammonium_nitrate as positive (Brief = "N - CAN - Calcium Ammonium Nitrate consumption", Unit = 'kg/t'); # N - CAN - Nitrato de amônio cálcio (kg/ton cana)
 P_SSP as positive (Brief = "P2O5 - Single Superphosphate (SSP) consumption", Unit = 'kg/t'); # P2O5 - SSP - Superfosfato Simples (kg/ton cana)
 P_TSP as positive (Brief = "P2O5 - Triple Superphosphate (TSP) consumption", Unit = 'kg/t'); # P2O5 - TSP - Superfosfato Triplo (kg/ton cana)
 potassium_chloride as positive (Brief = "K2O - Potassium chloride (KCl) consumption", Unit = 'kg/t'); # K2O - KCl - Cloreto de potássio (kg/ton cana)
 N_others as positive (Brief = "Other nitrogen agricultural inputs", Unit = 'kg/t'); # N - Outros (kg/ton cana)
 P_others as positive (Brief = "Other phosphate (P2O5) agricultural inputs", Unit = 'kg/t'); # P2O5 - Outros (kg/ton cana)
 K_others as positive (Brief = "Other potassium chloride (K2O) agricultural inputs", Unit = 'kg/t'); # K2O - Outros (kg/ton cana)

organic/organomineral fertilizers

vinasse as positive (Brief = "Vinasse consumption", Unit = 'l/t'); # Vinhaca
 vinasse_N as positive (Brief = "Nitrogen concentration - vinasse", Unit = 'g/l');
 filter_cake as positive (Brief = "Filter cake consumption (wet basis)", Unit = 'kg/t'); # Torta de filtro
 filter_cake_N as positive (Brief = "Nitrogen concentration - filter cake", Unit = 'g/kg');
 ash_soot as positive (Brief = "Ash and soot consumption (wet basis)", Unit = 'kg/t'); # Cinzas e fuligem
 ash_soot_N as positive (Brief = "Nitrogen concentration - ash and soot", Unit = 'g/kg');
 others1 as positive (Brief = "Other fertilizer consumption", Unit = 'kg/t'); # Opcional
 others1_N as positive (Brief = "Nitrogen concentration - Other fertilizer", Unit = 'g/kg');
 others2 as positive (Brief = "Other fertilizer consumption", Unit = 'kg/t'); # Opcional
 others2_N as positive (Brief = "Nitrogen concentration - Other fertilizer", Unit = 'g/kg');

PARAMETERS

Herbicides are not a variable on RenovaCalc. Fixed consumption (parameter)
 glyphosate as positive (Brief = "Glyphosate consumption", Unit = 'kg/ha'); # Glifosato (kg/ton cana)
 dichlorophenol as positive (Brief = "2,4-Dichlorophenol consumption", Unit = 'kg/ha'); # 2,4 - D
 pesticides as positive (Brief = "General pesticides consumption", Unit = 'kg/ha'); # Pesticidas, geral

SET

glyphosate = 0.17412 * 'kg/ha';
 dichlorophenol = 0.03755 * 'kg/ha';
 pesticides = 0.87149 * 'kg/ha';

VARIABLES

fuels

Diesel_B8 as positive (Brief = "Diesel 8% biodiesel consumption", Unit = 'l/t');
 Diesel_B10 as positive (Brief = "Diesel 10% biodiesel consumption", Unit = 'l/t');
 Diesel_BX as positive (Brief = "Diesel X% biodiesel consumption", Unit = 'l/t');
 Diesel_BX_c as positive (Brief = "Biodiesel content in Diesel BX", Unit = 'l/l');
 Diesel_B20 as positive (Brief = "Diesel 20% biodiesel consumption", Unit = 'l/t');
 Diesel_B30 as positive (Brief = "Diesel 30% biodiesel consumption", Unit = 'l/t');
 Biodiesel_B100 as positive (Brief = "Biodiesel 100% consumption", Unit = 'l/t');
 GasolineC as positive (Brief = "Gasoline C consumption", Unit = 'l/t');
 Ethanol_Hyd as positive (Brief = "Hydrous ethanol consumption", Unit = 'l/t'); # No value presented on RenovaCalc
 Biomethane_own as positive (Brief = "Own production Biomethane consumption", Unit = 'm^3/t');

Biomethane_third as positive (Brief = "Third party Biomethane consumption", Unit = 'm³/t');

electricity

EEMix_BR_MV as positive (Brief = "BR Mix medium voltage electricity consumption", Unit = 'kW*h/t');

EE_PCH as positive (Brief = "Hydro (PCH) electricity consumption", Unit = 'kW*h/t');

EE_biomass as positive (Brief = "Biomass electricity consumption", Unit = 'kW*h/t');

EE_wind as positive (Brief = "Wind electricity consumption", Unit = 'kW*h/t');

EE_solar as positive (Brief = "Solar electricity GWP", Unit = 'kW*h/t');

#-----INDIRECT EMISSIONS-----#

VARIABLES

variables for background emissions (scope 3)

background_emissions as positive (Brief = "Total background emissions associated with agricultural inputs (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t'); # gCO₂/toncana

syn_fert_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with synthetic fertilizers inputs (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

herbicides_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with herbicides inputs (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

organic_fert_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with organic fertilizes inputs (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

fuels_bg_emissions as positive (Brief = "Total background emissions associated with fuels (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

diesel_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with Diesel (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

biodiesel_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with Biodiesel (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

gasolineA_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with Gasoline A (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

ethanol_anh_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with Anhydrous Ethanol (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

ethanol_hyd_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated com Hydrous Ethanol (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

biomethane_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with third party Biomethane (scope 3 emissions)", Unit = 'g/t');

electricity background emissions (scope 2)

electricity_bg_emissions as positive (Brief = "Background emissions associated with electricity (scope 2 emissions)", Unit = 'g/t');

EQUATIONS

"Total background emissions (scope 3 for inputs and scope 2 for electricity)"

background_emissions = syn_fert_bg_emissions +

herbicides_bg_emissions +

organic_fert_bg_emissions +

fuels_bg_emissions +

electricity_bg_emissions;

"Synthetic fertilizers background emissions (production)"

syn_fert_bg_emissions = calcitic_limestone * AI_GWP.calcitic_limestone_GWP +

dolomitic_limestone * AI_GWP.dolomitic_limestone_GWP +

gypsum * AI_GWP.gypsum_GWP +

urea * AI_GWP.urea_GWP +

N_MAP * AI_GWP.N_MAP_GWP +

P_MAP * AI_GWP.P_MAP_GWP +

N_DAP * AI_GWP.N_DAP_GWP +

P_DAP * AI_GWP.P_DAP_GWP +

ammonium_nitrate * AI_GWP.ammonium_nitrate_GWP +

urea_ammonium_nitrate * AI_GWP.urea_ammonium_nitrate_GWP +

anhydrous_ammonia * AI_GWP.anhydrous_ammonia_GWP +

```

ammonium_sulfate * AI_GWP.ammonium_sulfate_GWP +
calcium_ammonium_nitrate * AI_GWP.calcium_ammonium_nitrate_GWP +
P_SSP * AI_GWP.P_SSP_GWP +
P_TSP * AI_GWP.P_TSP_GWP +
potassium_chloride * AI_GWP.potassium_chloride_GWP +
N_others * AI_GWP.N_others_GWP +
P_others * AI_GWP.P_others_GWP +
K_others * AI_GWP.K_others_GWP;

```

"Herbicides background emissions (production)"

```

herbicides_bg_emissions = land_occupation * (
glyphosate * AI_GWP.glyphosate_GWP +
dichlorophenol * AI_GWP.dichlorophenol_GWP +
pesticides * AI_GWP.pesticides_GWP); # pesticides can be open into specifics

```

"Organic fertilizers background emissions (production, assumed 0)"

```

organic_fert_bg_emissions = vinasse * vinasse_N * 0 + # organic fertilizers assumed to have 0 background
emissions, only direct emissions when applied
filter_cake * filter_cake_N * 0 +
ash_soot * ash_soot_N * 0 +
others1 * others1_N * 0 +
others2 * others2_N * 0;

```

"Total fuels background emissions (production)"

```

fuels_bg_emissions = diesel_bg_emissions +
biodiesel_bg_emissions +
gasolineA_bg_emissions +
ethanol_anh_bg_emissions +
ethanol_hyd_bg_emissions +
biomethane_bg_emissions;

```

"Diesel background emissions (production)"

```

diesel_bg_emissions = FP_GWP.Diesel_B0_GWP * FP.Diesel_B0_dens * (
Diesel_B8 * (1 - 0.08) +
Diesel_B10 * (1 - 0.10) +
Diesel_BX * (1 - Diesel_BX_c) +
Diesel_B20 * (1 - 0.20) +
Diesel_B30 * (1 - 0.30) +
Biodiesel_B100 * (1 - 1)); # subtracts biodiesel fractions

```

"Biodiesel background emissions (production)"

```

biodiesel_bg_emissions = FP_GWP.Biodiesel_B100_GWP * FP.Biodiesel_B100_dens * (
Diesel_B8 * (0.08) +
Diesel_B10 * (0.10) +
Diesel_BX * (Diesel_BX_c) +
Diesel_B20 * (0.20) +
Diesel_B30 * (0.30) +
Biodiesel_B100 * (1));

```

"Gasoline A (undiluted) background emissions (production)"

```

gasolineA_bg_emissions = FP_GWP.GasolineA_GWP * FP.GasolineA_dens *
GasolineC * (1 - FP.Eth_AnH_Gasoline);

```

"Anhydrous ethanol background emissions (production)"

```

ethanol_anh_bg_emissions = FP_GWP.Ethanol_AnH_GWP * FP.Ethanol_AnH_dens *
GasolineC * (FP.Eth_AnH_Gasoline);

```

"Hydrous ethanol background emissions (production)"

```

ethanol_hyd_bg_emissions = FP_GWP.Ethanol_Hyd_GWP * FP.Ethanol_Hyd_dens *
Ethanol_Hyd;

```

"Biomethane background emissions (production) - only third party considered"

biomethane_bg_emissions = FP_GWP.Biomethane_GWP * FP.Biomethane_dens *
Biomethane_third;

"Electricity background emissions (production) - scope 2"

electricity_bg_emissions = EEMix_BR_MV * EE.EEMix_BR_MV_GWP +
EE_PCH * EE.EE_PCH_GWP +
EE_biomass * EE.EE_biomass_GWP +
EE_wind * EE.EE_wind_GWP +
EE_solar * EE.EE_solar_GWP;

#-----DIRECT EMISSIONS-----#

VARIABLES

variables for direct emissions (scope 1)

agric_direct_emissions as positive (Brief = "Total direct emissions associated with agricultural step (scope 1/2 emissions)", Unit = 'g/t');

fert_appl_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with fertilizer application (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

crop_residue_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with crop residues (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

straw_burning_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with straw burning (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

fuel_combustion_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with fuel combustion (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

diesel_comb_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with Diesel combustion (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

biodiesel_comb_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with Biodiesel combustion (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

gasolineA_comb_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with Gasoline A combustion (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

eth_anh_comb_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with Anhydrous Ethanol combustion (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

eth_hyd_comb_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with Hydrous Ethanol combustion (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

biomethane_comb_emissions as positive (Brief = "Direct emissions associated with Biomethane combustion (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

N2O_mineral_fert as positive (Brief = "N2O direct emissions associated with synthetic fertilizers (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

N2O_organic_fert as positive (Brief = "N2O direct emissions associated with organic fertilizers (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

N2O_crop_residues as positive (Brief = "N2O direct emissions associated with crop residues (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

N2O_straw_burn as positive (Brief = "N2O direct emissions associated with burning straw (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

CH4_straw_burn as positive (Brief = "CH4 direct emissions associated with burning straw (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

CO2_limestone as positive (Brief = "CO2 direct emissions associated with limestone application (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

CO2_urea as positive (Brief = "CO2 direct emissions associated with urea application (scope 1 emissions)", Unit = 'g/t');

SPECIFY

AD_GWP.sugarcane_prod = productivity;

AD_GWP.burned_area_frac = burned_area / total_area;

AD_GWP.straw_impurity = impurity_content * (1 - impurity_moisture) * productivity;

AD_GWP.straw_harvested = harvested_straw / total_area;

EQUATIONS

"Mineral fertilizers nitrogen inputs"

$$\text{AD_GWP.N_mineral} = \text{productivity} * (\text{urea} + \text{N_MAP} + \text{N_DAP} + \text{ammonium_nitrate} + \text{urea_ammonium_nitrate} + \text{anhydrous_ammonia} + \text{ammonium_sulfate} + \text{calcium_ammonium_nitrate} + \text{N_others});$$

"Organic fertilizers nitrogen inputs"

$$\text{AD_GWP.N_organic} = \text{productivity} * (\text{vinasse} * \text{vinasse_N} + \text{filter_cake} * \text{filter_cake_N} + \text{ash_soot} * \text{ash_soot_N} + \text{others1} * \text{others1_N} + \text{others2} * \text{others2_N});$$

"Total direct agricultural emissions (scope 1)"

$$\text{agric_direct_emissions} = \text{fert_appl_emissions} + \text{crop_residue_emissions} + \text{straw_burning_emissions} + \text{fuel_combustion_emissions};$$

"Fertilizer application direct emissions"

$$\text{fert_appl_emissions} = \text{AD_GWP.N2Oeq} * (\text{N2O_mineral_fert} + \text{N2O_organic_fert}) + \text{CO2_limestone} + \text{CO2_urea};$$

"Crop residue direct emissions"

$$\text{crop_residue_emissions} = \text{AD_GWP.N2Oeq} * \text{N2O_crop_residues};$$

"Straw burning direct emissions"

$$\text{straw_burning_emissions} = \text{AD_GWP.N2Oeq} * \text{N2O_straw_burn} + \text{AD_GWP.CH4eq_biogenic} * \text{CH4_straw_burn};$$

"Combustion of fuels direct emissions"

$$\text{fuel_combustion_emissions} = \text{diesel_comb_emissions} + \text{biodiesel_comb_emissions} + \text{gasolineA_comb_emissions} + \text{eth_anh_comb_emissions} + \text{eth_hyd_comb_emissions} + \text{biomethane_comb_emissions};$$

intermediate calculations

"N2O emissions for mineral and organic fertilizers, crop residue and straw burning"

$$\begin{aligned} \text{N2O_mineral_fert} &= \text{land_occupation} * \text{AD_GWP.N2Oeq_mineral}; \\ \text{N2O_organic_fert} &= \text{land_occupation} * \text{AD_GWP.N2Oeq_organic}; \\ \text{N2O_crop_residues} &= \text{land_occupation} * \text{AD_GWP.N2Oeq_residues}; \\ \text{N2O_straw_burn} &= \text{land_occupation} * (\text{AD_GWP.burned_straw} * \text{AD_GWP.straw_N2O_emission}); \end{aligned}$$

"Methane emissions from straw burning"

CH4_straw_burn = land_occupation * (AD_GWP.burned_straw * AD_GWP.straw_CH4_emission);

"CO2eq emissions from application of limestone and urea"

CO2_limestone = calcitic_limestone * AD_GWP.calcitic_emission +
dolomitic_limestone * AD_GWP.dolomitic_emission;

CO2_urea = urea * AD_GWP.urea_emission;

"Diesel combustion direct emissions"

diesel_comb_emissions = FC_GWP.Diesel_B0_comb_GWP * FP.Diesel_B0_dens * (
Diesel_B8 * (1 - 0.08) +
Diesel_B10 * (1 - 0.10) +
Diesel_BX * (1 - Diesel_BX_c) +
Diesel_B20 * (1 - 0.20) +
Diesel_B30 * (1 - 0.30) +
Biodiesel_B100 * (1 - 1)); # subtracts biodiesel fractions

"Biodiesel combustion direct emissions"

biodiesel_comb_emissions = FC_GWP.Biodiesel_B100_comb_GWP * FP.Biodiesel_B100_dens * (
Diesel_B8 * (0.08) +
Diesel_B10 * (0.10) +
Diesel_BX * (Diesel_BX_c) +
Diesel_B20 * (0.20) +
Diesel_B30 * (0.30) +
Biodiesel_B100 * (1));

"Gasoline A combustion direct emissions"

gasolineA_comb_emissions = FC_GWP.GasolineA_comb_GWP * FP.GasolineA_dens *
GasolineC * (1 - FP.Eth_An timer_Gasoline);

"Anhydrous ethanol combustion direct emissions"

eth_anh_comb_emissions = FC_GWP.Ethanol_An timer_comb_GWP * FP.Ethanol_An timer_dens * GasolineC *
(FP.Eth_An timer_Gasoline);

"Hydrous ethanol combustion direct emissions"

eth_hyd_comb_emissions = FC_GWP.Ethanol_Hyd_comb_GWP * FP.Ethanol_Hyd_dens *
Ethanol_Hyd;

"Biomethane combustion direct emissions (own and third party)"

biomethane_comb_emissions = FC_GWP.Biomethane_comb_GWP * (
Biomethane_own + Biomethane_third);

end