

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

KAROLINE ARGUELHO DA SILVA

Análise da ecoeficiência da produção do grão de soja *in natura* no Brasil: uma abordagem usando o método Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória de Dados

São Carlos

2023

KAROLINE ARGUELHO DA SILVA

Análise da ecoeficiência da produção do grão de soja *in natura* no Brasil: uma abordagem usando o método Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória de Dados

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão de Desempenho de Operações

Orientador: Prof. Associada Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto

São Carlos

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE
ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Arguelho da Silva, Karoline

Análise da ecoeficiência da produção do grão
de soja in natura no Brasil: uma abordagem usando
o método Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória
de Dados / Karoline Arguelho da Silva; orientadora
Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto. São Carlos,
2023.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Área de Concentração em
Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2023

1. Soja. 2. Ecoeficiência . 3. Avaliação do
Ciclo de Vida. 4. Análise Envoltória de Dados. I.
Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **KAROLINE ARGUELHO DA SILVA**.

Título da tese: "Análise da ecoeficiência da produção do grão de soja in natura no Brasil: uma abordagem usando o método Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória de Dados".

Data da defesa: 05/05/2023

Comissão Julgadora

Resultado

Profa. Associada **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto**

(Orientadora)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovada

Profa. Dra. **Janaina Mascarenhas Hornos da Costa**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Prof. Dr. **Naja Brandão Santana**

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovada

Dra. **Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura**

(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA - Jaguariúna)

Aprovada

Prof. Dr. **Enzo Barberio Mariano**

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Aprovada

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:

Profa. Dra. **Janaina Mascarenhas Hornos da Costa**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

*Aos meus pais, Carmem (in
memoriam) e Renato, pelo carinho
amor e apoio incansável.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

Agradeço imensamente a meus pais. A minha mãe Carmem (*in memoriam*) por ter sido um presente na minha vida. Ao meu pai, Renato que é um exemplo de vida para mim, que é a minha força e que eu me inspiro todos os dias e que me dá muito orgulho. Ao meu irmão Conrado que sempre está do meu lado me encorajando e me apoiando em todas as decisões. Obrigada por estarem comigo sempre.

À Karine Borri que me acompanhou durante todos esses anos e que me encorajava a cada dia, me impulsionando e me apoiando em tudo, realmente não tenho palavras para mensurar a minha gratidão.

Sou grata pela confiança depositada em mim pela minha professora e orientadora maravilhosa Daisy Ap. Nascimento Rebelatto, foi um presente ser orientada por você, obrigada por todos os ensinamentos, por sempre me ajudar e manter motivada durante todo o processo.

Agradeço a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para que todo esse processo fosse bem sucedido: Guilherme Roiz, Ícaro Guilherme Félix da Cunha, Etienne Cardoso Abdala, Miriam, Jéssica Caleffi e Juliana Ng .

Agradeço também à Marília Folegatti e à Embrapa por ter cedido gentilmente a utilização do *software* Simpro, para que os resultados desta tese fossem alcançados.

Agradeço ao Departamento de Engenharia de Produção pela simpatia e eficiência, em especial à Jéssica, Sueli, Talita, Ana, sempre muito gentis e competentes.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por último, quero agradecer também à Universidade de São Paulo e todo o seu corpo docente.

RESUMO

SILVA, K. A. **Análise da ecoeficiência da produção do grão de soja *in natura* no Brasil:** uma abordagem usando o método Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória de Dados. 2023. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

A ecoeficiência se define pela capacidade de maximizar a eficiência produtiva e minimizar o impacto ambiental das atividades econômicas. A soja é uma das principais *commodities* agrícolas produzidas no País e o estudo da ecoeficiência busca minimizar os impactos negativos ambientais de sua produção, contribuindo para a proteção da biodiversidade, dos recursos hídricos e do solo, e para a redução da emissão de gases efeito estufa. Utilizando os dados do Agriannual da safra 2021/2022 de dez estados brasileiros e para três tipos de manejo diferentes, convencional, transgênico primeira geração e transgênico segunda geração, aplicou-se a metodologia análise do ciclo de vida + análise envoltória de dados, em três passos, para o cálculo da ecoeficiência. O primeiro e segundo passos envolvem a criação do inventário do ciclo de vida e a avaliação do impacto ambiental de cada unidade estudada, respectivamente. Com os resultados dos inventários e das categorias de impacto, o terceiro passo é a implementação do modelo DEA (Análise Envoltória de Dados) para encontrar o escore de eficiência de cada unidade, *decision making units* (DMU). Os resultados mostram que o tipo de manejo transgênico de segunda geração utiliza menos insumos e resultam em menor impacto ambiental, em alguns estados. Os insumos que apresentaram a maior média de possibilidade de redução foram pesticidas e herbicidas, com alvos médios de 27% e 23%, respectivamente. Em relação às categorias de impacto, a que apresentou maior potencial médio de redução foi a toxicidade humana carcinogênica. Mato Grosso, que com manejo convencional obteve o pior índice de eficiência, apresentou a maior estimativa de possibilidade de ganho econômico decorrente de ajustes, equivalente a cerca de R\$ 1 mil por hectare, o que representa uma diminuição de quase 20% do custo total de produção. De forma geral, os resultados da ecoeficiência para os estados e manejos analisados deixaram clara a importância do estudo para mensuração dos pontos operacionais críticos. As informações decorrentes do presente trabalho são de grande importância para apoiar decisões na busca por uma produção agrícola mais eficiente do ponto de vista ambiental e econômico, considerando a possibilidade de redução de custos de produção para operação na fronteira de eficiência.

Palavras-chave: Soja. Ecoeficiência. Avaliação do Ciclo de Vida. Análise Envoltória de Dados.

ABSTRACT

SILVA, K. A. **Eco-efficiency analysis of soybean production in Brazil: an approach using Life Cycle Assessment + Data Envelopment Analysis.** 2023. Thesis (PhD) São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2023.

Eco-efficiency is a concept that refers to the ability of maximizing productive efficiency, minimizing the environmental impact of economic activities. Given that soybean is one of the main agricultural commodities produced in the country, the study of the eco-efficiency of soy may help minimize several negative environmental impacts of its production, contributing to the protection of biodiversity, water resources and soil, and to the reduction of greenhouse gas emissions. Using data from Agriannual for the 2021/2022 harvest of ten Brazilian states and for three different systems of crops, the three steps life cycle analysis + data envelopment analysis methodology was applied to calculate eco-efficiency. The first and second steps involve the creation of a life cycle inventory and the environmental impact assessment of each studied unit, respectively. With the results of the inventories and impact categories, the third step is the implementation of the DEA model to find the efficiency score of each unit (DMU). The results show that second-generation transgenic management uses fewer inputs and results in lower environmental impact in some states.. The inputs that presented the highest average possibility of reduction were pesticides and herbicides, with average targets of 27% and 23%, respectively. Regarding the impact categories, the one with the highest average potential for reduction was carcinogenic human toxicity. Mato Grosso, which with conventional crop obtained the worst efficiency index, presenting the highest possible economic gain resulting from adjustments, equivalent to approximately R\$ 1 thousand per hectare, which represents a decrease of almost 20% of the total cost of production. In general, the eco-efficiency results for the analyzed states and crops made clear the importance of the study for measuring the critical operational points. The results of this work are of great importance to support decisions in the search for a more efficient agricultural production from an environmental and economic point of view, considering the possibility of reducing production costs for operation on the efficiency frontier.

Keywords: Soybean. Eco-efficiency. Life cycle analysis. Data envelopment analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação bem-estar e uso da natureza, no futuro	14
Figura 2 - Fases da ACV	19
Figura 3 - Indicadores do ReCipe.....	22
Figura 4 - Fronteira eficiente de produção das DMUs	31
Figura 5 - Etapas ACV + DEA de três passos.....	35
Figura 6 - Etapas ACV + DEA de cinco passos	35
Figura 7 - Atividades do sistema de produto da soja.....	39
Figura 8 - Fronteira do sistema de produto.....	40
Figura 9 - Cobertura geográfica para os estados do Brasil.....	41
Figura 10 - Perfil ambiental da produção de soja no Mato Grosso com manejo convencional.....	62
Figura 11 - Análise de correlação entre as categorias de impacto.....	64
Figura 12 - Modelo DEA implementado	65
Figura 13 - Escores de eficiência por unidade e tipo de manejo	66
Figura 14 - Escores de eficiência por unidade e tipo de manejo	67
Figura 15 - Comparação entre os sistemas transgênicos	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Indicadores e fatores de caracterização das categorias de impacto do método ReCiPe 2016 midpoint.....	51
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estrutura ISO aceita para a ACV traduzidas para a ABNT	18
Tabela 2 - Características dos principais modelos matemáticos do DEA	31
Tabela 3 - Propriedades referentes à 1quilograma de soja	43
Tabela 4 - Composição dos principais fertilizantes.....	44
Tabela 5 - Composição dos principais defensivos agrícolas.....	44
Tabela 6 - Consumo médio de diesel por atividade agrícola.....	45
Tabela 7 - Parâmetros utilizados para o cálculo da lixiviação de nitrato	48
Tabela 8 - Quantidade de metal pesado em cada tipo de fertilizante e corretivo (em mg.kg-1)	49
Tabela 9 - Quantidade de metal pesado na soja (em mg.kg-1).....	49
Tabela 10 - Dados da mudança do uso da terra disponibilizadas pelo BRLUC.....	50
Tabela 11 - Principais inputs do inventário da soja.....	55
Tabela 12 - Resultados das avaliações dos impactos ambientais	59
Tabela 13 - Metas de redução para as DMUs ineficientes	68
Tabela 14 - Potencial de ganhos econômicos com base nas metas de redução.....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Soja.....	7
2.2	A soja no Brasil.....	7
2.3	Aspectos ambientais da produção de soja.....	8
2.3.1	Produção de Soja no Sistema Agricultura Convencional	9
2.3.2	Produção de soja transgênica primeira e segunda geração	11
2.4	Ecoeficiência	14
2.4.1	Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória de Dados	15
2.4.2	Avaliação do ciclo de vida	18
2.4.3	Modelo de caracterização.....	21
2.4.4	Avaliação do Ciclo de Vida para a Soja.....	26
2.4.5	Análise Envoltória de Dados.....	29
2.4.6	Análise envoltória de dados na agricultura	32
3	MÉTODO.....	35
3.1	Avaliação do ciclo de vida – ACV	36
3.1.1	Definição de objetivo e escopo	36
3.1.2	Análise do inventário do ciclo de vida.....	42
3.1.3	Análise de impacto do ciclo de vida	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Análise dos inventários	53
4.2	Análise do Impacto do Ciclo de Vida	56

4.3	Análise da ecoeficiência.....	62
4.4	Análise dos sistemas transgênicos	71
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE - INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA.....	85

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é a união de técnicas aplicadas no solo para o cultivo de vegetais destinados à alimentação humana e animal, produção de matérias-primas e ornamentação. É uma atividade produtiva de grande importância para o homem. Existem três fatores ligados à produção agrícola: o fator físico, como o solo e o clima; o fator humano, que corresponde à mão de obra em seu desenvolvimento; e o fator econômico, que se refere ao valor da terra e o nível de tecnologias aplicadas na produção.

A soja (*Glycine max*) é um dos produtos fundamentais para a agricultura brasileira, ocupando uma reconhecida posição no mercado agroindustrial do país. A ampliação de sua importância no mercado deve-se ao fato de seu grão ser uma das principais fontes de consumo, além de reunir importantes qualidades nutricionais, funcionais, proteína, lipídio e outros constituintes. Estes fatos culminam em aumento crescente da demanda pelo produto. Anteriormente esse aumento de oferta permitia que a cultura seja uma fonte geradora de divisas econômicas para os países produtores. É a oleaginosa mais produzida no Brasil, com 40.921,9 milhões de hectares (ha) cultivados, tendo uma produtividade média de 3.026 kg ha⁻¹ e com produção total de 123.829,5 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2022).

A soja é produzida em um sistema de agricultura baseado no uso de energia fóssil, insumos industriais, fertilizantes químicos, agrotóxicos, mecanização, variedades geneticamente modificadas de alto potencial produtivo, tecnologias diversificadas, além de muitos outros recursos não-renováveis. Por isso, os problemas sociais e ambientais resultantes de alguns modelos agrícolas têm sido amplamente relatados, como o declínio da fertilidade do solo, intoxicação de pessoas e animais por produtos tóxicos, contaminação do solo e da água, erosão e assoreamento dos rios, e diminuição da biodiversidade (CAVALETT, 2009).

Os danos ambientais estão diretamente ligados ao uso dos insumos agrícolas. No entanto, apesar de existir uma preocupação com relação à produção mais sustentável, existe uma dificuldade em estimar e mensurar os impactos ambientais provocados pelos sistemas produtivos (ARAÚJO E SILVA 2021).

Especialmente no setor agrícola, o desafio de alcançar processos mais eficientes requer um bom entendimento da relação entre a agricultura e o meio ambiente. Existe, portanto, uma forte necessidade de estudos que permitam a avaliação integrada do desempenho ambiental da agricultura, a fim de identificar quantitativamente os pontos críticos na cadeia produtiva que representam o maior impacto ambiental e que podem ser objeto de melhorias.

Nesse contexto, a ecoeficiência tem sido cunhada na literatura como uma ferramenta que permite quantificar impactos ambientais e econômicos concomitantemente. O conceito de ecoeficiência está ligado à minimização dos impactos ambientais na produção de bens e serviços por meio da utilização de menos recursos, o popularmente conhecido “fazer mais com menos” (WBCSD, 2005).

A ecoeficiência tem o intuito de gerar mais produtos e serviços com um menor uso de recursos, gerando redução de resíduos e poluentes e, assim, promover atitudes ambientalmente responsáveis (REBOLLEDO-LEIVA et al., 2021). Para mensurar a ecoeficiência, várias técnicas têm sido aplicadas. Dentre elas, o uso combinado da avaliação do ciclo de vida (ACV) e análise envoltória de dados (DEA) tem obtido êxito para medir a ecoeficiência da produção agrícola, como laticínios (IRIBARREN et al., 2011; JAN et al., 2012), produção de uva (VAZQUEZ-ROWE et al., 2012; MOHSENI; BORGHEI; KHANALI, 2018), cultivo de soja (MOHAMMADI et al., 2013), cultivo de arroz (MOHAMMADI et al., 2015), produção de trigo (MASUDA, 2016), cultivo de algodão (ULLAH et al., 2016), cultivo de colza e girassol (FORLEO B.; PALMIERI, 2018), entre outros.

A combinação ACV + DEA promove uma forma de avaliar a ecoeficiência por meio da quantificação dos impactos ambientais e da eficiência operacional. Enquanto a ACV avalia os impactos ambientais associados ao produto em todo o seu ciclo de vida, a DEA utiliza essas informações para mensurar a eficiência de cada unidade avaliada, fornecendo metas ambientais e econômicas para aquelas classificadas como ineficientes.

O *framework* ACV + DEA tem ganhado espaço na literatura do setor agrícola, para avaliação da sua ecoeficiência devido às características complementares dos métodos, que contam com a avaliação dos impactos ambientais em conjunto com uma análise operacional e econômica de todo o ciclo produtivo. Mensurar a ecoeficiência de um produto pelo uso conjunto dessas ferramentas é uma das maneiras de se avaliar as consequências das escolhas feitas durante todo o ciclo produtivo.

No Brasil, ambas as metodologias já foram aplicadas separadamente em diferentes tipos de produções agrícolas. Para a soja, em especial, diversas ACVs já foram realizadas para regiões brasileiras (MILAZZO et al. 2013; CLAUDINO et. al. 2013; ESTEVES et. al 2016; CAVALLET et. al 2010; BARDEN et.al 2017; RAUCCI et. al 2015; REICHEL et. al 2012; CASTANHEIRA et. al 2012; PRUDÊNCIO DA SILVA et. al 2012; ZORTEA 2015; MATSUURA et. al 2015; MENDES 2015). Da mesma forma, a eficiência da agricultura também foi avaliada utilizando a abordagem DEA (MANGABEIRA ,2002; TEIXEIRA, 2020; JUNIOR et. al 2014; LOGICON, 2017; SOUZA et.al 2022; SILVA et.al 2022).

No entanto, de acordo com a bibliografia estudada, essa é a primeira iniciativa de aplicação conjunta das metodologias a fim de mensurar a ecoeficiência e fornecer metas ambientais e econômicas para a produção de soja em regiões brasileiras, e para três tipos diferentes de manejo: o convencional, transgênico primeira geração e transgênico segunda geração.

A principal diferença entre os três tipos de manejo é a introdução de genes de outras espécies para aumentar a tolerância da planta ao uso de herbicidas, diminuindo, assim, a quantidade do uso de defensivos agrícolas e o tempo de operações com maquinários.

Há também resistência a pragas e doenças que na agricultura, é desejável desenvolver culturas que sejam mais resistentes a pragas e doenças, para reduzir perdas na produção de alimentos e minimizar o uso de pesticidas. Nesse contexto, é identificado genes em plantas que conferem resistência a pragas e doenças. Esses genes podem ser inseridos em outras variedades de plantas por meio de técnicas como a genética, com o objetivo de conferir resistência a esses problemas.

Existe também a resistência à seca, que em muitas regiões do mundo, a escassez de água é um desafio significativo para a agricultura. Nesse sentido, têm buscado identificar genes em plantas que conferem resistência à seca. Esses genes podem estar envolvidos em mecanismos como a capacidade de reter água nas células, a tolerância à falta de água ou a capacidade de utilizar água de forma mais eficiente. A introdução desses genes em culturas pode auxiliar na adaptação a condições de escassez hídrica.

E a avaliação da ecoeficiência separada por tipos de manejo permite avaliar se o uso do melhoramento genético ameniza de alguma forma os impactos ambientais causados durante o ciclo produtivo.

Os dados para elaboração do presente trabalho foram obtidos a partir, principalmente, da base de dados Agriannual. Foram coletados dados relacionados à quantidade produzida e custos da safra agrícola de 2021/2022 para os três tipos de manejo, para 10 estados brasileiros: Bahia (BA), Goiás (GO), Maranhão (MA), Minas Gerais (MG), Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS), Paraná (PR), São Paulo (SP), Rio Grande do Sul (RS) e Tocantins (TO). A escolha dos estados foi feita de acordo com a disponibilidade dos dados na base do Agriannual.

Para o cálculo da ecoeficiência, implementou-se a metodologia ACV + DEA de três passos proposta por Lozano et al. (2009). Tal abordagem é composta de três fases principais: (i) realização do inventário de ciclo de vida de cada unidade estudada, (ii) avaliação dos impactos ambientais de cada unidade, (iii) cálculo da ecoeficiência utilizando os principais

inputs dos inventários e impactos ambientais como entrada no modelo DEA, e a produtividade como única saída.

Para o desenvolvimento dos dois primeiros passos, a elaboração dos inventários e análise dos impactos do ciclo de vida, foi utilizado o *software* Simapro, em parceria com a Embrapa, e o método para avaliação dos impactos foi o ReCiPe *Midpoint*. O intuito principal do método ReCiPe é transformar a longa lista de resultados do inventário do ciclo de vida em um número limitado de indicadores. A aplicação do DEA foi feita no *software* R utilizando o pacote *deaR*, que permite executar uma ampla variedade de modelos baseados em análise envoltória de dados.

Além do *ranking* de ecoeficiência, a DEA também permite a obtenção de metas de redução das entradas (insumos e impactos ambientais) para as unidades classificadas como ineficientes, utilizando como *benchmark* as unidades eficientes. Com base nas metas calculadas e os custos médios unitários dos principais insumos, é possível também mensurar os potenciais ganhos econômicos caso as unidades operassem de maneira ecoeficiente.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo **avaliar a ecoeficiência de estados produtores de soja do Brasil para três tipos de manejo diferentes**. Ao avaliar a ecoeficiência da produção de soja, será possível identificar oportunidades de redução de impactos ambientais, contribuindo para a minimização dos impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente. Isso, além de buscar formas para aumentar a eficiência produtiva e econômica, pois o uso mais eficiente de recursos naturais pode levar a uma redução nos custos de produção e, conseqüentemente, a um aumento da rentabilidade.

Além deste capítulo introdutório, a presente tese apresenta outros quatro capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica do trabalho, que é composta pela caracterização da soja no Brasil, mapeamento dos impactos ambientais da soja, apresentação dos tipos de manejo, estudo do conceito da ecoeficiência e da metodologia ACV + DEA, além de uma revisão bibliográfica dos trabalhos que aplicaram ambas as metodologias na cultura da soja.

O Capítulo 3 apresenta o método do trabalho, que é composto pelos três passos: elaboração do inventário do ciclo de vida, avaliação do impacto ambiental e implementação do modelo DEA. Assim o capítulo está dividido em duas partes principais, a primeira apresentando os passos e premissas da avaliação do ciclo de vida, e a segunda apresentando a estrutura do modelo DEA.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões de cada um dos três passos do método.

Finalmente, o Capítulo 5 aborda as conclusões gerais desta tese. O objetivo deste capítulo é alinhar os resultados encontrados nos capítulos anteriores, discorrer sobre as limitações encontradas e oportunidades de pesquisa que podem ser consideradas por estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma análise geral dos aspectos ambientais da soja no Brasil; características principais da produção de soja nos sistemas de manejo convencional e transgênico; conceitos de ecoeficiência; metodologia da análise do ciclo de vida e metodologia da análise envoltória de dados.

2.1 Soja

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é uma planta herbácea, pertencente à família Fabaceae, ordem Fabales, da classe Rosidae. As principais variedades comerciais apresentam caule hispido e raiz com eixo principal ramificado. As folhas são trifoliadas, e suas flores possuem fecundação autógama. As vagens são levemente arqueadas e apresentam inflorescências determinadas, indeterminadas ou intermediárias. A estatura pode variar entre 60 a 110 cm em condições ambientais ideais (NEPOMUCENO et. al, 2008).

A soja se adapta melhor às regiões de temperatura entre 20 graus Celsius e 30 graus Celsius, sendo a temperatura ideal para o seu desenvolvimento de aproximadamente 30 graus Celsius. Regiões com temperaturas iguais ou abaixo de 10 graus Celsius comprometem o crescimento vegetativo da oleaginosa, chegando a ser nulo.

A leguminosa tem ciclo anual que dura entre 90 a 160 dias, se adapta geralmente ao clima subtropical. Devido aos programas de melhoramento genético, passou a ser cultivada em diferentes latitudes. Assim, grande parte da área cultivada dessa oleaginosa localiza-se em latitudes maiores do que 30°, onde há predominância de clima temperado, favorecendo o cultivo do grão (ALMEIDA et al., 1999).

A soja representa um dos cultivos mais importantes para o mercado agroindustrial do Brasil. “Com a soja se produz mais proteína por hectare do que qualquer outro grande cultivo. Nos últimos 50 anos, a produção de soja aumentou de 27 para 269 milhões de toneladas” (FILHO & COSTA, 2016).

2.2 A soja no Brasil

A soja é cultivada em todas as regiões do Brasil, embora com predominância nas Regiões Sul e Centro-Oeste, correspondendo a 93% da produção. Na Região Norte, a soja é

cultivada no Tocantins, no sul do Pará, em Roraima e em Rondônia. No Nordeste, ela está presente nos Estados do Maranhão, do Piauí, da Bahia e de Alagoas. No Sudeste, é cultivada em São Paulo e Minas Gerais (MANUAL DE SEGURANÇA E QUALIDADE PARA A CULTURA DA SOJA, 2005).

Nos últimos anos, o Brasil ganhou uma posição de destaque na produção e exportação de soja devido à modernização da lavoura e à capacidade competitiva, tornando a soja o principal produto do agronegócio brasileiro e o item de maior importância da pauta de exportações do Brasil. Por conta da grande exposição ao mercado internacional, o comércio da soja é feito a preços transparentes, efetivado, principalmente, pela Bolsa de Mercadorias de Chicago.

Grande parte da oferta de tecnologia para a soja brasileira é desenvolvida pela Embrapa Soja que é, historicamente, o principal gerador de inovações ou adaptações tecnológicas dessa cultura. Além dessa instituição, diversas organizações públicas e privadas concorrem para que o Brasil detenha tecnologia própria e seja o principal gerador de inovação na produção de soja.

Analisando alguns dados referentes à cultura, observa-se que para a safra 2021/22, as exportações alcançaram 77 milhões de toneladas, e estão dentro da base de cálculo estatístico. Nos últimos quatro anos, a relação produção/exportações foram: em 2017/2018 correspondendo a 67,55%; em 2018/2019 correspondendo a 61,87%; em 2019/2020 correspondendo a 66,46% e em 2021/2022 correspondendo a 62,33% de produção/exportação (MAPA, 2022).

Os principais estados produtores de soja foram em ordem decrescente, Mato Grosso com 31,8% da produção, Goiás com 12,5 % da produção, Paraná com 10,2 % da produção, Rio Grande do Sul com 7,8 % da produção, Mato Grosso do Sul com 7,3% da produção, Minas Gerais com 6,4 % da produção, Bahia com 6,1 % da produção, São Paulo 3,9% e Maranhão com 2,9% da produção (IBGE, 2022).

2.3 Aspectos ambientais da produção de soja

A produção agrícola tem como principal elemento a utilização do solo. Trata-se de um componente básico, um substrato que possui materiais orgânicos e minerais indispensáveis tanto para a sobrevivência quanto para o desenvolvimento do cultivo de plantas (EMBRAPA, 2014).

Diante da utilização desregulada de sistemas de plantio, a degradação deste recurso é um dos maiores problemas ambientais derivados da prática agrícola, gerando esgotamento da fertilidade natural da terra (PUGLIESE, 2007).

No Brasil, parte da soja é produzida usando o manejo convencional, onde a quantidade de fertilizantes usada na produção baseia-se em valores médios e na própria experiência do agricultor, o que resulta em áreas que recebem quantidades diferentes das necessárias (TOMADON JUNIOR, 2015).

O uso indevido de fertilizantes traz efeitos prejudiciais não só ao ambiente, mas também para a própria cultura da soja, causando o declínio da fertilidade do solo, contaminação de pessoas e animais por produtos tóxicos, contaminação do solo e da água, erosão com posterior assoreamento dos rios, diminuição da biodiversidade, além das mudanças climáticas relacionadas ao desmatamento e às queimadas (REICHEL, 2012). Silva et al. (2020) também destacam que o uso excessivo e inadequado de fertilizantes pode causar a eutrofização de águas, que é um processo causador de poluição nas águas pela adição de fosfato e nitrato na água.

Além de possível contaminação direta, existem também os impactos provocados por resíduos sólidos orgânicos que decorrem da fermentação do material, podendo ocasionar a formação de ácidos orgânicos, como, por exemplo, o chorume - líquido de elevada demanda bioquímica de oxigênio - que é formado com a degradação do material orgânico e a lixiviação de substâncias tóxicas. Essa substância pode provocar a geração de maus odores e a diminuição do oxigênio dissolvido em águas superficiais (SILVA et al., 2020).

Por isso, o foco no aumento da eficiência de produção da soja está ligado a uma forma de manejo mais sustentável, não prejudicando as reservas naturais e minimizando impactos ao meio ambiente (MANTOVANI; FERREIRA, 2000). Silva et al. (2020) destacam algumas diretrizes necessárias para contribuir e minimizar o impacto da agricultura ao meio ambiente: redução na aplicação de fertilizantes em áreas cuja capacidade de suprimento de nutrientes dos solos encontra-se em níveis suficientes; redução no uso de agroquímicos, como inseticidas, fungicidas e herbicidas; minimização ou mesmo a eliminação da aplicação de agroquímicos onde existe potencial para grandes perdas; redução da aplicação de água, em áreas sujeitas a lixiviação; e a melhora no controle da erosão, com redução do escoamento superficial da água (SILVA et al., 2020).

2.3.1 Produção de Soja no Sistema Agricultura Convencional

As sementes de soja que não possuem nenhum tipo de melhoramento genético podem ser denominadas de convencionais. Seu cultivo necessita, em média, cerca de duas a três aplicações de defensivos em mistura e, com isso, há aumento do custo da mão-de-obra e da matéria prima durante todo o processo de produção (DE MELO et al., 2016).

O sistema convencional é feito por meio do método clássico de melhoramento genético, no qual apenas plantas da mesma espécie são utilizadas no processo de cruzamento (EMBRAPA, 2019).

Nesse sistema de manejo, o solo é submetido a operações de preparo antes da semeadura, incluindo operações primárias como, por exemplo, a aração, gradagem pesada e subsolagem, seguidas de operações secundárias realizadas por meio de grades intermediárias ou leves. O objetivo desses procedimentos é deixar o solo pronto para a realização da semeadura (EMBRAPA, 2019).

Essas operações causam uma intensa perturbação na estrutura do solo, rompendo a agregação, invertendo camadas, expondo-o ao sol e à chuva. A exposição ao sol promove aquecimento, morte de microrganismos, aceleração da perda de água, decomposição de resíduos e oxidação da matéria orgânica do solo. Já a chuva, atuando diretamente sobre o solo desnudo, provoca a desagregação, separando partículas primárias (areia, silte e argila), que são carregadas com a enxurrada, promovendo perdas de nutrientes e formação de sulcos de erosão. Além disso, o revolvimento do solo aumenta a emergência de várias plantas daninhas, cujas sementes precisam de luz para germinar (EMBRAPA, 2019).

Como o sistema convencional de agricultura é composto por cultivares não transgênicos, que não passaram por processos de transformação com introdução de genes de outras espécies por meio de métodos de engenharia genética, esse sistema é considerado grandemente dependente de insumos externos, como fertilizantes químicos e agrotóxicos (EMBRAPA, 2019), que, quando utilizados de forma inadequada, podem provocar contaminação de solo, água e ar, além de causar resistência de pragas e aumento das emissões de gases de efeito estufa (SILVA et al., 2020).

No geral, dentre os impactos ambientais causados pela agricultura convencional, destacam-se: uso intenso de máquinas e implementos agrícolas e baixa cobertura do solo; favorecimento de novas espécies de pragas e doenças, e a eliminação dos inimigos naturais das pragas pelo uso inadequado de agrotóxico; uso intensivo de adubos químicos; e os riscos de contaminação de trabalhadores rurais e consumidores por uso indevido de agrotóxico (SILVA et al., 2020).

Um dos motivos para que os produtores deixassem de usar, cada vez mais, sementes convencionais foi por causa do alto custo de herbicidas para plantas daninhas que afetam as propriedades, o difícil controle de pragas que, na maioria das vezes, adquirem resistência aos agrotóxicos obrigando os produtores a aumentarem as dosagens para que a safra de soja convencional não seja perdida. Além do alto custo para a produção e manejo, o uso excessivo

de produtos químicos, afetam drasticamente todo o ambiente natural tornando, então, a soja transgênica como uma melhor opção e solução para o problema, além de garantir maior produtividade (PELAEZ et al., 2004).

A soja convencional é a forma mais comum de produção de soja no mundo, sendo amplamente utilizada na alimentação humana e animal, bem como na indústria de biocombustíveis. No entanto, há crescente preocupação com os impactos ambientais e na saúde humana associados ao uso intensivo de produtos químicos na produção de soja convencional.

2.3.2 Produção de soja transgênica primeira e segunda geração

No Brasil, o melhoramento genético realizado com técnicas de engenharia genética, produzindo organismos geneticamente modificados (OGMs) só foi liberado recentemente por meio da lei 8.974/1995. Só após vários anos de debates e com a aprovação da lei 11.105/2005 de biossegurança, a primeira cultivar de soja geneticamente modificada pode ser comercializada (AMÂNCIO, 2009).

A soja transgênica primeira geração mais cultivada no Brasil é a soja transgênica *Roundup Ready*[®], comumente conhecida como RR1, produzida pela multinacional norte-americana Monsanto. Essa cultivar tem a característica de ser uma planta resistente à aplicação de apenas um tipo de herbicida, o glifosato. Para obter essa resistência, o DNA foi extraído de um organismo e introduzido no tecido meristemático, que tem a capacidade de se dividir em novas células e originar novos tecidos. A proteína é expressa em todos os órgãos da planta, sendo que essa modificação genética não incrementa a produtividade da cultura, ou valor nutricional do grão (MELGAREJO, 2002).

O glifosato é um tipo de herbicida não-seletivo e sistêmico, que possui um amplo espectro, atuando principalmente contra vários tipos de ervas daninhas. Essa característica traz como consequência a facilidade no manejo da cultura, ao permitir um menor número de aplicações de herbicidas, além de controlar as plantas daninhas e a limpeza de áreas antes do plantio de uma cultura (EMBRAPA, 2021).

Dentre os argumentos apresentados para introdução da transgenia na produção da soja, destacam-se: redução do volume de herbicidas utilizados nas lavouras, diminuição dos custos

de produção, diminuição da poluição do meio ambiente e melhor qualidade dos alimentos (ANDRIOLI, 2016).

A soja transgênica segunda geração (RR2 PRO) foi disponibilizada no ano de 2013, e trouxe a mesma tecnologia da primeira geração com incremento da resistência à quatro principais lagartas da cultura, lagarta-da-soja (*Anticarsia gemmatalis*), lagarta-falsa-medideira (*Chrysodeixis includens*), broca-das-axilas (*Crociosema aporema*) e lagarta-das-maçãs (*Chloridea virescens*). Este resultado foi alcançado por meio da inserção de uma proteína Bt (*Bacillus thuringiensis* – Cry1Ac), que passou a fazer parte do pacote tecnológico.

Essas pragas estão presentes em todo o ciclo da soja. Na fase de emergência, podem ser extremamente prejudiciais, levando à morte da planta. Posteriormente, as lagartas causam a desfolha, que reduz a capacidade de fotossíntese e afeta o enchimento de grãos, interferindo diretamente na produtividade das lavouras.

O trabalho de Oliveira et al. (2016) discute a evolução da tecnologia e os principais benefícios e desafios associados ao uso de sementes transgênicas na agricultura, como o aumento da produtividade, a redução do uso de defensivos agrícolas e a resistência de plantas daninhas e insetos. No entanto, também aborda as preocupações com relação à segurança alimentar e ao meio ambiente, bem como as discussões éticas e políticas em torno do tema. O artigo apresenta um panorama da evolução das sementes transgênicas na agricultura e destaca a importância de uma avaliação rigorosa dos impactos dessa tecnologia na sociedade e no meio ambiente.

Silva et.al (2014) analisam os impactos da adoção de soja transgênica na agricultura brasileira, com foco nos aspectos econômicos e sociais. Os autores discutem o aumento da produtividade e da rentabilidade dos produtores de soja transgênica, bem como a redução dos custos com defensivos agrícolas. No entanto, também destacam a concentração de poder de mercado nas mãos de empresas multinacionais de biotecnologia e a dependência dos agricultores em relação a essas empresas. O artigo aborda ainda a questão da segurança alimentar e dos possíveis impactos ambientais associados ao uso de sementes transgênicas. Os autores argumentam que há uma necessidade de uma abordagem mais crítica e abrangente na avaliação dos impactos da adoção de transgênicos na agricultura brasileira. Em resumo, o artigo apresenta uma análise crítica dos impactos da adoção de soja transgênica no Brasil, apontando tanto seus benefícios econômicos como suas preocupações socioambientais.

Souza et.al (2019) abordam os efeitos da adoção de sementes transgênicas na produtividade da soja e no meio ambiente, discutindo as principais características das sementes transgênicas de soja, incluindo sua resistência a herbicidas e insetos, bem como a tolerância ao

estresse hídrico. Eles concluem que a adoção de sementes transgênicas de soja no Brasil levou a um aumento significativo na produtividade e redução nos custos com defensivos agrícolas. No entanto, os autores também destacam as preocupações em relação aos possíveis impactos ambientais associados ao uso de sementes transgênicas, como o desenvolvimento de plantas daninhas resistentes a herbicidas. Eles argumentam que é necessário um monitoramento constante dos efeitos da adoção de transgênicos na agricultura. Além disso, destacam a importância de uma análise crítica dos aspectos econômicos, sociais e ambientais da adoção de sementes transgênicas na produção de soja, sendo necessário um equilíbrio entre os benefícios econômicos da adoção de transgênicos e a necessidade de proteger o meio ambiente.

O artigo "A evolução da tecnologia de sementes transgênicas na soja" apresenta uma revisão sobre a evolução da tecnologia de sementes transgênicas na soja. Os autores discutem as principais características das primeiras sementes transgênicas de soja, que foram desenvolvidas para resistir a herbicidas, como o glifosato. Eles apresentam dados que mostram que a adoção dessas sementes levou a um aumento significativo na produtividade e redução nos custos com defensivos agrícolas. Em seguida, os autores discutem a evolução da tecnologia de sementes transgênicas na soja, incluindo a introdução de novas características, como a resistência a insetos e a tolerância ao estresse hídrico. Eles destacam as vantagens e desvantagens dessas novas tecnologias, bem como os desafios enfrentados na sua implementação. Por fim, os autores abordam a questão da regulamentação e segurança dos alimentos derivados de sementes transgênicas. Eles discutem as normas regulatórias em vigor no Brasil e os estudos realizados para avaliar a segurança dos alimentos transgênicos para consumo humano. Em resumo, o artigo apresenta uma revisão sobre a evolução da tecnologia de sementes transgênicas na soja, discutindo suas vantagens e desvantagens, bem como as questões regulatórias e de segurança alimentar associadas a essa tecnologia (BRAGA et.al 2016).

O artigo de Bueno et.al (2019), intitulado como "O uso de sementes transgênicas na produção de soja no Brasil" analisa o uso de sementes transgênicas na produção de soja no país. Os autores apresentam uma revisão histórica da produção de soja no Brasil, destacando os avanços tecnológicos na agricultura que permitiram a expansão da cultura, como a utilização de sementes melhoradas e a mecanização da produção. Em seguida, os autores discutem as características e vantagens das sementes transgênicas de soja, como a resistência a herbicidas e a tolerância a insetos, e apresentam dados que mostram a sua rápida adoção pelos produtores brasileiros. Os autores também abordam as questões de segurança ambiental e alimentar associadas às sementes transgênicas, apresentando estudos que avaliam os seus impactos no

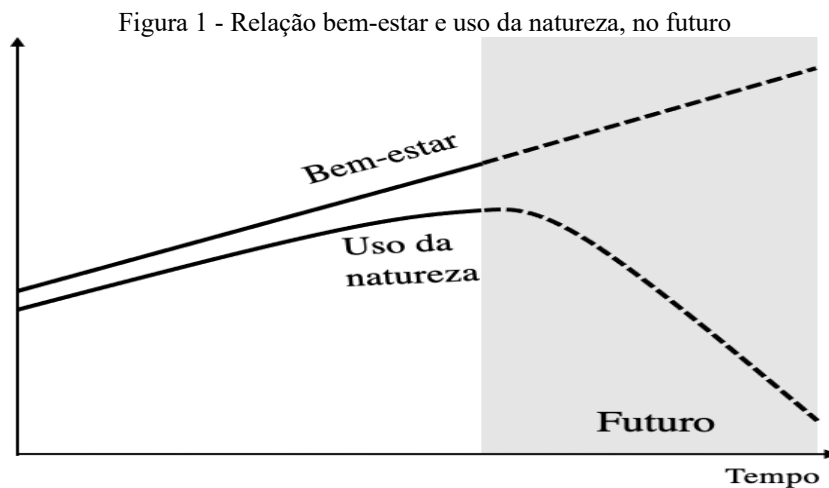
meio ambiente e na saúde humana. Eles concluem que a adoção das sementes transgênicas na produção de soja no Brasil trouxe benefícios econômicos e ambientais, mas que é preciso continuar monitorando e avaliando os seus impactos para garantir a sua segurança e sustentabilidade.

2.4 Ecoeficiência

O guia sobre eficiência WBCSD (2005) define a ecoeficiência como:

Entrega de produtos com preços competitivos e serviços que atendem às necessidades humanas e trazem qualidade de vida, ao mesmo tempo que reduzem os impactos ecológicos e a intensidade dos recursos ao longo do ciclo de vida, para um nível pelo menos em linha com a capacidade de carga estimada da Terra (p.3).

De acordo com a OECD (2005), a ecoeficiência pode ser definida como "a eficiência na utilização dos recursos ecológicos para satisfazer as necessidades humanas". A Agência Europeia do Meio Ambiente (EEA) também a define como "mais bem-estar, menos impacto ambiental", indicando que é possível alcançar isso através da redução da utilização de recursos e da emissão de poluentes, sem comprometer o bem-estar geral (figura 01).



Fonte: Adaptado de WBCSD (2005)

Ecoeficiência é uma estratégia empresarial que visa maximizar a eficiência do uso de recursos naturais e minimizar os impactos ambientais associados à produção de bens e serviços. A ecoeficiência se concentra em encontrar soluções que equilibrem o uso eficiente de recursos naturais, como água, energia e matéria-prima, com a redução de emissões poluentes, a minimização de resíduos e a preservação da biodiversidade. Em outras palavras, a ecoeficiência busca a otimização do processo produtivo, eliminando desperdícios e reduzindo os impactos

ambientais associados à produção, sem comprometer a qualidade do produto ou o seu desempenho econômico (WBCSD, 1992).

A estratégia de ecoeficiência pode envolver mudanças em todo o ciclo de vida do produto, desde a seleção de matérias-primas e processos de produção até a distribuição, uso e descarte do produto final. Empresas que adotam a ecoeficiência em suas operações tendem a ter um desempenho financeiro melhor e uma imagem mais positiva junto aos consumidores e à sociedade em geral, além de contribuírem para a conservação dos recursos naturais e a proteção do meio ambiente (WBCSD, 1992).

Ou seja, a ecoeficiência direciona seus efeitos para satisfazer às necessidades humanas que contribuam para a qualidade de vida, reduzindo progressivamente o impacto ecológico e a intensidade de utilização de recursos ao longo de todo o ciclo de vida, de maneira que seu nível de uso respeite a capacidade de sustentação para o planeta (DIAS, 2006).

Na concepção de Almeida (2007) os principais elementos da ecoeficiência são:

- Reduzir o consumo de materiais de bens e serviços;
- Reduzir o consumo de energia com bens e serviços;
- Reduzir a dispersão de substâncias tóxicas;
- Intensificar a reciclagem de materiais;
- Maximizar o uso sustentável de recursos renováveis;
- Prolongar a durabilidade dos produtos;
- Agregar valor aos bens e serviços.

Noro et al. (2012) destacam algumas estratégias fundamentais para auxiliar no desempenho ambiental e contribuir para a ecoeficiência: (1) Processos ecoeficientes; (2) revalorização de resíduos e subprodutos; (3) criação de novos e melhores produtos; e (4) alterações das relações entre consumidor e mercado. Estas estratégias auxiliam na melhoria do desempenho ambiental e contribuem para a ecoeficiência.

O estudo de Van Passe (2007) afirma que a ecoeficiência é uma métrica operacional útil para avaliar a sustentabilidade no nível das fazendas e pode vir a ser utilizado como *proxy* para o indicador da sustentabilidade.

2.4.1 Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória de Dados

Várias abordagens buscam mensurar a ecoeficiência com o intuito de reduzir o impacto ambiental de processos industriais. Dentre elas, Vásquez-Ibarra et al. (2020) enfatizam a

utilização conjunta da avaliação do ciclo de vida (ACV) e análise envoltória de dados (DEA), conhecida como ACV + DEA.

A ACV estima os impactos ambientais dos produtos e/ou serviços enquanto a DEA avalia a eficiência do processo de produção fornecendo metas e *benchmarks* para os ineficientes. Desta maneira, tanto o aspecto ambiental quanto o econômico são considerados na avaliação da ecoeficiência. Com isso, é possível identificar melhorias na produção e/ou operação com o intuito de promover ganho de eficiência para as unidades avaliadas, diminuindo assim o impacto ambiental.

Considerando o estudo de Vásquez-Ibarra et al. (2020), existem diversas metodologias que abrangem o ACV + DEA, e dentre elas temos a metodologia três passos ACV+DEA e a metodologia cinco passos ACV + DEA. O método três passos usa variáveis ambientais como entradas do modelo DEA; no método cinco passos os impactos não são incluídos na avaliação DEA, porém são calculados antes e depois da implementação das metas eficientes advindas do modelo.

O estudo de Rebolledo-Leiva et al. (2021), utilizou da avaliação do ciclo de vida e a análise envoltória de dados para avaliação da ecoeficiência. O método pode considerar os subprocessos que estão interrelacionados por meio de produtos intermediários, refletindo uma situação mais realista. O estudo avalia a ecoeficiência de 26 apicultores chilenos, onde um plano de melhorias foi identificado para cada processo, apontando um uso mais eficiente de recursos, alcançando, assim, uma redução da pegada de carbono.

Angulo-Meza (2017) conduziu uma revisão e análise crítica do uso da ACV + DEA para o cálculo da ecoeficiência, destacando o uso dessa metodologia na agricultura, já que existe a facilidade de obtenção de uma avaliação do ponto de vista ambiental e operacional.

O trabalho de Janus (2018) teve como objetivo avaliar o impacto ambiental da produção de soja no Brasil por meio de uma análise de ciclo de vida (ACV) e uma análise de eficiência ambiental (DEA). A ACV foi utilizada para avaliar os impactos ambientais associados a todas as fases do ciclo de vida da soja, incluindo o plantio, colheita, processamento e transporte. A DEA foi utilizada para avaliar a eficiência ambiental dos produtores de soja. Os resultados da ACV indicaram que a produção de soja tem um impacto significativo no meio ambiente, incluindo o consumo de água e a emissão de gases de efeito estufa. Os resultados da DEA mostraram que a maioria dos produtores de soja no Brasil tem baixa eficiência ambiental, o que indica que há espaço para melhorias na sustentabilidade da produção, também avaliou as práticas agrícolas que poderiam melhorar a ecoeficiência da produção de soja, como a utilização de técnicas de plantio direto, a rotação de culturas e o uso de práticas de manejo integrado de

pragas. Essas práticas mostraram-se eficazes em reduzir o impacto ambiental da produção de soja e melhorar a eficiência ambiental dos produtores.

O estudo de Rowe (2012) apresenta uma análise do ciclo de vida ambiental (ACV) e da eficiência ambiental de produção de vinho na Austrália, utilizando a técnica de análise envoltória de dados (DEA). A ACV identificou que as emissões de gases de efeito estufa representam a maior parte do impacto ambiental da produção de vinho, sendo a fase de produção de uvas a principal responsável por essas emissões. Já a análise DEA identificou que as empresas de menor porte são geralmente mais eficientes em termos ambientais, mas que a adoção de práticas sustentáveis também pode aumentar a eficiência ambiental das empresas de maior porte. Os resultados sugerem que a implementação de práticas sustentáveis na produção de vinho pode ajudar a reduzir o impacto ambiental e aumentar a eficiência ambiental das empresas.

Gierulski (2018) avaliou o desempenho da ecoeficiência da agricultura em nível setorial usando a aplicação conjunta de técnicas de avaliação do ciclo de vida (ACV) e análise envoltória de dados (DEA). A pesquisa foi realizada para a produção agrícola dos 28 estados-membros da União Européia (UE-28). A base para o cálculo do desempenho de ecoeficiência foi um conjunto de categorias de impacto derivadas da fase de avaliação de impacto do ciclo de vida como valores de entrada e indicadores econômicos, com o produto interno bruto (PIB) da agricultura, como o valor de saída.

A aplicação conjunta de DEA e ACV permite o *benchmarking* do desempenho ambiental e operacional das embarcações, o que fornece uma base para o direcionamento de meios efetivos de redução dos impactos ambientais caso as metas operacionais determinadas sejam atingidas. O método LCA+DEA proposto para a pesca está de acordo com o conceito de ecoeficiência e surge como uma abordagem simples voltada para a sustentabilidade e não limitada aos impactos ambientais.

A ACV é tradicionalmente focada apenas nos impactos ambientais. Na verdade, a documentação ISO limita o alcance da ACV aos efeitos ambientais. De uma perspectiva de desenvolvimento sustentável, isso pode limitar a capacidade da ACV de apoiar decisões.

Nesse sentido, a metodologia ACV+DEA agrega uma dimensão econômica à avaliação ao avaliar o desempenho operacional das embarcações. Portanto, o uso complementar do DEA fornece ao ACV um maior potencial para apoiar a tomada de decisão, pois facilita o *benchmarking* tanto do desempenho ambiental quanto operacional das embarcações avaliadas.

2.4.2 Avaliação do ciclo de vida

O primeiro passo para aplicação da metodologia ACV + DEA é a elaboração da avaliação de ciclo de vida (ACV). Segundo a ABNT (2001), o ciclo de vida corresponde a todos os estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto, considerando desde a aquisição da matéria-prima até a disposição final. E a ACV é uma técnica que avalia os impactos ambientais de cada processo associado a um produto por todo o seu ciclo de vida, a partir da compilação das entradas e saídas do sistema em estudo.

A ACV avalia o desempenho ambiental do produto abrangendo desde a identificação e a quantificação de energia e de matéria-prima que foram utilizadas no seu ciclo de fabricação até o descarte do produto. Com isso, é possível analisar as emissões para água, solo e ar decorrentes da produção, utilização e disposição final, identificando, assim, pontos de melhoria para otimizar o desempenho ambiental do produto (CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

Ometto (2005) enfatizou que a ACV é a representação de uma importante ferramenta para assistir as etapas do desenvolvimento do produto, incluindo desde a gestão da produção, o pós-uso, a logística convencional e até a logística reversa. Além disso, a ACV permite a visualização das consequências ambientais e recursivas dessas escolhas. Tal método serve para que o produto seja gerado adequadamente e o processo da concepção do produto tenha o intuito da reutilização e reciclagem após seu uso.

A primeira norma da série ISO (*International Organization for Standardization*) para a ACV foi editada em 1997 (ISO, 2006). A Tabela 1 apresenta as atualizações e traduções dessas normas para a ACV.

Tabela 1 - Estrutura ISO aceita para a ACV traduzidas para a ABNT

Norma/Título	ISO	ABNT
NBR ISO 14040	1997	2001
Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura		
NBR ISO 14041	1998	2004
Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Definição do escopo, objetivos e análise do inventário		
NBR ISO 14042	2000	2004
Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Avaliação dos impactos do ciclo de vida		
NBR ISO 14043	2000	2005
Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Interpretação do ciclo de vida		
NBR ISO 14044	2006	2009
Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações		

Fonte: Dados da autora

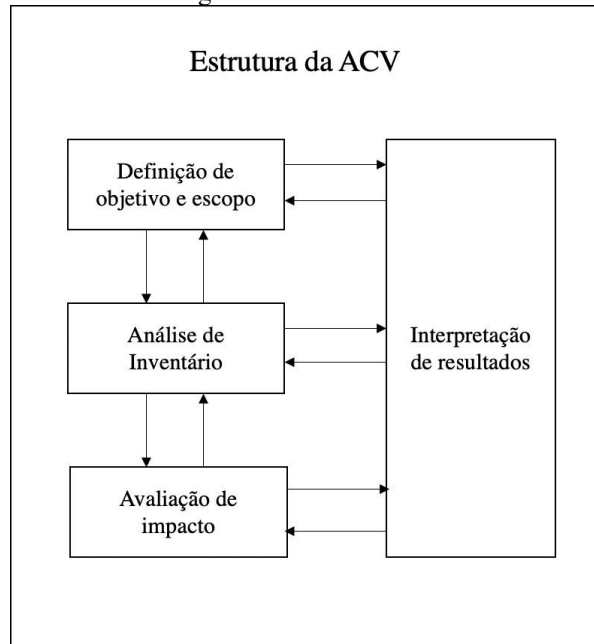
Segundo recomendação da ABNT (2001), a estrutura da ACV é composta por quatro fases (Figura 2): i) definição de escopo e objetivo, ii) análise de inventário, iii) avaliação de impacto e iv) interpretação de resultados.

A primeira fase de definição de objetivo deve incluir os propósitos pretendidos do estudo, bem como o público-alvo, importância do estudo, possíveis aplicações e os requisitos para elaboração do relatório com os resultados.

Conforme Chehebe (2002), na definição de escopo, de uma forma geral, devem ser estabelecidas as três dimensões do estudo:

- Extensão: onde iniciar e parar o ciclo de vida;
- Largura: quantos e quais subsistemas considerar;
- Profundidade: nível de detalhamento do estudo.

Figura 2 - Fases da ACV



Fonte 1: Adaptado ABNT (2001)

A AICV (avaliação de impacto do ciclo de vida) conta com quatro etapas principais:

- coleta de dados: reunião das informações quantitativas e qualitativas de cada unidade que compõe o sistema de produto;
- procedimento de cálculos: elaboração dos cálculos para que os dados coletados na etapa anterior sejam adequados ao fluxo de referência e à unidade funcional;
- alocação: método necessário quando se trabalha com sistemas que envolvem mais de um produto final.
- Interpretação dos resultados

Após a classificação das entradas e saídas inventariadas temos a terceira fase da ACV - avaliação dos impactos. Nessa etapa, os dados do inventário são associados aos impactos ambientais. Segundo a ABNT (1996), entende-se como impacto ambiental qualquer modificação adversa ao meio ambiente. Existem alguns métodos para a realização da avaliação de impactos ambientais dentre eles: *CML*, *Eco-indicator 99*, *Ecological Scarcity*, *EDIP*, *EPS 2000*, *Impact 2002+*, *LIME*, *LUCAS*, *MEEuP*, *ReCiPe*, *TRACI*, *USEtox* e *IMPACT World+*.

A principal diferença entre os métodos são as características e particularidades, pois variam bastante, podendo conferir a tais um grande potencial de interferência nos resultados da AICV e, conseqüentemente, na gestão do ciclo de vida do produto.

Os métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) podem variar em suas características e particularidades, o que pode ter um grande impacto nos resultados e na gestão do ciclo de vida do produto. Algumas das características e particularidades que podem variar entre os métodos de ACV incluem: escopo e limites do estudo, onde os métodos de ACV podem diferir em relação aos aspectos que são incluídos no escopo do estudo. Isso pode envolver a definição de quais etapas do ciclo de vida são consideradas, quais fluxos de materiais e energia são incluídos e quais impactos ambientais são avaliados; o inventário de dados, onde os métodos de ACV requerem a coleta de dados sobre as entradas e saídas de todas as etapas do ciclo de vida do produto. A disponibilidade e a qualidade dos dados podem variar dependendo do método utilizado e da fonte dos dados. Além disso, a interpretação e a alocação dos dados também podem variar entre os métodos; a avaliação de impacto onde, a avaliação de impacto consiste em quantificar os impactos ambientais associados às entradas e saídas do ciclo de vida do produto. Diferentes métodos podem utilizar diferentes categorias de impacto, como mudanças climáticas, uso da água, toxicidade, entre outros. Além disso, os métodos podem atribuir pesos diferentes aos diferentes impactos, refletindo diferentes prioridades e perspectivas; a análise de incerteza onde os métodos de ACV podem tratar a incerteza de diferentes maneiras. Alguns métodos podem incorporar análises estatísticas para quantificar a incerteza nos resultados, enquanto outros podem adotar abordagens mais simplificadas e por fim a interpretação dos resultados onde a interpretação dos resultados do ACV pode variar entre os métodos. Isso pode envolver a comunicação dos resultados de maneira compreensível para diferentes partes interessadas e a tomada de decisões com base nos resultados obtidos.

As fases que compõe a avaliação dos impactos são:

- classificação: distribuição dos resultados do inventário nas categorias de impacto;
- caracterização: conversão dos dados à mesma unidade por meio de fatores de equivalência;

- normalização: normalização dos dados em relação à uma referência;
- agrupamento: reorganização das categorias de impacto, podendo ser de acordo com o seu tipo ou de acordo com uma ordem de importância;
- valoração: conversão dos resultados de cada categoria de impacto a um simples indicado.

A última fase da ACV é composta pela análise dos resultados. Nela são apresentadas todas as conclusões, limitações e recomendações. Essa etapa também envolve um processo iterativo de análise e revisão do objetivo e escopo da ACV, bem como da qualidade, consistência e integridade dos dados coletados (ABNT, 2001).

Dentre algumas das aplicações da ACV sugeridas pela ABNT (1996), ABNT (2001), ABNT (2004a), ABNT (2004b), destacam-se:

- Identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em seu ciclo de vida;
- Tomada de decisões;
- Análise de desempenho ambiental na seleção dos indicadores pertinentes ao estudo;
- Auxílio na visão sistemática de sistemas de produtos interconectados;
- Definição do escopo e objetivo de um determinado estudo;
- Análise, definição e modelagem de sistemas e coleta de dados;
- Disposição de dados de entrada e saída relacionados às emissões à atmosfera, à água e ao solo;
- Identificação de diversos processos relacionados a um sistema de produtos visando a promover melhorias;
- Identificação de oportunidades e no auxílio em melhoria do projeto e/ou sistema de produto.

2.4.3 Modelo de caracterização

Os impactos ambientais podem ser compostos por três emissões advindas da água, solo e ar e podem ser modelados quantitativamente por meio de um modelo de caracterização. Esses modelos de caracterização podem fazer cálculos de substâncias específicas que possam impactar o meio ambiente. O objetivo é relacionar um processo específico a uma unidade funcional e validar os dados obtidos por meio de cálculos precisos.

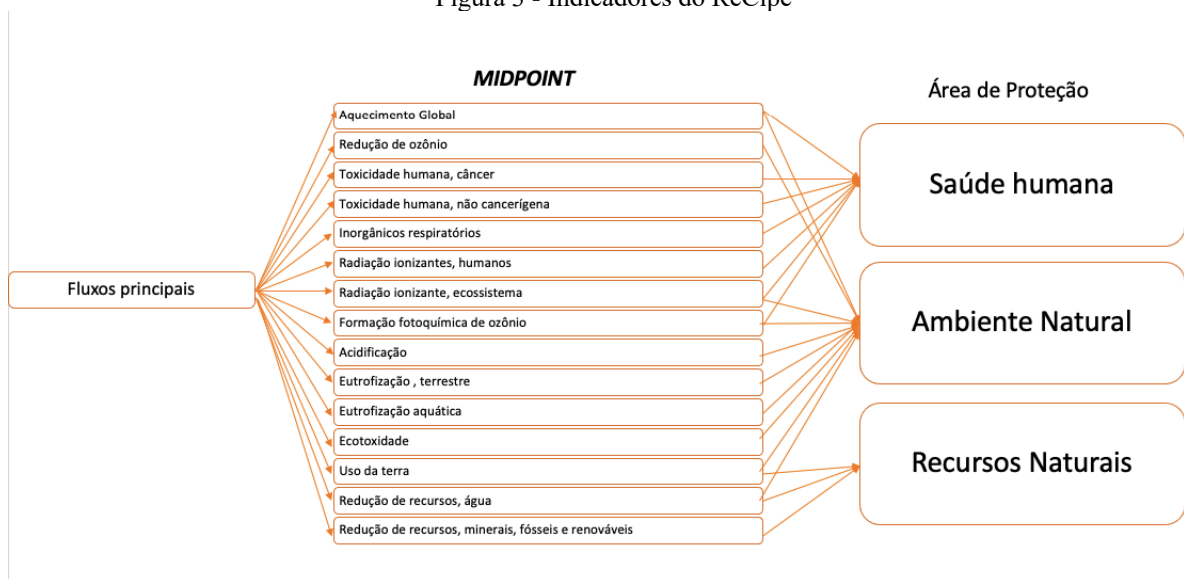
Esses modelos de caracterização são classificados em duas categorias, e se modificam de acordo com a abordagem do estudo em que se queira contemplar. As categorias são conhecidas como *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final).

Na categoria *midpoint* todas as emissões são transformadas em categorias de impacto. Porém, elas não contemplam características finais no percurso ambiental (Cavalett et al., 2012). Na categoria *endpoint*, Cavalett et al. (2012) salientam que a gravidade e as consequências de impactos abordados no *midpoint* podem gerar e interagir negativamente no futuro a longo prazo.

Cada categoria de impacto influencia o meio ambiente de maneiras diferentes. Dessa forma, é necessário escolher as categorias de impactos coerentes com o objetivo do estudo, para que todas as categorias de impacto importantes estejam dentro do estudo e categorias menos importantes não sejam levadas em conta, para que não ocorra excesso de informação (Goedkoop et al., 2013).

Um dos métodos de caracterização mais utilizados na literatura é o método ReCipe. Nele, as categorias de impacto são divididas em 3 grandes áreas de proteção: Saúde humana, Ecossistema ou Ambiente Natural e Recursos Naturais, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Indicadores do ReCipe



Fonte: Adaptado de HAUSCHILD et al. (2013)

Cada uma dessas três áreas é composta de um conjunto de categorias de impacto, totalizando 18 categorias. São elas:

- **Aquecimento Global**

Há quatro principais gases causadores do efeito estufa: gás metano (CH₄), o óxido nítrico (N₂O), o hexafluoreto de enxofre (SF₆), mas é o dióxido de carbono (CO₂) o mais abundante dos gases, sendo emitido como resultado de inúmeras atividades humanas. O CO₂ é

utilizado como referência para classificar o poder de aquecimento global dos demais gases de efeito estufa. Para que as emissões de cada GEE (Gases de efeito estufa) sejam transformadas em emissão de CO_{2eq} utiliza-se o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP). O GWP do dióxido de carbono é utilizado como indicador da categoria de impacto em GEE, sendo assim, todos os outros GEEs são convertidos para CO₂ e através dos fatores de emissão, descrito em diversas publicações do IPCC. Na contabilização das emissões de GEE de um estabelecimento, produto ou serviço são elaborados inventários a fim de levantar todas as emissões relacionadas a uma unidade de referência em estudo – tonelada de produto, quantidade de energia ou prestação de serviços – que resulta numa emissão final dada em massa de CO₂.

O CO₂ equivalente é uma medida utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa, baseada no potencial de aquecimento global de cada um. O dióxido de carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de GEE pelo seu GWP.

- **Depleção de Ozônio**

A camada de ozônio possui a capacidade de bloquear as radiações solares, especialmente a radiação ultravioleta. A excessiva exposição à radiação ultravioleta acarreta no aumento da incidência de câncer de pele, destrói ou inibe o crescimento de espécies vegetais, afetando o ecossistema terrestre. A emissão de CFC (clorofluorcarbono) destrói a camada de ozônio, pois este reage com o O₃. Uma molécula de cloro destrói até 10.000 moléculas de ozônio. A depleção do ozônio ocorre se as perdas de substâncias antropogênicas existentes na atmosfera aceleram a destruição da camada de ozônio. Nesta categoria de impacto, o fator de caracterização leva em consideração a emissão antropogênica das substâncias que destroem a camada de ozônio. O potencial de depleção do ozônio usa o CFC-11 como referência.

- **Acidificação**

A acidificação tanto de solos quanto de águas ocorre predominantemente através da transformação de poluentes do ar, como dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio, em seus respectivos ácidos, H₂SO₄ e HNO₃, levando a uma diminuição no valor do pH da água da chuva, que acaba por causar danos aos ecossistemas resultando, por exemplo, em desmatamento. A acidificação tem efeitos prejudiciais diretos e indiretos, como carreamento de nutrientes ou alteração da solubilidade de metais nos solos, além de danos por corrosão a edifícios, materiais de construção, pedras naturais etc.

- **Eutrofização marinha**

A eutrofização marinha acontece com o aumento excessivos de minerais, neste caso o fosfato e nitrato, devido às ações humanas. Com o acúmulo destes minerais, ocorre uma

acelerada multiplicação de micro-organismos na água, causando uma camada densa na superfície das águas que impossibilita a passagem da luz solar para regiões mais profundas do mar. Desta maneira, este impacto mede estas quantidades de minerais que são encontrados em águas marinhas que podem causar mortes a animais e a plantas aquáticas.

- **Eutrofização de água doce**

A eutrofização de água doce é como conhecemos a forma de poluição que encontramos em rios e lagos. Essa poluição é oriunda de interceptões humanas, principalmente por duas formas: despejo ilegal de esgotos e lixos e a contaminação desses corpos por excesso de agrotóxico utilizados na indústria. Por causa desta poluição uma marcha turva na água causa uma diminuição drástica do nível de oxigênio dissolvido na água e causa morte de animais e plantas aquáticas.

- **Toxicidade humana cancerígena e não cancerígena**

Essa categoria retrata substâncias tóxicas que, no caso da agricultura, advém do uso de pesticidas, herbicidas, fertilizantes, fungicidas etc, que são utilizadas nas plantações para aumentar o desempenho dos grãos. A toxicidade se refere a qualidade e quantidade que uma substância pode apresentar quando se entra em contato com um ser vivo e o impacta de forma negativa, podendo ser inalada, ingerida ou até em contato com a pele, causando doenças e irritações que a longo prazo pode trazer consequências maiores.

- **Formação de oxidantes fotoquímicos**

De acordo com Dutra (2009), os oxidantes fotoquímicos podem ser formados por distintas maneiras por meio da geração de energia. São decorrentes de escapamento dos carros, indústrias químicas, atividades que usam solventes, e atividades que emitem oxônio e óxidos de nitrogênio quando queimados. Estas substâncias em excesso no ar, podem ser ativadas pela luz do sol, formando aglomerados de gases agressivos, denominados assim oxidantes fotoquímicos. O ozônio é o gás mais importante, pois é por meio dele que a quantidade de oxidantes fotoquímicos é medida na atmosfera. Quando em alta quantidade, esses oxidantes podem ser muito prejudiciais à população, provocando danos à saúde, como irritabilidade dos olhos, mucosa nasal e tosse. Quando exposto por vários dias, pode levar à lesão do tecido epitelial das vias aéreas.

- **Formação de material particulado**

O material particulado é empregue para designar misturas de partículas sólidas ou gotas de líquidos que são encontrados na atmosfera. As partículas podem ser grandes ou pequenas, escuras ou claras, visíveis ou não visíveis.

Esse material pode variar também pela forma de origem, podendo ser natural ou artificial. Quando sua origem é natural podem ser partículas que evaporam do mar, poeiras, pólen das plantas e por erupções geotérmicas ou vulcânicas. As queimadas também são consideradas fontes de poluição do ar, causando problemas respiratórios para as pessoas. O principal fator é aumento da inalação de material particulado pela população.

- **Ecotoxicidade de água doce**

A toxicidade (ou ecotoxicidade) é a capacidade de uma determinada substância em causar dano a um organismo (Hobold, 2007). Desta forma, a ecotoxicidade em água doce pode ser entendida como a quantidade de substâncias tóxicas que podem ser encontradas em água doce. Essas substâncias, em suma, são oriundas de agrotóxicos utilizados para prevenir a ação de ervas daninhas e de insetos que possam prejudicar o crescimento das plantas e das colheitas (Ribeiro 32 et al., 2007). Em suma, a ecotoxicidade em água doce é o impacto que se caracteriza por medir a quantidades de substâncias nocivas a seres vivos que são encontrados em águas doces.

- **Ecotoxicidade Terrestre**

É um impacto semelhante à ecotoxicidade em água doce, porém, este impacto relaciona a interação negativa que uma substância possa ter no solo. As substâncias encontradas no solo podem ser provenientes de produtos agrotóxicos e/ou lixos urbanos. Quando estas substâncias entram em contato com o solo, podem deixá-lo impróprio para o plantio devido a retirada de nutrientes do solo.

- **Ecotoxicidade marinha**

Esta categoria rege a vulnerabilidade do ambiente, portanto, qualquer substância que entra em contato com este ambiente pode causar danos negativos. Essas substâncias são ocasionadas das ações humanas, que fazem seu depósito inadvertidamente nesses ambientes, mudando a composição da água e de seus nutrientes que pode levar a morte de plantas, algas e animais marinhos. O potencial desta categoria se dá pelo aumento de substâncias perigosas em águas marinhas.

- **Radiação ionizante**

A radiação ionizada pode ser definida como uma energia que se propaga por um meio; esse meio pode ser diferentes partículas, partícula alfa, os elétrons, os prótons e também pode se apresentar por meio de ondas eletromagnéticas.

De acordo com Okano e Yoshimura (2010) esta radiação ionizante tem a capacidade de retirar o elétron de qualquer átomo que ele entra em contato, fazendo com que este átomo

interaja de forma diferente com outros átomos. O principal indicador é o potencial de radiação ionizante.

- **Uso da Terra**

O uso repetido torna o solo indisponível para alguns fins, e pode também mudar a qualidade do solo em termos de suporte vital ou potencialidade para outros usos voltados à produção agrícola. O principal fator desta categoria é a ocupação e transformação da terra. O uso da terra é relacionado aos fatores naturais, que podem provocar: inundações, enchentes, erosão do solo, perda de moradia e pode levar à morte de animais, plantas e até de seres humanos.

- **Depleção da água**

A água é uma das substâncias mais importantes para a vida dos animais, para as plantas e para todos os seres humanos. Ela também possui uma enorme importância para a produção do país, pois a água é muito importante para o setor agrícola. Para este setor, a falta ou excesso de água pode afetar o crescimento e o rendimento da plantação. O principal fator se dá ao aumento do consumo de água.

- **Depleção de Recursos Fósseis**

A energia mais utilizada atualmente é a oriunda de combustíveis que são originados a partir de petróleo, do carvão ou gás natural. Estas formas de energia são de combustíveis fósseis e o alto consumo deste insumo tem provocado danos ao planeta. Além disso, a maneira de transformação destes insumos em energia gera inúmeros impactos para o ambiente como, por exemplo, a queima de gases poluentes que podem aumentar o aquecimento global ou o efeito estufa, e podem causar desequilíbrio na fauna e flora marinha/terrestre, desmatamento etc.

2.4.4 Avaliação do Ciclo de Vida para a Soja

A soja é matéria-prima tanto para a produção de biodiesel quanto para a produção pecuária. De uma maneira geral, os estudos de ACV têm focado mais as atividades finais, realizando apenas estudos exploratórios a respeito da etapa de produção da soja. Nos estudos feitos por Milazzo et al. (2013) foram avaliados 33 trabalhos relacionados à produção de biodiesel a partir da soja. E entre esses 33 trabalhos, quatro trataram especificamente da produção da soja brasileira. Essa carência de estudos de ACV agrícola no Brasil é discutida em

Claudino et al. (2013) que concluíram, a partir de sua revisão, que a ACV ainda é uma técnica pouco difundida no agronegócio brasileiro. Raucci et al. (2015) também encontraram vários estudos envolvendo a soja, porém poucos que estudaram a etapa da produção do grão.

O trabalho de Esteves (2016) tem como objetivo realizar uma análise do ciclo de vida ambiental (ACV) de diferentes formas de produção de biodiesel no Brasil. O estudo utilizou a metodologia ReCiPe para avaliar o impacto ambiental em diferentes categorias, incluindo mudanças climáticas, acidificação, eutrofização e toxicidade. Os resultados mostraram que a produção de biodiesel a partir de soja tem um maior impacto ambiental do que a produção de biodiesel a partir de outras matérias-primas, como dendê e mamona. Além disso, a utilização de biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, bem como a dependência do petróleo importado. O estudo de Esteves (2016) conclui que a produção de biodiesel pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e para a promoção da sustentabilidade ambiental, desde que sejam adotadas práticas sustentáveis em todas as etapas do processo de produção.

O trabalho de Cavalett et al. (2010) teve como objetivo analisar a qualidade de estudos de análise de ciclo de vida (ACV) publicados na área de energia renovável, com foco na observância das normas e critérios estabelecidos pela ISO 14040 e 14044. A revisão da literatura revelou que muitos estudos não seguem as normas estabelecidas, o que pode comprometer a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos. Os autores identificaram que muitos estudos não apresentam informações completas sobre as etapas do ciclo de vida analisado, a escolha dos indicadores de impacto ambiental e a justificativa das suposições e limitações adotadas. Além disso, muitos estudos não realizam uma análise crítica dos resultados obtidos, o que dificulta a comparação entre diferentes estudos e a identificação das melhores práticas em termos de sustentabilidade ambiental. Cavalett et al. (2010) concluíram que é fundamental seguir as normas e critérios estabelecidos pela ISO 14040 e 14044 para garantir a qualidade e a comparabilidade dos resultados da ACV, bem como promover a adoção de práticas sustentáveis em diferentes setores da economia.

O trabalho de Barden et al. (2017) teve como objetivo realizar uma análise do ciclo de vida ambiental (ACV) da produção agrícola de milho e soja nos Estados Unidos, incluindo as emissões de gases de efeito estufa, uso da terra, energia e água. Os resultados indicam que a produção de milho e soja nos EUA contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, especialmente devido ao uso de fertilizantes nitrogenados e combustíveis fósseis. A ACV também mostrou que o uso da terra e da água é uma preocupação importante na produção agrícola, especialmente em regiões com escassez de água. Além disso, os resultados

indicam que as práticas de gestão sustentável, como a utilização de práticas de conservação de solo e a redução da quantidade de fertilizantes nitrogenados, podem reduzir significativamente o impacto ambiental da produção agrícola de milho e soja. Barden et al. (2017) concluíram que a ACV é uma ferramenta importante para avaliar a sustentabilidade ambiental da produção agrícola e identificar oportunidades para melhorar a eficiência e reduzir o impacto ambiental da produção agrícola de milho e soja nos Estados Unidos.

Raucci et al. (2015) executaram uma ACV da produção de soja no estado de Mato Grosso, de acordo com as normas ISO. O trabalho realizou a ACV individualizada de cada fazenda, num total de 55 fazendas e a análise considerou a média do resultado. O estudo de Raucci et al. (2015) abordou apenas os gases de efeito estufa, não levando em consideração as outras categorias de impacto.

Reichel et al. (2012), elaborou uma ACV desde a aquisição de matéria-prima até o impacto de fim de vida no processo produtivo da soja. Buscou medir o nível de energia e determinar as principais matérias primas utilizadas. O estudo aconteceu no Paraná na safra de 2010/2011. O resultado principal veio da fase agrícola, onde constatou que os efeitos antrópicos são elevados quando comparados a quantidade de insumos e energia e o nível de emissão de CO₂ para o meio ambiente, representando cerca de 90% das emissões.

Em contrapartida, Castanheira (2013) analisou a mudança do uso da terra em seu trabalho e simulou 45 diferentes cenários para a produção de soja no Brasil e na Argentina. Os cenários analisados pelos mesmos incluem mudança de uso da terra e diferentes formas de cultivo. A conclusão destes autores é que a mudança do uso da terra é o fator de maior importância nos valores finais de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

O trabalho de Prudêncio da Silva et al. (2010) tem como objetivo realizar uma análise do ciclo de vida (ACV) de uma fábrica de papel utilizando a metodologia CML 2001. A ACV é realizada em todas as etapas do ciclo de vida do papel, desde a extração da matéria-prima até a disposição final do produto. Os resultados indicam que a etapa de produção de celulose é a que contribui com a maior parte do impacto ambiental, especialmente em relação ao consumo de água e energia e às emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. A disposição final do produto também é uma preocupação, uma vez que a incineração do papel gera emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. Prudêncio da Silva et al. (2010) também identificaram que a redução do consumo de água e energia e a utilização de fontes renováveis de energia podem reduzir significativamente o impacto ambiental da produção de papel. A ACV realizada com a metodologia CML 2001 permite uma análise completa e detalhada do ciclo de

vida do papel, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisões em relação à melhoria da sustentabilidade ambiental da produção de papel.

Nos estudos de Zortea (2015), foi realizada uma análise do ciclo de vida (ACV) da produção de biodiesel de soja na região sul do Brasil, avaliando os impactos ambientais em todas as etapas do ciclo de vida do produto. A ACV foi realizada de acordo com a metodologia da ISO 14040/44, considerando os impactos em categorias como mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, consumo de recursos naturais, entre outros. Os resultados indicam que a produção de biodiesel de soja apresenta impactos significativos na mudança climática e na eutrofização, principalmente devido ao uso de fertilizantes e combustíveis fósseis. A ACV também identificou que as etapas de produção de óleo de soja e a aplicação de fertilizantes são as que mais contribuem para os impactos ambientais, enquanto a etapa de transporte é a que apresenta menor impacto. Zortea (2015) conclui que a ACV é uma ferramenta valiosa para avaliar a sustentabilidade ambiental da produção de biodiesel de soja e identificar oportunidades para melhorar a eficiência e reduzir os impactos ambientais associados à produção do biocombustível.

Um outro trabalho de Matsuura, et.al (2015) buscou comparar a ACV dos cultivos de soja e girassol, na região de Parecis no Cerrado Brasileiro. Dentre as categorias de impacto que mais se destacaram em ambas as culturas estão acidificação terrestre, aquecimento global e formação de material particulado. Além disso, o estudo mostrou que a associação das culturas pode reduzir os impactos ambientais devido ao compartilhamento de recursos, beneficiando o meio ambiente.

Outro estudo relevante da produção de soja é o de Mendes (2013) que analisou os inventários do ciclo de vida da produção de soja e a representatividade dos dados no contexto brasileiro. Foram analisados inventários para as principais regiões sojícolas do país, abrangendo 25 microrregiões, 17 regiões edafoclimáticas e 11 unidades federativas do Brasil. As principais diferenças encontradas foram em relação ao uso de fertilizantes, pesticidas, corretivos do solo, consumo de água e energia.

Os resultados do trabalho de Mendes (2013) reforçam a necessidade de explorar as diferenças de eficiência no uso de insumo naturais e agrícolas para a produção de soja, num nível regional, para o Brasil, conforme este estudo apresenta.

2.4.5 Análise Envoltória de Dados

A eficiência é definida como a capacidade de se utilizar, da melhor forma possível, os meios disponíveis e as condições estruturais, com o intuito de obter um desempenho ótimo. Consegue-se medir a eficiência de um sistema pela divisão entre um indicador de desempenho do sistema e o valor máximo que esse indicador poderia alcançar.

Os diversos tipos de sistemas onde é possível utilizar o conceito de eficiência são chamados Unidades Tomadoras de Decisões (*Decision Making Units - DMUs*), que se considera produzem um conjunto de saídas - *outputs* - a partir de um conjunto de entradas - *inputs*. A relação entre os conjuntos de entradas e saídas dá origem ao conceito de “eficiência produtiva”, que é baseada no indicador de desempenho chamado de “produtividade”. Esse indicador carrega a relação entre os *outputs* e *inputs* de uma DMU (MARIANO; ALMEIDA; REBELATTO, 2010).

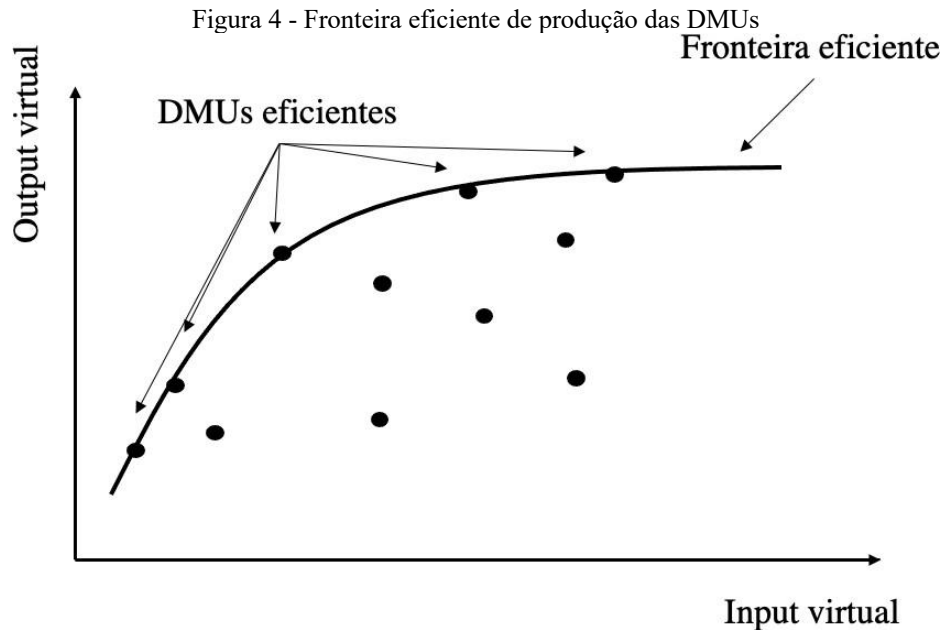
As duas classes de técnicas de análise de eficiência produtiva são:

- As paramétricas: que são apoiadas numa função produção, que relaciona os *inputs* às quantidades médias de *outputs* que eles podem produzir;
- As não-paramétricas: que não necessitam da determinação da função produção, pois se baseiam no conceito de fronteira de eficiência.

Dentre as técnicas não-paramétricas, têm-se como uma das mais importantes a Análise Envoltória de Dados (DEA) (MARIANO; ALMEIDA; REBELATTO, 2010).

A Análise Envoltória de Dados (DEA) foi desenvolvida por CHARNES, COOPER e RHODES (1978), e é uma metodologia que usa programação linear para calcular eficiências das Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs), levando em conta diversos *inputs* e *outputs*. A DEA tem como enfoque a programação matemática que possibilita estimar a eficiência relativa mediante uma fronteira de eficiência. Assim, as unidades consideradas eficientes estarão contidas na fronteira enquanto que as ineficientes se localizarão abaixo dela (MARIANO; ALMEIDA; REBELATTO, 2006), conforme ilustrado na Figura 4.

O DEA é composto por várias etapas e existem diversos modelos que podem ser utilizadas, dentro desse método, para realizar a análise de eficiência (MARIANO; ALMEIDA; REBELATTO, 2006).



Fonte: Adaptado de Mariano, Almeida e Rebelatto (2006)

A principal diferença entre os modelos matemáticos é em relação ao formato da fronteira e ao tipo de retorno à escala. Os principais modelos são CCR, BCC, multiplicativos variante e invariante e aditivo (MARIANO; ALMEIDA; REBELATTO, 2006). Na Tabela 2 são apresentadas as principais características e diferenças desses modelos.

Tabela 2 - Características dos principais modelos matemáticos do DEA

Modelo	Retorno à escala	Forma da fronteira
Aditivo	Variável	Fronteira
Multiplicativo variante	Variável	Cobb-Douglas por partes
Multiplicativo invariante	Constante	Log-linear por partes
BCC	Variável	Linear por partes
CCR	Constante	Reta de 45

Fonte: Adaptado de Mariano, Almeida e Rebelatto (2006)

Na literatura, existem três tipos de retorno à escala: crescente, constante e decrescente. O retorno crescente considera que um aumento de *inputs* causa um aumento desproporcional maior no número de *outputs*. Isso ocorre quando uma DMU está operando muito abaixo da capacidade ótima. O retorno constante ocorre quando o aumento do número de *inputs* ocasiona um aumento proporcional nos *outputs*. Nessa situação, é dito que a DMU está operando com capacidade ótima. Por fim, o retorno decrescente ocorre quando o aumento do número de *inputs* ocasiona um aumento desproporcional menor no número de *outputs*, ou seja, quando a DMU está operando acima da sua capacidade ótima (MARIANO; ALMEIDA; REBELATTO, 2006).

Diversos aperfeiçoamentos e desenvolvimentos teóricos aos modelos DEA clássicos vêm sendo realizados ao longo dos anos. Conforme destacado por Charnes et al. (1994), novos desenvolvimentos em DEA deverão surgir para contornar problemas durante a aplicação do método.

A metodologia DEA está sendo utilizada em muitas áreas. Dentre elas, um estudo realizado por Mousavi-Avval et al. (2011) em Golestan, no Irã, utilizou a metodologia DEA para estudar a eficiência da produção de soja. Os dados das variáveis de entrada foram relacionados com a quantidade de insumos utilizados, como: mão de obra, máquinas e equipamentos, óleo diesel, produtos químicos, fertilizantes, água para irrigação, sementes, eletricidade e a variável de *output* foi a soja produzida. Os resultados revelaram que a produção de soja depende principalmente de insumos como energia elétrica, fertilizantes e óleo diesel.

2.4.6 Análise envoltória de dados na agricultura

De acordo com os estudos de Mangabeira (2002), o uso da DEA para medir a eficiência relativa de agricultores pode servir como apoio a decisão na produção agrícola, ao indicar as fontes de ineficiência e as unidades que podem servir de referência às práticas adotadas. O artigo usa DEA para medir a eficiência de 71 agricultores no município de Holambra, estado de São Paulo, os dados foram do ano de 2002.

O artigo de Teixeira (2020) teve como objetivo caracterizar e comparar a eficiência de um grupo de produtores da região de Boa Esperança, estado do Paraná, no sistema de produção da cultura de soja utilizando a análise envoltória de dados. Foi utilizado DEA no conjunto de dados obtidos junto os 27 produtores nas safras de 2014 a 2017.

O estudo de Junior et.al (2014) tem por objetivo analisar o impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar no Brasil na safra 2008/2009. Para tanto, realizou-se um estudo de eficiência operacional, por meio da aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), na qual foi possível identificar as usinas mais eficientes dentre um universo de 355 e classificá-las por tamanho e localização.

Logicon (2017) buscou desenvolver um sistema de avaliação de desempenho que possibilite determinar e avaliar a eficiência relativa do processo logístico de exportação da soja através do método da Análise por Envoltória de Dados. Para tanto, avaliou as principais rotas logísticas praticadas para o escoamento da produção das principais regiões produtoras, de maneira a estabelecer indicadores de desempenho que permitam comparar a eficiência entre as diferentes opções logísticas para o escoamento da soja.

Souza et. al. (2017) avaliaram a eficiência de quarenta e oito pequenos produtores de soja da região de Dourados (MS), através da aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA). Os dados desse estudo foram obtidos a partir de um questionário semiestruturado aplicado a cada um dos produtores. Foram encontrados dois produtores eficientes, dois produtores com alto grau de eficiência, sete produtores com médio nível de eficiência e, o restante, trinta e sete produtores com baixo nível de eficiência. Utilizando dois produtores eficientes como referências foi possível analisar os motivos pelos quais os produtores ineficientes não alcançaram o índice de 100% de eficiência.

Silva et.al (2022) mensuraram a eficiência agropecuária nos municípios da Amazônia Legal brasileira entre 2006 e 2017. Com base nos censos agropecuários de 2006 e 2017, foi possível obter a eficiência para cada município, por meio da análise de envelopamento de dados (DEA), e, em seguida, determinar o efeito de algumas variáveis sobre a probabilidade de eficiência por um modelo *logit*. Os resultados mostraram que, em uma década, cresceu a eficiência geral dos municípios da Amazônia. O valor da produção agropecuária aumentou 8,54 vezes mais do que o incremento de área agricultável e pastagem. A agricultura voltada principalmente às *commodities*, com maior intensidade de uso de máquinas agrícolas, favoreceu a eficiência.

O trabalho de procurou contribuir apresentando e discutindo uma metodologia de análise e avaliação do desempenho organizacional, através da utilização de Análise Envoltória de Dados (DEA) com base em informações de múltiplos inputs e outputs de 20 produtores de leite da região Sudeste ao longo de quatro meses. Percebe-se que a metodologia proposta possui características multicriteriais que a tornam capaz de modelar a complexidade dos processos produtivos. Além disso, pode-se obter um ferramental de apoio gerencial baseado em benchmarking, que proporciona aos produtores a possibilidade de buscar a melhoria contínua de seus processos de transformação (MACEDO, 2007).

O objetivo principal de Trindade (2020), foi investigar a eficiência técnica e de escala das principais regiões produtoras de trigo no Brasil, em relação aos custos de produção nas safras 2010/11 a 2017/18. A amostra foi formada pelas regiões de Cascavel/PR, Londrina/PR, Ubatã/PR, Cruz Alta/RS e Passo Fundo/RS. Para os cálculos da eficiência, adotou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA) com orientação por input. O output utilizado no modelo DEA foi à quantidade média de trigo produzida por região, tendo sido definidos cinco inputs (fertilizantes, agrotóxicos, transporte externo, encargos sociais e assistência técnica). Metodologicamente, tratou-se de uma pesquisa quantitativa, descritiva e aplicada, com a utilização de dados secundários extraídos dos relatórios de custos de produção da CONAB,

relativos ao cultivo de trigo. Os principais resultados evidenciaram que os maiores custos médios de produção se referem a fertilizantes e agrotóxicos relacionados ao custeio com a lavoura, sendo a região de Londrina na safra 2011/12 a mais eficiente tecnicamente. Em média a eficiência técnica total foi de 85%, na avaliação considerando três sistemas de plantio aplicados nas lavouras de trigo (avaliação geral). Já os escores médios de eficiência pura e de eficiência de escala obtidos foram de 94% e 90%, respectivamente, indicando que poderia haver uma melhor gestão dos recursos utilizados no processo produtivo.

3 MÉTODO

A aplicação conjunta de análise do ciclo de vida e análise envoltória de dados (ACV + DEA) constitui um processo conceitual e metodológico no avanço da quantificação da ecoeficiência. Como visto no capítulo anterior, o método fornece uma ligação entre a eficiência operacional e os impactos ambientais causados, analisando o impacto do inventário do ciclo de vida para cada uma das unidades tomadoras de decisão (DMUs).

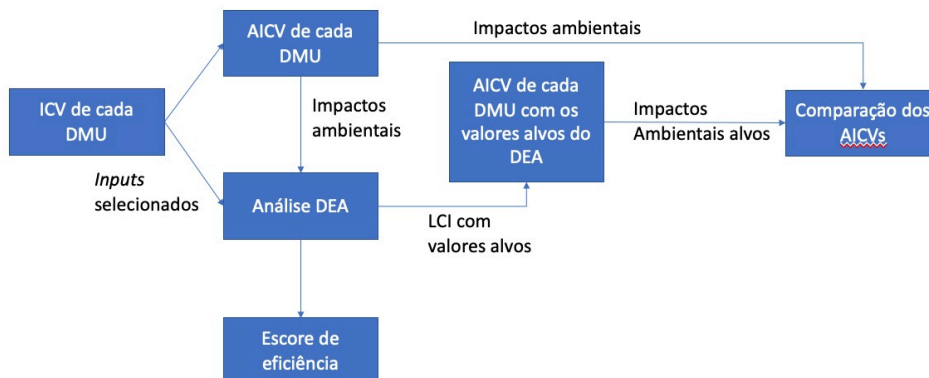
A metodologia ACV + DEA é comumente aplicada em dois formatos: em três etapas, como proposto por Lozano et. al. (2009) ou em cinco etapas, como proposto por Vázquez-Rowe et al. (2010). Como mostram a Figura 5 e 6, os dois primeiros passos são similares em ambas as abordagens e consistem em: (i) elaboração do inventário de cada DMU e (ii) avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida de cada DMU. Na abordagem de três passos, o terceiro passo consiste no cálculo da eficiência a partir da implementação do DEA utilizando tanto os impactos ambientais como alguns *inputs* do inventário como entrada do modelo. Já, no método de cinco passos, as categorias de impacto não são incluídas diretamente no DEA, elas são calculadas no segundo passo e recalculadas no quarto passo levando em conta os alvos de insumos fornecidos pelo modelo DEA.

Figura 5 - Etapas ACV + DEA de três passos



Fonte: Adaptado de Vázquez-Rowe et al. (2010)

Figura 6 - Etapas ACV + DEA de cinco passos



Fonte: Adaptado de Vázquez-Rowe et al. (2010)

Dentre as duas opções de abordagem, optou-se por utilizar o método ACV + DEA de três etapas.

3.1 Avaliação do ciclo de vida – ACV

Para a realização dos dois primeiros passos da metodologia, foi necessária a elaboração da avaliação do ciclo de vida de cada estado, para cada tipo de manejo estudado.

A elaboração das ACVs foi desenvolvida de acordo com as normas ABNT (2001) e a estrutura metodológica baseada nas recomendações da ISO (*International Organization for Standardization*).

De acordo com a NBR ISO 14040, a ACV consiste em quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impactos e interpretação.

3.1.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo desse estudo de ACV é elaborar e avaliar o ciclo de vida da produção de soja *in natura* de 10 estados brasileiros, a partir de três manejos: o convencional, transgênico e transgênico segunda geração, a fim de valorar e quantificar os potenciais impactos ambientais, levando em conta os insumos e as emissões de todo o ciclo produtivo.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta usada para avaliar o desempenho ambiental de produtos, processos ou sistemas ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. A ACV leva em consideração múltiplos impactos ambientais, como uso de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa, poluição do ar, água e solo, entre outros.

Quando se trata de diferentes manejos agrícolas, como convencional, transgênico e transgênico de segunda geração, a ACV pode ser sensível às diferenças entre eles, desde que as etapas específicas do ciclo de vida sejam adequadamente identificadas e avaliadas. Cada manejo agrícola pode envolver práticas distintas, como o uso de fertilizantes, pesticidas, técnicas de manejo do solo, entre outros, e essas diferenças podem ter impactos ambientais variados.

Vários fatores podem influenciar o desempenho ambiental entre os diferentes manejos agrícolas, tais como:

- **Uso de recursos:** A quantidade de recursos naturais utilizados, como água, energia e fertilizantes, pode variar entre os diferentes manejos agrícolas. O uso mais eficiente desses recursos pode levar a um melhor desempenho ambiental.

- **Emissões de gases de efeito estufa:** As emissões de gases de efeito estufa podem ser influenciadas por fatores como o uso de fertilizantes, a queima de resíduos agrícolas e o consumo de energia durante as etapas de produção e processamento.

- **Uso de agroquímicos:** O tipo e a quantidade de agroquímicos utilizados podem afetar a poluição do solo, da água e do ar, bem como a biodiversidade.

- **Impactos na biodiversidade:** As práticas agrícolas podem ter impactos positivos ou negativos na biodiversidade local, dependendo, por exemplo, do uso de pesticidas, da rotação de culturas e da preservação de habitats naturais.

- **Uso de maquinário agrícola:** O consumo de combustíveis fósseis e as emissões associadas ao uso de maquinário agrícola podem variar entre diferentes manejos.

A ACV é baseada em inventários que incluem a coleta de dados detalhados sobre todas as etapas do ciclo de vida do produto ou sistema avaliado. Esses inventários podem ser compilados por meio de dados primários (obtidos diretamente das fontes relevantes) ou dados secundários (obtidos de bancos de dados públicos ou literatura científica). Idealmente, os inventários devem levar em consideração as práticas específicas de cada manejo agrícola para fornecer resultados mais precisos.

O estudo foi do tipo “Berço ao Portão”, ou seja, considerou desde a extração dos recursos necessários e preparo do solo até o armazenamento do grão, englobando o transporte por atividade. Trata-se de uma ACV atribucional comparativa, em que se comparam três métodos diferentes de produção para cumprir a mesma unidade funcional.

O estudo não acompanha a soja até o cumprimento da sua função, por isso denominamos como função de produção.

A seguir, estão apresentados os elementos que compõe o escopo da ACV da produção de soja *in natura*.

- **Função do sistema:**

O objeto do presente estudo é o grão de soja *in natura*, que apresenta diversas funções e utilidades, como a produção de maquiagens, tintas e até nos colchões de espuma por meio de um polímero, o polioli. A soja também está presente em produtos veganos e voltados para pessoas que têm intolerância á lactose. O grão também é utilizado como alimento funcional, na

produção de chocolates, temperos prontos, massas, gordura vegetal, maionese dentre outros. Isso, além de participar da produção dos derivados da carne, mistura para bebidas, papinha para bebês e outros alimentos dietéticos.

Alguns parâmetros da composição química do grão de soja são: lipídeos 20%, proteínas 40%, minerais 5% e carboidratos 34%, cujos percentuais se referem a matéria seca.

Os grãos de soja constituem-se de embrião, endosperma e cobertura protetora, que é originada do tegumento externo, marcado por um hilo, e sem pericarpo. O tegumento dos grãos de soja é formado por epiderme, hipoderme e camada interna de parênquima (AGROLINK, 2017). Do ponto de vista nutricional, o grão de soja é um alimento com componentes essenciais a alimentação humana, constituindo-se em excelente fonte de proteína (VALLE et al., 2012). O grão constitui-se, basicamente por 8% de casca, 90% de cotilédones e 2% de hipocótilo. Quanto à composição química, aproximadamente 60% da massa seca do grão é constituída de óleo e proteína, (geralmente 20% de óleo e 40% de proteína), além de 35% de carboidratos e, 5% de fibras (POYSA et al., 2006).

A qualidade da proteína de soja é bem semelhante à de animais e sua baixa digestibilidade quando crua se deve a presença de fatores antinutricionais, que podem ser resolvidos com seu processamento (MORAIS; SILVA, 2000). Os teores de óleo e proteína dos grãos de soja são governados geneticamente, porém fortemente influenciados por fatores como localização geográfica, condições ambientais e época de plantio, principalmente, durante o período de enchimento dos grãos (BARBOSA et al., 2011; POYSA et al., 2006).

- **Unidade funcional:**

Neste estudo a unidade funcional considerada será 1 kg de soja produzida.

- **Fluxo de referência:**

Um (1) quilograma (kg) de grão de soja em cada sistema de plantio.

- **Sistema de produto:**

As atividades que englobam o sistema de produto da soja estão apresentadas na Figura 7 e englobam desde a preparação do solo até a armazenagem do grão.

A atividade 1, o preparo do solo, inclui a operação de terra, o arado, grade e o subsolador, que são máquinas e equipamentos utilizado nesta atividade. Também inclui a aplicação de calcário seguida de uma grade.

A atividade 2, o plantio, inclui as máquinas e equipamentos, como a plantadeira. O principal objetivo dessa atividade é plantar a semente, que neste caso já vem tratada. Nesta etapa, têm-se como insumo o fertilizante e o inoculante. A inoculação serve para promover a

associação entre microrganismos benéficos às plantas e as próprias plantas. Já o fertilizante aumenta as produtividades do cultivo.

Figura 7 - Atividades do sistema de cultivo



Fonte: Elaboração própria

A atividade 3, os tratos culturais, inclui as aplicações de defensivos. Entre eles, o herbicida, inseticida, fungicida e o fertilizante foliar. Nessa etapa são utilizados máquinas e equipamentos, como o pulverizador automotriz. Após a planta já estar crescida, também é feita uma aplicação de cobertura de cloreto de potássio.

A atividade 4, colheita, inclui a colheita dos grãos. Nesta etapa utiliza-se a colheitadeira e um trator de suporte.

A atividade 5, o recebimento, envolve o recebimento do grão depois da colheita. A limpeza das impurezas e o processo posterior como a secagem, não foi considerado neste estudo.

O sistema de produto mostrado na Figura 7, inclui as 5 atividades das etapas de produção do grão.

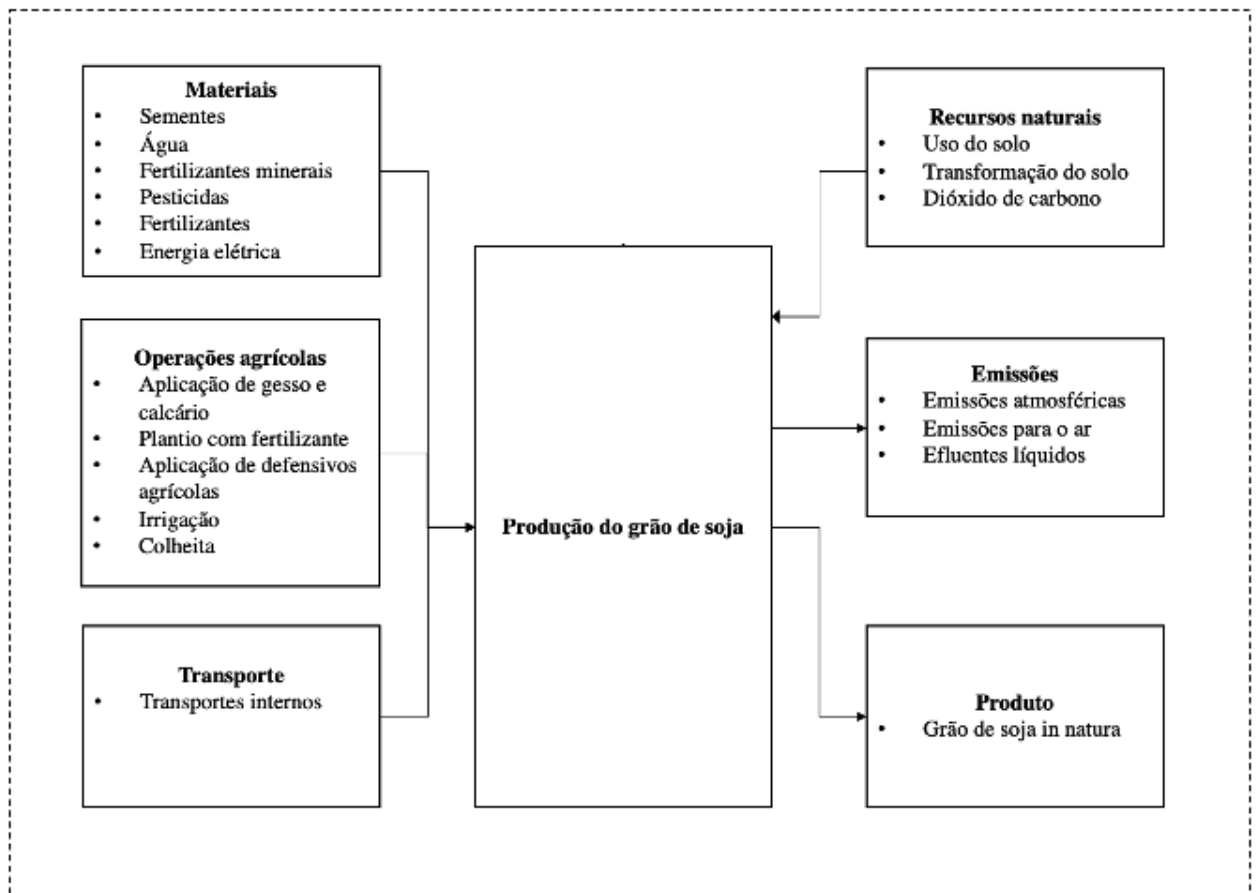
- **Fronteira do sistema:**

O Sistema de produto inclui a extração da matéria-prima até o grão de soja *in natura*, não sendo incluídas as operações de farelo e óleo de soja, nem processos provenientes dos derivados do complexo da soja. O uso de diesel, devido à relevância ambiental, também foi avaliado, assim como todos os insumos e a emissão das unidades de cada processo.

O presente estudo não considerou procedimentos de alocação por entender que o grão será estudado como o principal objeto, sem entrar em detalhes do processo de fabricação de produtos derivados. Também, presume-se que nenhum fertilizante orgânico foi aplicado e que a semente já foi tratada.

A fronteira do sistema abrange os insumos utilizados na produção, os recursos naturais, as operações agrícolas, as emissões, e os transportes internos com o intuito de analisar a produção do grão de soja, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Fronteira do sistema de produto



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2018).

A fronteira de sistema de produto trás a informações de todas as etapas, materiais, equipamentos que serão utilizados para moldar a ACV. No caso deste estudo, os materiais, operações agrícolas, transporte, outras operações, recursos naturais, emissões serão considerados direcionados ao grão de soja produzido.

- **Requisitos dos dados:**

Os principais dados das sete atividades do sistema de produto dos dez estados a serem avaliados foram coletados na base de dados Agriannual para a safra 2021/2022.

- **Requisitos da qualidade dos dados:**

Os critérios de cada fase do sistema de produto foram avaliados de acordo com as fases de ciclo de vida da produção de soja, nos três sistemas, convencional, transgênico e transgênico segunda geração.

Esse requisito também aborda:

- Cobertura temporal: Safras agrícolas 2021/2022.
- Cobertura geográfica: 10 estados do Brasil, são eles: Mato Grosso, Tocantins, Maranhão, Bahia, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul e Paraná, conforme a Figura 9.
- Cobertura tecnológica: Serão avaliados separadamente os sistemas de manejo do tipo convencional, transgênico e transgênico segunda geração.

Figura 9 - Cobertura geográfica para os estados do Brasil



Fonte: Elaboração própria

- **Pressupostos, considerações e limitações:**

O estudo baseia-se em duas práticas de produção de soja: convencional, transgênica primeira geração e transgênica segunda geração, sendo que a principal diferença entre elas é a quantidade de aplicações de fertilizantes, considerando 10 estados do Brasil. Considera-se que a cultura agrícola de produção de soja já se apresenta como sendo uma das principais matérias-

primas do mundo, pois, proveniente da soja, existem diversos tipos de subprodutos como a ração, óleo, farelo, cosméticos dentre outros.

Embora possam ter alterações em algumas atividades devido à avanços tecnológicos, as informações gerais do estudo apresentam o máximo de veracidade de acordo com outros trabalhos e fontes confiáveis como Embrapa e Conab.

O nível tecnológico das máquinas e equipamentos foram definidos pela base de dados, e cada estado tem suas particularidades envolvidas, como alguns insumos diversificados e os meses de duração do ciclo produtivo.

Em relação aos procedimentos de alocação, a rotação de culturas não foi considerada. Para a coleta e o tratamento dos dados na análise de inventário foi considerado como base de obtenção dos dados e de cálculo, o fluxo de referência para a produção de 1 kg de grão de soja produzido. Portanto, o tratamento dos dados de entrada e de saída das unidades de processo estão quantificadas para 1 kg de grão de soja produzido.

Os dados do inventário e a avaliação dos impactos do consumo de diesel dos tratores, caminhões e equipamentos agrícolas são considerados, porque são utilizados em diversas atividades.

Como os dados utilizados neste trabalho são secundários, acarreta uma série de limitações sendo uma delas a limitação geográfica, a falta de dados de outros estados e ausência de dados regionalizados.

3.1.2 Análise do inventário do ciclo de vida

A análise do inventário do ciclo de vida (ICV) deste estudo foi realizada de acordo com as atividades do sistema de produto, descrito na seção anterior, em três sistemas de manejo, sendo eles o convencional e o transgênico, para dez estados brasileiros.

A primeira etapa do ICV é a coleta de dados. Os principais dados relacionados à cada atividade descrita no sistema de produto foram coletados da base de dados Agriannual. A partir da consulta dos relatórios de custos de produção foram obtidas as seguintes informações: operação realizada, insumo utilizado, quantidade do produto aplicada por hectare, valor monetário unitário e valor monetário total.

A partir dos valores da quantidade total por hectare e da produtividade média de cada estado analisado foi feita a transformação dos dados de insumos agrícolas à unidade funcional (1 quilograma de soja). Os cálculos de entradas e saídas serão descritos nas seções seguintes.

Entradas do Ambiente

As entradas do ambiente estão relacionadas ao uso do solo (ocupação e transformação) e ao sequestro do dióxido de carbono durante a fotossíntese. O uso da água não foi considerado, já que apenas cerca de 10% das lavouras brasileiras de soja utilizam a irrigação (EMBRAPA,2022).

- **Uso do solo**

O cálculo do uso do solo é feito com base nos dados de produtividade e tempo de ocupação terrestre. Para a monocultura da soja, considerou-se o período de ocupação terrestre de 120 dias (EMBRAPA, 2018) e os dados de produtividade do AGRIANUAL. Com isso, os dados de ocupação e transformação podem ser calculados de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$Ocupação (m^2 \cdot ano) = \left(\frac{120}{365} * 100 \right) * \frac{1}{Prod} \quad (1)$$

$$Transformação (m^2) = \frac{1}{Prod} \quad (2)$$

Onde, *Prod* refere-se à produtividade anual em kg.m⁻².

- **Sequestro de CO₂**

Para o cálculo do CO₂ absorvido durante a fotossíntese é necessário levar em consideração algumas propriedades da soja, que estão apresentadas na Tabela 3, com base nos dados fornecidos pela Embrapa (2018).

Tabela 3 - Propriedades referentes à 1quilograma de soja

Propriedades	Unidade	Soja (1kg)
Energia, valor calórico bruto	MJ	20,5
Teor de carbono, não fóssil	Kg C	0,44
Teor de carbono, fóssil	kg C	--
Massa seca	kg	0,87
Massa molhada	kg	1
Água (massa molhada)	kg	0,13

Fonte: EMBRAPA (2018)

Com base nesses dados, o valor do CO₂ pode ser calculado de acordo com Equação 3, como proposto por Nemeck e Schnetzer (2012) e Embrapa (2018).

$$CO_2 = \frac{44}{12} \times TC \times MS(1 - Q_S) \quad (3)$$

onde,

$\frac{44}{12}$ é o fator de conversão de C para CO₂;

TC é o teor de carbono não fóssil, em kg.C por kg de massa seca;

MS é a quantidade de massa seca em 1kg de soja, em kg;

Q_S é a quantidade de semente para 1kg de soja, em kg;

Entradas da tecnosfera

Como entradas da tecnosfera são considerados todos os produtos oriundos do processo produtivo do grão de soja. São eles: fertilizantes, defensivos agrícolas, sementes e diesel.

- **Fertilizantes**

O uso de fertilizantes minerais e de corretivos são muito comuns na produção de soja, e podem variar de acordo com uma série de fatores como tipo e qualidade do solo. Os dados do Agriannual trazem informações detalhadas dos tipos de fertilizantes utilizados para cada estado e tipo de manejo.

Para o cálculo correto de todos os componentes químicos utilizados, considerou-se as composições apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição dos principais fertilizantes

Fertilizantes	Composição (%)		
	Nitrogênio (N)	Fósforo (P)	Potássio (K)
00-20-20 + micronutrientes	0	0,2	0,2
Monoammonium phosphate (MAP)	0,09	0,48	
02-18-18 + micronutriente	0,02	0,18	0,18
Cloreto de Potássio (KCl)			0,58

Fonte: EMBRAPA (2018)

- **Defensivo Agrícolas**

Assim como os fertilizantes, o uso de defensivos agrícolas varia muito de lavoura para lavoura. Fatores como condições do solo e clima são determinantes para a quantidade e o tipo de pesticida usado em cada estado e para cada tipo de manejo. A escolha do defensivo mais utilizado foi fornecida pelo Agriannual. As composições e concentrações foram obtidas com base nas informações técnicas de cada um dos produtos e estão resumidas na Tabela 5. Para a diluição dos defensivos, foi considerado 200 litros de água por hectare (EMBRAPA, 2018).

Tabela 5 - Composição dos principais defensivos agrícolas

Tipo de defensivo	Nome comercial	Fórmula	Concentração
Formicida	Mirex	Sulfluramida	2 g/kg
Fungicida	Fox	Protiocanazol	150 g/L
		Trifloxistrobina	175 g/L
Inseticida	Orthene 750 BR	Acefato	750 g/kg
Herbicida	Glifosato	Glifosato	480 g/L

Fonte: EMBRAPA (2018)

- **Diesel**

Para o cálculo do consumo total de diesel foram consideradas todas as operações com máquinas informadas e o gasto de combustível nos transportes internos. As informações de tempo total por operação foram fornecidas pelo Agriannual, o consumo médio de diesel das máquinas obtido de Embrapa (2008) e o consumo médio dos transportes internos por caminhão foi obtido de (IEA,1998), estão na Tabela 6.

Tabela 6 - Consumo médio de diesel por atividade agrícola

Atividade	Consumo médio de diesel (L/h)
Aplicação de calcário e gesso, por espalhador	7,9
Plantio com adubo, por plantio direto	18
Aplicação de defensivos agrícolas, por pulverizador de campo	5,77
Adubação de cobertura, por emissora	12
Colheita mecânica, por colhedora combinada	26
Transportes Internos	7

Fonte: EMBRAPA (2018)

Assim, a partir dos dados de consumo médio de diesel, foi possível calcular o consumo total de diesel usando a Equação 4.

$$DC = CM \times t \times \rho_D \quad (4)$$

onde,

DC é o consumo total de diesel, em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$;

CM é o consumo médio de diesel, em $\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$;

t é o tempo total da operação, em $\text{h} \cdot \text{ha}^{-1}$;

ρ_D é a densidade do diesel, em $\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Saídas para o ambiente

As saídas para o ambiente foram estimadas com base no trabalho da Embrapa (2018). Essas emissões são referentes às substâncias resultantes das atividades agrícolas. São influenciadas tanto pelas práticas de manejo quanto pelas características do clima e do solo do local de produção.

- **Emissões de N_2O para a atmosfera**

O uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura aumenta e acelera a produtividade das plantações, no entanto também é um dos principais responsáveis pela emissão de óxido nitroso (N_2O). O N_2O é um gás incolor, atóxico e não inflamável e é um dos gases responsáveis pelo agravamento do efeito estufa.

A quantidade de N_2O emitido para o ambiente pode ser calculada de acordo com a Equação 5.

$$N_2O = \frac{44}{28} \left\{ 0,01(N_{tot} + N_{cr}) + 0,01 \times \frac{14}{17} NH_3 + 0,0075 \times \frac{14}{62} \times NO_3 \right\} \quad (5)$$

onde,

N_2O é o valor total de óxido nitroso emitido ao ar, por ano, em $kg \cdot ha^{-1}$;

N_{tot} é o total de nitrogênio orgânico e mineral, por ano, em $kg \cdot N \cdot ha^{-1}$;

N_{cr} é a quantidade de nitrogênio contida no resíduo da plantação, por ano, em $kg \cdot N \cdot ha^{-1}$

1

NH_3 é valor total do resíduo de nitrogênio como amônia, por ano, em $kg \cdot NH_3 \cdot ha^{-1}$;

NO_3 é o valor total do resíduo de nitrogênio como nitrato, por ano, em $kg \cdot NO_3 \cdot ha^{-1}$;

14/17 é o fator de conversão de NH_3 para N;

14/62 é o fator de conversão de NO_3 para N;

44/28 é o fator de conversão de N para N_2O .

Para o cálculo da Equação 4.5, é necessário encontrar os valores dos parâmetros NH_3 e NO_3 . Tais parâmetros podem ser calculados de acordo com as Equações 6 e 7, respectivamente.

$$NH_3 = \frac{17}{14} \sum_{m=1}^M (Efa_m \times N_{min}) \quad (6)$$

onde,

NH_3 é o valor de amônia derivado do uso de fertilizantes orgânicos e minerais, por ano, em $kg \cdot ha^{-1}$;

N_{min} é a quantidade de fertilizantes mineral aplicado, por ano, em $kg \cdot N \cdot ha^{-1}$;

Efa_m é o fator de emissão de amônia em solos com $pH < 7.0^*^1$;

- **Emissão de CO_2 para a atmosfera**

A aplicação de corretivos do solo é uma prática comum para neutralizar a acidez do solo e oferecer nutrientes secundários às plantas. O uso de corretivos como calcário ($CaCO_3$) é convertido em CO_2 e emitidos para a atmosfera.

¹ Considerando que todos os solos brasileiros possuem $pH < 7.0$ e o fertilizantes o fator de emissão de amônia considerado foi de 0,093 (Embrapa, 2018).

A estimativa dessas emissões pode ser calculada de acordo com a Equação 7, seguindo Embrapa (2018) e IPCC (2006).

$$CO_2 = \frac{44}{12} (M_{cal} \times EF_{cal}) \quad (7)$$

CO_2 é a quantidade total de dióxido de carbono emitido pelo uso de calcário, por ano, em $kg.ha^{-1}$;

M_{cal} é a quantidade de calcário aplicado, por ano, em $kg.ha^{-1}$;

EF_{cal} é o fator de emissão do calcário, em $kg.C.kg^{-1}calcário^2$;

44/12 é o fator de conversão de C em CO_2 ;

● Lixiviação de nitrato para águas subterrâneas

A lixiviação de nitrato para águas subterrâneas é um processo em que o nitrato presente no solo é lavado pela água da chuva ou irrigação e acaba infiltrando no solo até chegar ao lençol freático, contaminando assim as águas subterrâneas.

A quantidade aproximada de lixiviação de nitrato é dado pela Equação 8, seguindo Embrapa (2018).

$$NO_3 = \frac{62}{14} \left(21,37 + \frac{P}{c \times L} \times (0,0037 \times S \times 0,0000601 \times N_{org} - 0,00362 \times U) \right) \quad (8)$$

onde:

NO_3 é a lixiviação de nitrato pelo uso de fertilizantes minerais, em $kg.ha^{-1}$;

P é a quantidade de água ao solo resultante de precipitações, em mm;

c é o teor de argila no solo, em %;

L é a profundidade da raiz, em m;

S é a quantidade de fertilizante nitrogenado utilizado, em $kg.N.ha^{-1}$;

N_{org} é o estoque de nitrogênio na matéria orgânica do solo, em $kg.N.ha^{-1}$;

U é a quantidade de nitrogênio absorvido pela agricultura, em $kg.N.ha^{-1}$;

62/14 é o fator de conversão de N em NO_3 .

Os parâmetros utilizados na Equação 4.7 estão apresentados na Tabela 7. Os valores foram adaptados do trabalho da Embrapa (2018) e Demattê et al. (2019).

² *O fator de emissão considerado foi de 0,12 kg.C por kg de calcário (IPCC, 2006).

Tabela 7 - Parâmetros utilizados para o cálculo da lixiviação de nitrato

Estado	Teor de argila no solo	Estoque de nitrogênio no solo	Nitrogênio absorvido	Precipitação anual	Profundidade da raiz
	%	kg.N.ha-1	kg.N.ha ⁻¹	mm	m
GO	31	6500	78	1133,31	0,49
MT	24	4000	78	1256,44	0,49
MS	37	6500	78	925,13	0,49
PR	55	9000	78	977,19	0,49
RS	44	10000	78	1029,74	0,49
SP	25		78	1082,09	0,49
MA	23		78	1200,50	0,49
BA	23		78	608,49	0,49
TO	10		78	1257,13	0,49
MG	55		78	1037,25	0,49

Fonte: EMBRAPA (2018)

- **Emissão de metais pesado para a água e solo**

Seguindo o trabalho de Embrapa (2018), foram estimadas as emissões advindas das aplicações de fertilizantes e corretivos agrícolas dos seguintes metais pesados: Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Níquel (Ni) e Zinco (Zn).

As Equações 9 e 10 apresentam as fórmulas para o cálculo da emissão de cada um desses metais para água e para o solo, respectivamente.

$$MP_{w,i} = EF_w \times \left\{ \sum_j (MMP_{fert,i,j} \times \frac{M_{fert,j}}{10^6}) - (MMP_i \times \frac{M_g}{10^6}) \right\} \quad (9)$$

onde:

$MP_{w,i}$ é a emissão do metal pesado i para a água, em kg.ha⁻¹;

EF_w é o fator de emissão para a água. O valor médio usado foi de 0,0001;

$MMP_{fert,i,j}$ é a quantidade do metal pesado i no fertilizante j , em mg.kg⁻¹;

$M_{fert,j}$ é a quantidade do fertilizante j , em kg.ha⁻¹;

MMP_i é a quantidade do metal i na soja, em mg.kg⁻¹;

M_g é o rendimento da colheita, em kg.ha⁻¹;

$$MP_{s,i} = \left\{ \sum_j (MMP_{fert,i,j} \times \frac{M_{fert,j}}{10^6}) - (MMP_i \times \frac{M_g}{10^6}) \right\} - MP_{w,i} \quad (10)$$

onde:

$MP_{s,i}$ é a emissão do metal pesado i para o solo, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

$MMP_{fert,i,j}$ é a quantidade do metal pesado i no fertilizante j , em $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;

$M_{fert,j}$ é a quantidade do fertilizante j , em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

MMP_i é a quantidade do metal i na soja, em $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;

M_g é o rendimento da colheita, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

$MP_{w,i}$ é a emissão do metal pesado i para a água, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

A quantidade de metal pesado de acordo com o tipo de fertilizante e/ou corretivo agrícola (parâmetro $MMP_{fert,i,j}$) está apresentado na Tabela 8 de acordo com dados da Embrapa (2018).

Tabela 8 - Quantidade de metal pesado em cada tipo de fertilizante e corretivo (em $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Metal/Input	Calcário	Gypsum	KCI	MAP	Soja
Cádmio	0	0,8	0,05	13,19	0,01
Chumbo	0	9,9	4,8	16,11	0
Cobre	6	10	4,36	33,61	10
Cromo	9,9	9,9	1,74	142,86	0,01
Níquel	0	4,9	1,83	25,36	3,1
Zinco	7	5	40,16	182,46	40

Fonte: EMBRAPA (2018)

A quantidade de cada metal na soja (parâmetro MMP_i) está apresentado na Tabela 9 de acordo com os dados da Embrapa (2018).

Tabela 9 - Quantidade de metal pesado na soja (em $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Metal/Input	Soja
Cádmio	0,01
Chumbo	-
Cobre	10
Cromo	0,01
Níquel	3,1
Zinco	40

Fonte: EMBRAPA (2018)

- **Mudança no uso da terra**

A mudança no uso da terra está diretamente ligada com a expansão das fronteiras agrícolas no país e com a emissão dos gases efeito estufa. As emissões são calculadas de acordo com o método BRLUC (*Brazilian Land Use Change*) desenvolvido por Novaes et al. (2017). O BRLUC foi desenvolvido para estimar a mudança do uso da terra (MUT) associada a produtos agropecuários brasileiros e as emissões de CO₂ derivadas, em nível nacional, estadual e municipal. Esta metodologia foi desenvolvida pela Embrapa em parceria com outras instituições, e as estimativas do MUT para diversos produtos agrícolas em diversas regiões do Brasil são disponibilizadas no site da instituição. Os dados coletados de mudança do uso da terra para a soja nos estados brasileiros estudados estão apresentados na Tabela 10. A cobertura temporal é de 1999 a 2018.

Tabela 10 - Dados da mudança do uso da terra disponibilizadas pelo BRLUC

Estado	Expansão da soja (%)	Mudança no uso da terra (ha.kg ⁻¹ .ano ¹)
BA	0,63	0,00020339
GO	0,58	0,00018747
MA	0,82	0,00026427
MG	0,63	0,00020243
MS	0,6	0,00019370
MT	0,71	0,00022969
PR	0,47	0,00015126
RS	0,46	0,00014761
SP	0,47	0,00015239
TO	0,94	0,00030295

Fonte: BRLUC

3.1.3 Análise de impacto do ciclo de vida

Conforme a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), esta fase da ACV tem o objetivo de avaliar os impactos ambientais potenciais do sistema de produto em análise com base nos dados

levantados pelo Inventário. Para tanto, os dados inventariados foram associados a categorias de impacto específicas e a indicadores de cada categoria com base no método de ReCiPe 2016 midpoint (H) (HUIJBREGTS et al., 2016).

Considerando que um dos objetivos do trabalho foi avaliar quais principais categorias de impactos, resultantes do Software Simapro em parceria com a Embrapa, se destacam no processo produtivo da soja, todas as categorias de impacto do método ReCiPe 2016 *midpoint* (H) foram analisadas. A abordagem *midpoint* foi escolhida pela menor incerteza em relação às entradas do inventário (HAUSCHILD; HUIJBREGTS, 2015) e por permitir avaliar cada categoria isoladamente. Indicadores e fatores de caracterização das categorias de impacto, juntamente com suas respectivas unidades estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Indicadores e fatores de caracterização das categorias de impacto do método ReCiPe 2016 midpoint.

Categoria de impacto	Indicador	Fator de caracterização	Unidade
Formação de material particulado	Aumento da inalação de PM2.5 pela população	Potencial de formação de material particulado	kg PM2.5 eq para o ar
Depleção de Recursos Fósseis	Aumento do potencial calorífico	Potencial de combustíveis fósseis	kg oil eq
Ecotoxicidade Aquática	Aumento de substâncias perigosas em água doce	Potencial de ecotoxicidade aquática	kg 1,4-DCB eq para água doce
Eutrofização de Água Doce	Aumento de fósforo em água doce	Potencial de eutrofização de água doce	kg P eq para água doce
Aquecimento Global	Aumento do forçamento radiativo infravermelho de um gás de efeito estufa	Potencial de aquecimento global	kg CO2eq para o ar
Toxicidade humana carcinogênica	Aumento do risco de incidência de doenças cancerígenas	Potencial de toxicidade humana	kg 1,4-DCB eq para o ar urbano
Toxicidade Humana Não-Carcinogênica.	Aumento do risco de incidência de doenças não cancerígenas	Potencial de toxicidade humana	kg 1,4-DCB eq para o ar urbano
Radiação Ionizante	Redução da absorção de radiação	Potencial de radiação ionizante	kBq Co-60 eq para o ar
Uso do Solo	Ocupação e transformação da terra	Potencial de ocupação de terras agrícolas	m ² ×yr crop eq
Ecotoxicidade Marinha	Aumento de substâncias perigosas em águas marinhas	Potencial de ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB eq para a água do mar
Eutrofização Marinha	Aumento de nitrogênio em água do mar	Potencial de eutrofização de água do mar	kg N eq
Escassez de Recursos Minerais	Aumento de minério extraído	Potencial excedente de minério	kg Cu eq
Formação de Ozônio (saúde humana).	Aumento da absorção de ozônio troposférico pela população	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos: humanos	kg NOx eq para o ar
Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres)	Aumento do ozônio troposférico	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos: ecossistemas	kg NOx eq para o ar
Depleção de Ozônio Estratosférico.	Diminuição do ozônio estratosférico	Potencial de depleção de ozônio	kg CFC11 eq para o ar

Acidificação Terrestre	Aumento de prótons em solos naturais	Potencial de acidificação terrestre	kg SO ₂ eq para o ar
Ecotoxicidade Terrestre	Aumento de substâncias perigosas em solos naturais	Potencial de ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCBeq para o solo industrial
Consumo de Água	Aumento do consumo de água	Potencial de consumo de água	m ³

Fonte: Elaboração própria

3.2 Análise Envoltória de Dados (DEA)

O objetivo da DEA é indicar DMUs eficientes e calcular alvos para as DMUs que são consideradas ineficientes, projetando cada DMU na fronteira eficiente.

O modelo chamado de BCC assume um retorno variável à escala, ou seja, as saídas não mudam em proporção a entrada. O BCC orientado para o *input* pode ser apresentado nas Equações 11 a 14:

$$\theta_o \rightarrow \min \quad (11)$$

$$\forall i \sum_j x_{ij} \lambda_j - \theta_o x_{io} \leq 0 \quad (12)$$

$$\forall r \sum_j y_{ir} \lambda_j - y_{io} \geq 0 \quad (13)$$

$$\sum_j \lambda_j = 1 \quad (14)$$

$$\forall j \lambda_j \geq 0$$

Onde θ_o é o indicador de ecoeficiência da j -ésima DMU; λ_j é o peso, o representa os *inputs*; e r denota o *output* da DMU.

Considerando a definição de objetivo-escopo deste estudo, as DMUs serão os 10 estados do Brasil em cada um dos três tipos de manejo diferentes, totalizando 30 unidades. A base de cálculo para o cálculo da eficiência da produção de soja será o conjunto de categorias de impacto ambiental selecionadas e *inputs* selecionados do inventário, que serão as entradas no modelo, e o total de soja produzida por hectare, que será considerado como saída, no modelo.

A modelagem do DEA foi feita utilizando o software R (versão 4.1.3) com o pacote *deaR*.

O pacote *deaR* é uma extensão do R que fornece funções para análise de eficiência por meio do método DEA. Dessa forma, quando se diz que a modelagem do DEA foi feita utilizando o *software* R com o pacote *deaR*, significa que foram utilizadas ferramentas específicas disponíveis no R para a análise de eficiência por meio do método DEA. É uma abordagem computacional para realizar as análises de eficiência de unidades produtivas com a ajuda de uma linguagem de programação e um pacote especializado para tal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados da metodologia ACV + DEA, que incluem os resultados dos inventários, a análise dos impactos ambientais e o *ranking* de eficiência, incluindo as metas operacionais e econômicas.

4.1 Análise dos inventários

O inventário apresenta todas as entradas e saídas que constituem o processo produtivo da soja. Na Tabela 11 estão a quantidade dos principais *inputs* da tecnosfera de cada processo produtivo para 1 tonelada de soja³. A partir dos inventários é possível analisar quais são os insumos que mais se destacam e como eles variam para cada tipo de manejo.

Para a escolha dos defensivos a serem considerados no inventário e conseqüentemente cálculo das respectivas quantidades de ingredientes ativos, considerou-se as principais pragas e doenças que mais afetam a cultura da soja e os dados disponibilizados pelo Agriannual.

Para todos os tipos de manejo, o processo produtivo da soja inicia-se com o preparo do solo. Tal processo é caracterizado, principalmente, pela aplicação de calcário. O calcário é responsável por corrigir a acidez do solo, permitindo que a adubação seja mais eficiente, tornando o solo fértil para receber a cultura. De acordo com a Tabela 11, Goiás foi o estado que apresentou a maior quantidade de calcário, com o valor de 235 kg para a produção de uma tonelada de soja para ambos os manejos convencional e transgênico primeira geração, e 220 kg para a transgênico segunda geração. Entre os estados que apresentaram, no geral, os menores valores de uso de calcário estão Maranhão, Minas Gerais, São Paulo e Tocantins.

O uso de corretivos como o calcário (CaCO_3) está diretamente ligado com a emissão de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera. Considerando um fator de 0,12 kg de Carbono por kilograma de calcário (IPCC, 2006), Goiás tem uma emissão estimada de 173 kg de CO_2 para a produção de uma tonelada de soja nos manejos convencional e transgênico primeira geração (Tabela 11 do Apêndice A). Evidencia-se uma diferença de emissão de cerca de 93 kg de CO_2 , quando comparado com Maranhão convencional e transgênico primeira geração, que foi o estado com o menor valor aplicação de calcário.

³ Os inventários completos estão no Apêndice A.

Após o preparo do solo, inicia-se o plantio. Dentre as atividades mais importantes dessa etapa, está a aplicação de fertilizantes. O estado que se destacou por utilizar uma maior quantidade de fertilizantes foi Tocantins. Em ambos os manejos convencional e transgênico primeira geração, o estado apresentou um valor de 4,49 kg de fertilizantes para a produção de uma tonelada de soja, o que representa uma diferença de cerca de 2,85 kg quando comparado ao Paraná, que obteve o menor valor de uso de fertilizantes para os três tipos de manejo.

A aplicação de fertilizantes no cultivo da soja tem o objetivo de fornecer nutrientes para o desenvolvimento da planta, além de aumentar a proteção e a produtividade da safra. No entanto, o uso intensivo de fertilizantes pode resultar em maior impacto ambiental, já que a aplicação de fertilizantes nitrogenados está relacionada com perdas de nitrato via lixiviação, liberação de amônia e o lançamento de gases de efeito estufa, especialmente de óxido nitroso (NEMECEK, 2004).

A aplicação de defensivos agrícolas inicia-se após o plantio. O uso de agrotóxicos é feito para proteger a lavoura e evitar que pragas e doenças possam prejudicar a produtividade da safra. Dentre os defensivos mais importantes utilizados está o herbicida glifosato.

Ao observar os valores da quantidade de herbicida na Tabela 11 é possível identificar que dentre os tipos de manejo, o convencional apresenta os maiores valores em todos os estados. Tal resultado está de acordo com o esperado, já que a soja transgênica primeira geração foi desenvolvida para ter uma maior resistência ao glifosato. Essa característica traz a facilidade no manejo da cultura ao permitir um menor número de aplicações de herbicida, além de controlar as plantas daninhas (FURLANETO et al., 2008; EMBRAPA, 2021).

Quando o glifosato é aplicado, parte do produto é diretamente absorvida, ficando nas plantas daninhas, e parte é transportado para o solo e água, causando diversos riscos ao meio ambiente, já que o glifosato é tóxico à flora e prejudicial à fauna.

O estado que mais se destacou nas quantidades utilizadas do herbicida foi Tocantins, especialmente no manejo convencional, com 2,39 kg de glifosato por tonelada de soja. Seguido do Rio Grande do Sul convencional com 1,96 kg por tonelada. Já, São Paulo apresentou as menores quantidade de glifosato, com valor de 0,66 kg no manejo convencional e 0,46 kg para ambos os manejos transgênicos.

Além da aplicação de herbicidas, durante o cultivo também são feitas aplicações de fungicidas, formicidas e inseticidas. A soma dos principais componentes ativos dos produtos mais utilizados de acordo com os dados do Agriannual está apresentada na coluna Pesticidas da Tabela 11.

Tabela 11 - Principais inputs do inventário da soja

Estado- Manejo	Inputs da Tecnosfera (para 1 ton de soja produzida)								
	N- fertilizante	P- fertilizante	Calcário	Herbicid a	Cloreto de Potássio	Diesel	Pesticidas (Formicida + Fungicida + Inseticidas)	Semente	Água
	Kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
BA - C	1,94	17,50	194,44	1,43	33,61	5,98	3,30	13,89	444,44
BA - T1	1,94	17,50	194,44	1,35	33,61	5,84	3,20	13,89	444,44
BA - T2	1,79	16,15	179,49	1,25	31,03	5,27	2,63	12,82	410,26
GO - C	2,95	26,55	235,99	1,52	26,55	5,33	2,98	14,75	471,98
GO - T1	2,95	26,55	235,99	1,43	26,55	5,19	2,51	14,75	471,98
GO - T2	2,75	24,79	220,39	1,34	24,79	4,71	1,59	13,77	440,77
MA - C	2,16	19,44	108,02	1,75	40,93	6,54	1,61	15,43	493,83
MA - T1	2,16	19,44	108,02	1,25	40,93	6,31	1,33	15,43	493,83
MA - T2	2,01	18,10	100,57	0,96	38,10	5,74	0,81	14,37	459,77
MG - C	2,22	20,00	111,11	-	20,00	2,62	2,25	13,89	444,44
MG - T1	2,22	20,00	111,11	-	20,00	2,56	1,60	13,89	444,44
MG - T2	2,12	19,05	105,82	-	19,05	2,31	1,39	13,23	423,28
MS - C	2,73	24,55	151,52	1,51	24,55	5,11	3,28	15,15	484,85
MS - T1	2,73	24,55	151,52	1,05	24,55	4,96	2,33	15,15	484,85
MS - T2	2,59	23,28	143,68	1,00	23,28	4,56	2,19	14,37	459,77
MT - C	2,59	23,28	143,68	1,83	23,28	5,82	2,54	14,37	459,77
MT - T1	2,59	23,28	143,68	1,45	23,28	5,68	2,15	14,37	459,77
MT - T2	2,42	21,77	134,41	1,35	21,77	5,19	1,26	13,44	430,11
PR - C	1,67	15,00	138,89	1,32	34,33	9,18	2,09	13,89	444,44
PR - T1	1,67	15,00	138,89	0,98	34,33	8,64	1,62	13,89	444,44
PR - T2	1,54	13,85	128,21	0,58	31,69	7,98	1,01	12,82	410,26
RS - C	1,86	16,78	211,86	1,94	33,16	10,60	1,22	14,12	451,98
RS - T1	1,86	16,78	211,86	1,46	33,16	9,51	0,90	14,12	451,98
RS - T2	1,75	15,71	198,41	0,90	31,06	8,65	0,81	13,23	423,28
SP - C	2,24	20,17	112,04	0,66	28,29	6,97	3,36	14,01	448,18
SP - T1	2,24	20,17	112,04	0,46	28,29	6,42	2,16	14,01	448,18
SP - T2	2,24	20,17	112,04	0,46	28,29	6,42	1,87	14,01	448,18
TO - C	4,49	29,81	112,18	2,39	36,73	6,79	3,28	16,03	512,82
TO - T1	4,49	29,81	112,18	1,18	36,73	6,64	1,70	16,03	512,82
TO - T2	4,17	27,68	104,17	1,10	34,11	5,95	1,53	14,88	476,19

Fonte: Elaboração própria

Da mesma forma que o herbicida, é possível, também, observar uma diminuição na quantidade de outros defensivos utilizados nos manejos transgênicos, especialmente na transgênico segunda geração, que além de resistente ao glifosato, também é resistente à uma variedade de insetos.

Bahia, Mato Grosso do Sul e São Paulo - todos no manejo convencional - apresentaram os maiores valores de pesticidas, com média de 3,3 kg de pesticidas por tonelada de soja produzida. Por outro lado, o Rio Grande do Sul destacou-se pelos baixos valores para todos os manejos.

Desde a primeira etapa de preparação do solo até a colheita, diversas atividades envolvem o uso de maquinários e transportes internos com caminhões. O total de combustível gasto em todas essas atividades foi calculado e apresentado na coluna Diesel da Tabela 11.

Rio Grande do Sul e Paraná foram os estados que apresentaram o maior consumo de diesel para a produção de soja, em todos os manejos, com uma média de cerca de 9 kg de diesel por tonelada de soja.

A queima do diesel libera gases poluentes na atmosfera, com destaque para o monóxido de carbono, óxido de nitrogênio e enxofre. A emissão desses gases está diretamente ligada com o aquecimento global, por isso o diesel é um importante fator a ser considerado na análise do inventário.

Fazendo uma análise de forma geral, é possível constatar que o tipo de manejo transgênico segunda geração utiliza menos insumos para todas as unidades estudadas. Já no manejo transgênico primeira geração, percebe-se um menor uso apenas dos defensivos agrícolas e diesel, quando comparado ao manejo convencional. Tal resultado é esperado dado que as sementes geneticamente modificadas da segunda geração, além de serem mais tolerantes ao glifosato (como a soja primeira geração), também apresentam maior proteção à certo tipos de pragas e uma melhora na produtividade devido às tecnologias avançadas no mapeamento, seleção e inserção de genes em regiões do DNA. Conseqüentemente, demandam uma menor quantidade de sementes, corretivos, fertilizantes, defensivos agrícolas e um tempo menor gasto em operações com máquina reduzindo, assim, o uso do diesel também.

4.2 Análise do Impacto do Ciclo de Vida

Após a elaboração dos inventários, o segundo passo do método ACV + DEA três passos envolve a avaliação do impacto do ciclo de vida. Em parceria com a Embrapa, foi utilizado o

software SimaPRO e o método ReCiPe, *Midpoint*; o valor dos impactos de cada categoria para cada estado e tipo de manejo estão apresentados na Tabela 12.

Analisando os resultados da Tabela 12 é possível observar que as categorias que apresentaram os maiores valores foram toxicidade humana não-carcinogênica, uso do solo, aquecimento global e ecotoxicidade terrestre.

O Aquecimento global e o uso do solo estão relacionados, principalmente, com o uso de fertilizantes nitrogenados e às mudanças no uso da terra. Tais fatores estão diretamente ligados às emissões de gases do efeito estufa, especialmente dióxido de carbono e de óxido nitroso para a atmosfera.

O uso de fertilizantes nitrogenados e as mudanças no uso da terra são alguns dos principais fatores que contribuem para a emissão desses gases na atmosfera. Os fertilizantes nitrogenados são amplamente utilizados na agricultura para aumentar a produção de alimentos, mas também tem um impacto significativo na emissão de óxido nitroso, um dos principais GEE. Além disso, as mudanças no uso da terra, como o desmatamento, a expansão da agricultura e a urbanização, também contribuem para o aumento das emissões de gases do efeito estufa.

Os resultados mostram que há uma grande variação nas emissões de GEE, que podem ser explicadas pelas diferenças nos manejos considerados e pelas variações de solo e clima associadas às regiões de produção. Essa variação enfatiza a necessidade de se adotar práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias limpas para reduzir as emissões de GEE minimizando assim o impacto do aquecimento global.

Mato Grosso, Maranhão e Tocantins tiveram os maiores valores na categoria de aquecimento global. Os três estados estão localizados em regiões caracterizadas pelo clima quente e úmido. Em contrapartida, os estados que tiveram os menores valores de emissão foram Paraná e São Paulo, ambos em regiões de clima subtropical, caracterizadas por temperaturas mais baixas e um clima mais seco. Essas condições climáticas podem favorecer a adoção de práticas agrícolas que reduzem as emissões de gases do efeito estufa, como por exemplo a rotação de culturas, além de favorecer a utilização de culturas de cobertura para aumentar a cobertura vegetal do solo e reduzir a erosão (FAO, 2020)

Além do clima, os fatores que mais contribuem para uma maior emissão de GEE no sistema agrícola são: o consumo de diesel e a quantidade de fertilizante e calcário aplicados no solo (Freire, 2013). Tais insumos variam de acordo com o sistema de manejo. Como dito anteriormente, o transgênico segunda geração utiliza, no geral, menos insumos. Logo, também apresenta menores valores de aquecimento global quando comparado aos outros sistemas de manejo de um mesmo estado.

De forma geral, Mato Grosso, no sistema de manejo convencional, apresentou o maior valor para a categoria aquecimento global, com um total de 5,99 Kg CO₂ eq. Em contrapartida, Paraná, no manejo transgênico de segunda geração, alcançou uma emissão de 0,83 Kg CO₂ eq. Ou seja, um valor mais de seis vezes menor. Essa diferença de valores, ressalta a importância de se considerar os impactos ambientais na produção agrícola e as necessidades de se buscar práticas de manejo mais sustentáveis e eficientes em termos de emissões de gases de efeito estufa, para o manejo convencional. Além disso, demonstra a necessidade de adaptação de técnicas e práticas agrícolas para diferentes regiões e condições climáticas, a fim de maximizar os benefícios ambientais e minimizar as emissões de gases do efeito estufa.

Na categoria acidificação terrestre, novamente o estado que obteve o maior valor foi Mato Grosso no manejo convencional. A acidificação terrestre é resultante da queima de combustíveis fósseis e do uso de fertilizantes à base de nitrogênio e enxofre.

Mato Grosso convencional contribuiu para a acidificação dos solos e dos corpos d'água mais próximos, podendo afetar a qualidade do solo e da água, devido a queima de combustíveis fósseis e do uso de fertilizantes a base de nitrogênio e enxofre. Esses compostos liberam óxidos ácidos quando entram em contato com o ar e a água, levando a acidificação.

Mato Grosso convencional também se destacou na categoria eutrofização da água e ecotoxicidade terrestre, que acontecem principalmente devido à lixiviação de nitrato e emissão de metais pesados, decorrentes do uso de fertilizantes químicos.

A eutrofização, como já destacado, é um processo que ocorre quando uma grande quantidade de nutrientes, como nitrogênio e o fósforo, são depositados em rios, lagos, causando um aumento excessivo no crescimento de algas etc. Já, a ecotoxicidade é a capacidade de um produto químico em causar danos aos organismos e a vida selvagem. O uso excessivo de fertilizantes químicos contribui para ambos problemas ambientais.

Para a categoria ligada à toxicidade humana não-carcinogênica, Bahia e Maranhão obtiveram os maiores impactos para ambos os tipos de manejo - convencional e transgênico primeira geração. A categoria está relacionada diretamente com os impactos causados pelas emissões de metais pesados utilizados no sistema de produção como calcário, fertilizantes, sementes e pesticidas.

Para os valores encontrados, a toxicidade humana, que é a segunda categoria de maior

Tabela 12 - Resultados das avaliações dos impactos ambientais

Estados- manejo	Categorias de impacto								
	Aquecimento global	Depleção de Ozônio Estratosférico	Radiação ionizante	Formação de Ozônio (saúde humana)	Formação de Material Particulado	Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres)	Acidificaçã o Terrestre	Eutrofizaçã o de Água Doce	Eutrofização Marinha
	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kBq Co-60 eq	kg NOx eq	kg PM2.5 eq	kg NOxeq	kg SO2 eq	kg P eq	kg N eq
BA-C	2,78	5,57E-06	1,04E-02	3,29E-03	3,68E-03	3,67E-03	3,37E-03	1,92E-04	6,79E-04
BA-T1	2,74	8,88E-06	8,67E-03	2,26E-03	4,16E-03	2,65E-03	2,92E-03	1,43E-04	6,77E-04
BA-T2	2,68	8,4E-06	7,59E-03	2,15E-03	4,09E-03	2,53E-03	2,75E-03	1,27E-04	6,24E-04
GO-C	2,00	9,05E-06	9,33E-03	1,59E-03	2,18E-03	1,77E-03	2,47E-03	1,59E-04	3,35E-04
GO-T1	2,04	5,79E-06	8,74E-03	1,59E-03	1,64E-03	1,77E-03	2,47E-03	1,57E-04	3,34E-04
GO-T2	2,01	8,8E-06	1,24E-02	1,65E-03	2,28E-03	1,83E-03	2,78E-03	1,85E-04	3,31E-04
MA-C	4,84	7,18E-06	9,38E-03	3,62E-03	6,74E-03	4,35E-03	4,42E-03	1,64E-04	6,04E-04
MA-T1	3,25	6,21E-06	9,21E-04	2,60E-03	4,18E-03	3,05E-03	3,30E-03	6,15E-05	5,98E-04
MA-T2	4,55	1,07E-05	7,95E-03	3,47E-03	7,54E-03	4,20E-03	4,20E-03	1,35E-04	-4,53E-04
MG-C	2,09	8,11E-06	2,48E-03	2,91E-03	2,70E-03	3,14E-03	3,26E-03	5,33E-05	1,01E-03
MG-T1	2,04	7,98E-06	2,25E-03	2,76E-03	2,58E-03	2,99E-03	2,95E-03	3,82E-05	1,01E-03
MG-T2	2,38	9,16E-06	1,60E-02	3,07E-03	3,07E-03	3,34E-03	3,43E-03	3,45E-04	1,33E-03
MS-C	1,68	6,7E-06	1,05E-03	1,38E-03	6,76E-04	1,46E-03	2,23E-03	1,85E-04	1,26E-03
MS-T1	1,66	1,04E-05	1,03E-02	1,36E-03	1,16E-03	1,43E-03	2,17E-03	2,81E-04	1,26E-03
MS-T2	1,25	8,52E-06	1,19E-03	9,64E-04	6,33E-04	9,91E-04	1,66E-03	5,37E-05	7,95E-04
MT-C	5,99	1,18E-05	1,45E-02	6,84E-03	9,45E-03	7,55E-03	9,65E-03	1,87E-03	-2,34E-04
MT-T1	4,37	1,09E-05	8,37E-03	3,05E-03	6,48E-03	3,67E-03	3,95E-03	1,44E-04	-3,43E-04
MT-T2	4,33	1,05E-05	1,21E-03	2,87E-03	6,41E-03	3,49E-03	3,77E-03	5,91E-05	-3,25E-04
PR-C	0,87	7,34E-06	5,64E-03	6,23E-04	4,01E-04	6,40E-04	1,09E-03	9,98E-05	1,04E-03
PR-T1	0,87	7,34E-06	5,30E-03	6,13E-04	3,94E-04	6,31E-04	1,08E-03	9,40E-05	1,04E-03
PR-T2	0,83	6,91E-06	4,50E-03	5,64E-04	3,60E-04	5,80E-04	9,77E-04	8,06E-05	9,61E-04
RS-C	1,86	8,29E-06	6,98E-03	1,25E-03	1,89E-03	1,41E-03	1,82E-03	1,22E-04	8,23E-04
RS-T1	1,86	8,28E-06	6,90E-03	1,25E-03	1,89E-03	1,41E-03	1,81E-03	1,21E-04	8,23E-04
RS-T2	1,81	7,88E-06	5,43E-03	1,16E-03	1,83E-03	1,32E-03	1,68E-03	9,61E-05	7,69E-04
SP-C	1,12	7,76E-06	7,07E-03	8,77E-04	5,85E-04	9,02E-04	1,49E-03	1,21E-04	1,35E-05
SP-T1	1,12	7,76E-06	6,77E-03	8,67E-04	5,77E-04	8,92E-04	1,47E-03	1,16E-04	1,28E-05
SP-T2	1,11	7,75E-06	6,57E-03	8,59E-04	5,68E-04	8,84E-04	1,45E-03	1,14E-04	1,19E-05
TO-C	3,85	1,17E-05	1,11E-02	2,76E-03	5,11E-03	3,22E-03	4,08E-03	1,91E-04	-3,26E-04
TO-T1	3,85	1,17E-05	9,97E-03	2,74E-03	5,10E-03	3,21E-03	4,03E-03	1,72E-04	-3,20E-03
TO-T2	3,80	1,12E-05	8,98E-03	2,61E-03	5,02E-03	3,08E-03	3,83E-03	1,56E-04	-2,97E-03

Continua.

Estados- manejo	Categorias de impacto								
	Ecotoxicidad e Terrestre	Ecotoxicidad e Aquática	Ecotoxicidade Marinha	Toxicidade humana carcinogênica	Toxicidade Humana Não- Carcinogênica	Uso do Solo	Escassez de Recursos Minerais	Depleção de Recursos Fósseis.	Consumo de Água
	kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	m2 yr crop eq	kg Cu eq	kg oil eq	m³
BA-C	1,14	2,40E-02	6,98E-03	5,56E-03	26,99	4,03	4,24E-03	9,91E-02	3,08E-03
BA-T1	2,01	2,12E-02	2,70E-02	3,39E-02	25,80	4,31	4,56E-03	6,37E-02	2,65E-03
BA-T2	1,80	1,87E-02	2,40E-02	2,84E-02	18,28	4,23	4,04E-03	5,61E-02	2,40E-03
GO-C	2,26	-5,62E-02	-8,31E-02	3,18E-02	16,09	2,32	5,58E-03	6,82E-02	3,27E-03
GO-T1	1,00	-5,82E-02	-2,08E-02	2,65E-03	20,11	2,32	4,59E-03	6,79E-02	3,25E-03
GO-T2	2,39	2,61E-02	3,29E-02	2,97E-02	8,73	2,25	6,85E-03	8,30E-02	3,24E-03
MA-C	1,18	2,10E-02	6,36E-03	1,16E-02	25,76	4,90	4,12E-03	7,46E-02	2,97E-03
MA-T1	1,04	7,97E-04	6,72E-04	7,05E-03	21,10	5,03	4,03E-03	6,91E-02	2,82E-03
MA-T2	2,13	2,03E-02	2,68E-02	3,68E-02	11,58	4,82	4,36E-03	6,32E-02	2,53E-03
MG-C	4,25	1,44E-03	3,29E-03	2,20E-02	11,88	2,50	7,86E-03	1,12E-01	3,48E-03
MG-T1	3,65	1,08E-03	2,77E-03	2,06E-02	8,05	2,49	5,83E-03	9,93E-02	2,56E-03
MG-T2	4,41	4,82E-02	6,32E-02	6,98E-02	6,19	2,98	7,77E-03	1,15E-01	3,61E-03
MS-C	1,11	1,00E-03	1,00E-03	9,10E-04	19,76	1,69	4,96E-03	7,73E-02	3,48E-03
MS-T1	2,59	1,00E-03	1,00E-03	3,20E-02	-13,27	1,69	5,78E-03	7,37E-02	3,33E-03
MS-T2	1,90	1,00E-03	1,00E-03	6,26E-03	-14,80	1,02	4,81E-03	5,79E-02	2,75E-03
MT-C	9,33	8,36E-03	8,07E-03	4,48E-02	16,38	4,16	3,04E-02	5,72E-01	4,30E-02
MT-T1	2,13	2,09E-02	2,70E-02	3,57E-02	16,19	4,10	4,89E-03	6,47E-02	2,87E-03
MT-T2	1,96	1,46E-03	1,78E-03	1,41E-02	-0,58	4,03	5,23E-03	5,84E-02	2,69E-03
PR-C	1,34	1,53E-02	1,93E-02	1,58E-02	0,78	0,99	3,18E-03	3,81E-02	2,10E-03
PR-T1	1,32	1,50E-02	1,91E-02	1,56E-02	0,78	0,98	3,12E-03	3,69E-02	2,02E-03
PR-T2	1,19	1,32E-02	1,71E-02	1,22E-02	0,12	0,91	2,79E-03	3,27E-02	1,77E-03
RS-C	1,58	1,71E-02	2,21E-02	2,08E-02	5,93	2,02	3,73E-03	4,72E-02	2,53E-03
RS-T1	1,57	1,69E-02	2,21E-02	2,05E-02	3,96	2,02	3,70E-03	4,67E-02	2,52E-03
RS-T2	1,41	1,50E-02	1,96E-02	1,66E-02	3,17	1,96	3,25E-03	3,98E-02	2,09E-03
SP-C	1,71	1,92E-02	2,41E-02	2,35E-02	17,85	1,00	4,32E-03	5,31E-02	2,40E-03
SP-T1	1,69	1,86E-02	2,38E-02	2,30E-02	15,42	1,00	4,24E-03	5,19E-02	2,34E-03
SP-T2	1,68	1,83E-02	2,36E-02	2,06E-02	10,63	1,00	4,15E-03	5,08E-02	2,33E-03
TO-C	2,73	2,87E-02	3,64E-02	3,97E-02	17,83	5,20	6,36E-03	8,11E-02	3,96E-03
TO-T1	2,71	2,80E-02	3,62E-02	4,04E-02	9,74	5,20	6,18E-03	7,88E-02	3,66E-03
TO-T2	2,47	2,53E-02	3,27E-02	3,52E-02	8,33	5,11	5,63E-03	7,12E-02	3,36E-03

Fonte: Elaboração própria

importância (Tabela 12). Essa categoria tem como maior contribuidor individual a emissão de cádmio ao solo, responsável por 82% dos insumos. Esse cádmio vem exclusivamente dos fertilizantes fosfatados que deixam no solo 1,9 mg de Cd por kg de soja.

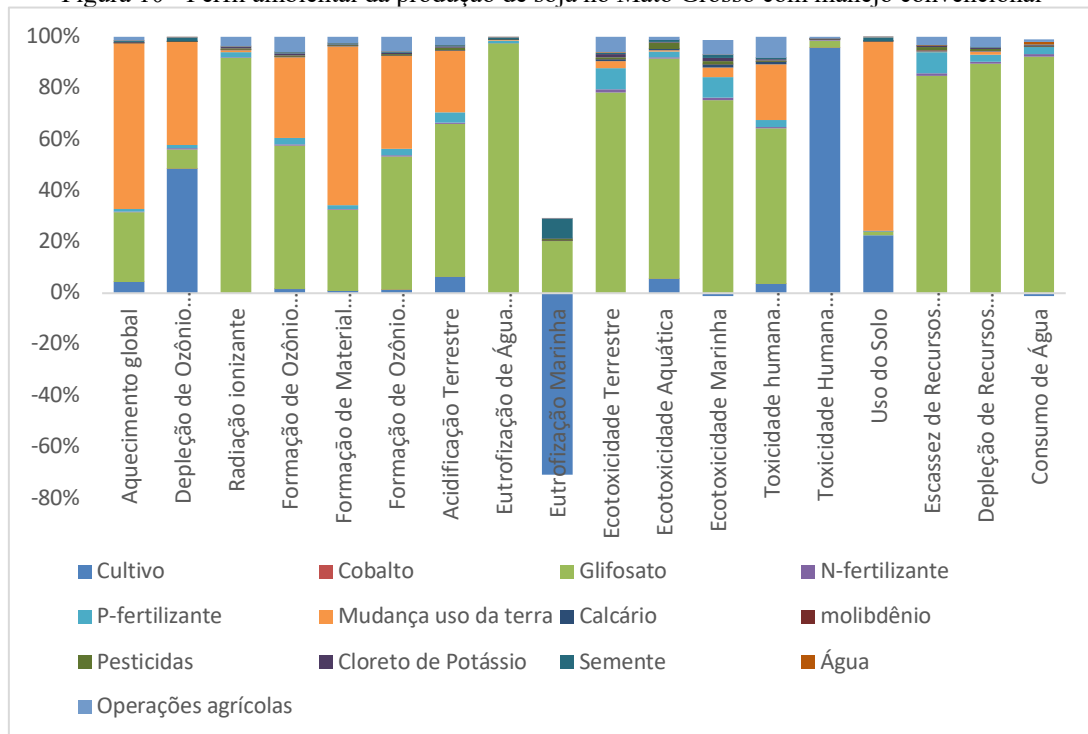
A categoria toxicidade humana é uma categoria de grande importância, já que impacta diretamente a saúde das pessoas. E o cádmio é um metal pesado extremamente tóxico que, quando presente em quantidades elevadas no solo, pode contaminar os alimentos e a água, causando graves problemas na saúde, como danos aos rins, ossos e pulmões, além de aumentar o risco de câncer. O fato de o cádmio vir exclusivamente dos fertilizantes fosfatados utilizados na produção de soja é preocupante, pois mostra que é possível reduzir essas emissões por meio da adoção de práticas mais sustentáveis na agricultura, como a utilização de fertilizantes orgânicos ou a redução de fertilizantes químicos.

Além da análise por regiões, é interessante observar que apesar do tipo de manejo transgênico segunda geração utilizar menos insumos como defensivos agrícolas, corretivos e sementes, ele não obteve impactos ambientais menores em comparação aos outros tipos de manejo, tendo resultados variados nas diversas categorias e estados.

Dentre todos os estados e manejos, Mato Grosso com tipo de manejo convencional obteve o pior desempenho em um grande número de categorias de impacto. Com o objetivo de demonstrar com mais detalhadamente os principais fatores que influenciaram esse resultado, a Figura 10 apresenta o perfil ambiental do estado e manejo.

É possível observar que os principais fatores que influenciaram o desempenho insatisfatório do Mato Grosso, no manejo convencional, são o uso do herbicida glifosato e a mudança no uso da terra. De acordo com dados do Instituto Soja Livre (2022), Mato Grosso é o estado brasileiro que possui a maior área destinada ao cultivo de soja não-transgênica, representando quase 50% do total da área total de soja convencional plantada no país. A previsão é que para a safra 2022/2023 esse número cresça em 35%, o que totaliza cerca de 491,6 mil hectares de soja convencional.

Figura 10 - Perfil ambiental da produção de soja no Mato Grosso com manejo convencional



Fonte: Elaboração própria

A produção de soja em si não tem relação direta com a eutrofização marinha, que é o processo em que há um aumento excessivo de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, nas águas costeiras, levando a um crescimento acelerado de algas e outros organismos.

No entanto, a forma como a soja é produzida pode ter impacto indireto na eutrofização marinha. Por exemplo, se a produção de soja envolver o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados e fosfatados, a lixiviação desses nutrientes para o solo e as águas subterrâneas pode acabar alcançando as águas costeiras e contribuir para a eutrofização marinha.

Portanto, a produção de soja em si não é a causa direta da eutrofização marinha, mas é importante considerar os impactos ambientais associados à sua produção. O que faz sentido dada a localização do estado do Mato Grosso que não tem acesso direto às águas costeiras.

4.3 Análise da ecoeficiência

A terceira e última etapa da metodologia Avaliação do Ciclo de Vida + Análise Envoltória de Dados é calcular os escores de ecoeficiência para cada unidade, nos diferentes tipos de manejo (DMUs), usando a abordagem DEA e encontrar *targets* de eficiência e potenciais ganhos econômicos para as DMUs classificadas como ineficientes.

Dessa forma, como apresentado no Capítulo 3, no método ACV+DEA de três passos tanto as categorias de impacto quanto alguns dos principais *inputs* do inventário são utilizados como entradas no modelo, enquanto a produtividade é utilizada como saída.

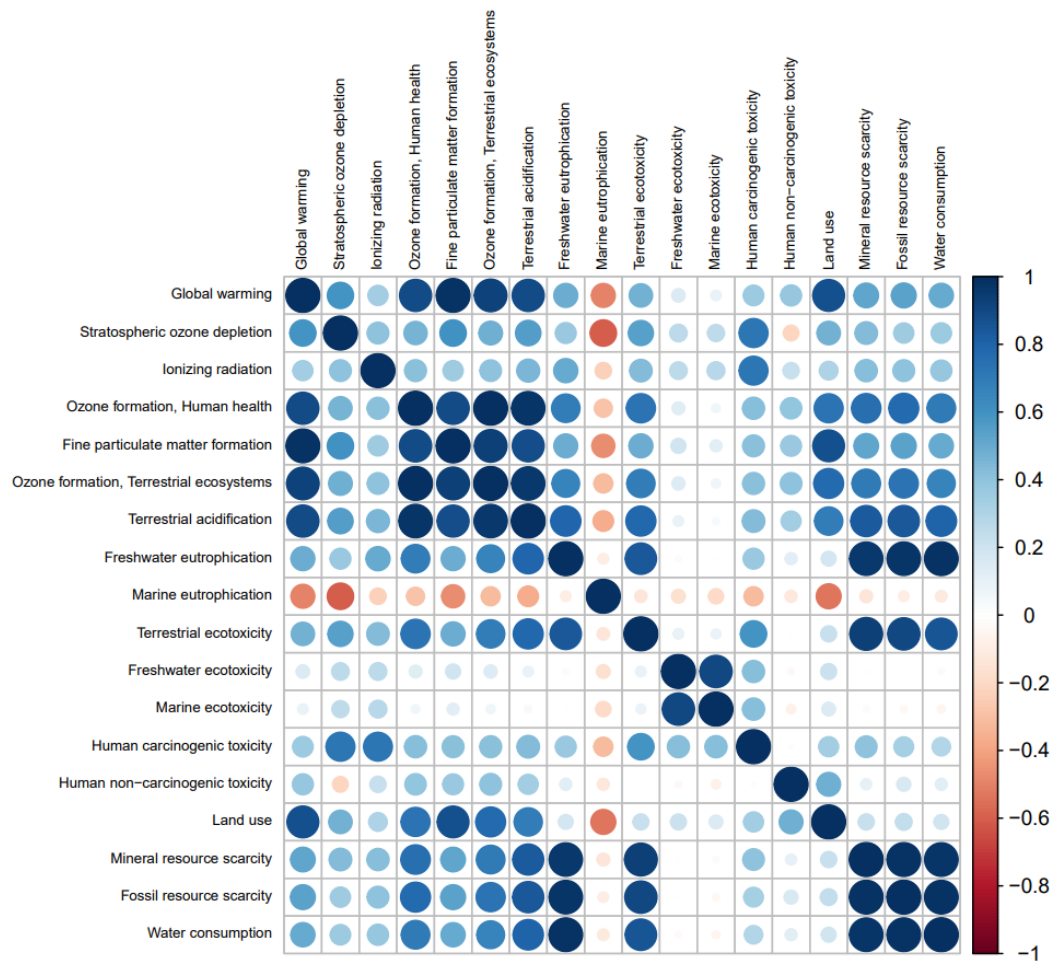
Como o número de categorias de impacto é grande, quando comparado ao número de DMUs, foi realizada uma análise de correlação para reduzir o número de entradas. Ao analisar os coeficientes de correlação (ρ) foi possível observar que algumas categorias são altamente correlacionadas ($\rho > 0,8$), como mostra a Figura 11.

A categoria aquecimento global, por exemplo, possui alta correlação com as categorias formação de ozônio, formação de material particulado, acidificação terrestre e uso da terra. Já, a depleção de recursos fósseis possui alta correlação com eutrofização da água, ecotoxicidade terrestre, escassez de recursos minerais e consumo de água. Dado isso, o número de categorias de impacto para aplicação DEA foi reduzido a oito categorias principais: aquecimento global, depleção de ozônio, radiação ionizante, depleção de recursos fósseis, eutrofização marinha, ecotoxicidade marinha, toxicidade humana carcinogênica e toxicidade humana não-carcinogênica.

Dado que as categorias de depleção de ozônio, radiação ionizante, eutrofização marinha e ecotoxicidade marinha apresentaram valores de impacto muito pequenos, com baixa variação entre as DMUs, essas categorias foram excluídas do modelo. A partir de então, as categorias de impacto realmente utilizadas como *inputs* no modelo DEA foram: aquecimento global, depleção de recursos fósseis, toxicidade humana carcinogênica e toxicidade humana não-carcinogênica.

Além das categorias de impacto, foram selecionados alguns *inputs* principais da análise do inventário. Para a seleção desses *inputs*, optou-se por escolher os que representam cada uma das etapas do processo produtivo. Foram escolhidos, o nitrogênio (fertilizantes), calcário (corretivo), pesticidas (formicidas, inseticidas e fungicidas), herbicidas e o diesel (operações agrícolas e transportes internos).

Figura 11 - Análise de correlação entre as categorias de impacto



Fonte: Elaboração própria

Esses *inputs* foram selecionados porque representam as principais etapas do processo produtivo, desde o uso de fertilizantes para nutrir as plantas até o transporte de produtos agrícolas, para então ter uma visão mais completa do impacto ambiental da produção agrícola, considerando não apenas as categorias de impacto, mas também os *inputs* principais envolvidos no processo produtivo.

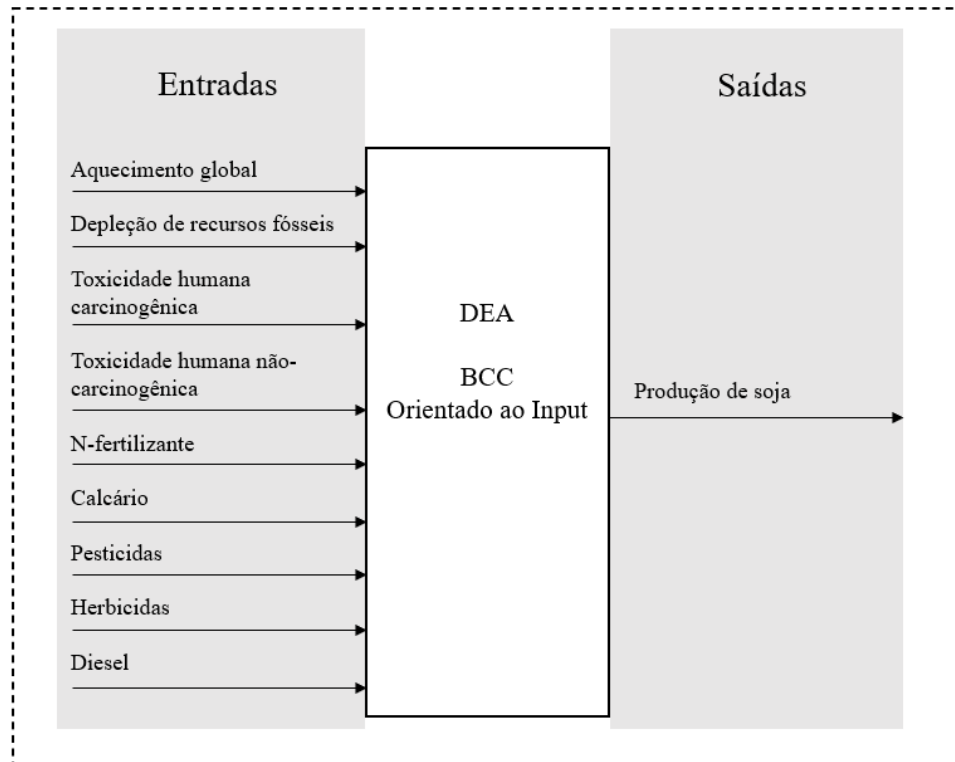
A partir das entradas e saída do modelo resumidas na Figura 12, aplicou-se o modelo BCC orientado ao *input* para o cálculo das eficiências utilizando o pacote *deaR* no *software* R.

Os escores de eficiência obtidos pela implementação do modelo DEA, apresentados na Figura 13, mostram que, das 30 unidades analisadas, 14 DMUs são classificadas como eficientes.

Das 14 DMUs eficientes, 9 são do tipo transgênico segunda geração, 3 do tipo transgênico primeira geração e 3 do manejo convencional. Isso sugere que a tecnologia transgênica de segunda geração apresenta melhor desempenho em termos de eficiência relativa do que a tecnologia transgênica de primeira geração e o manejo convencional.

Em resumo, a análise DEA, mostrou que apenas uma parte das unidades analisadas foram consideradas eficientes em termos de produção de *output* em relação aos *inputs* utilizados. E das unidades eficientes, a maioria utiliza tecnologia transgênica de segunda geração.

Figura 12 - Modelo DEA implementado



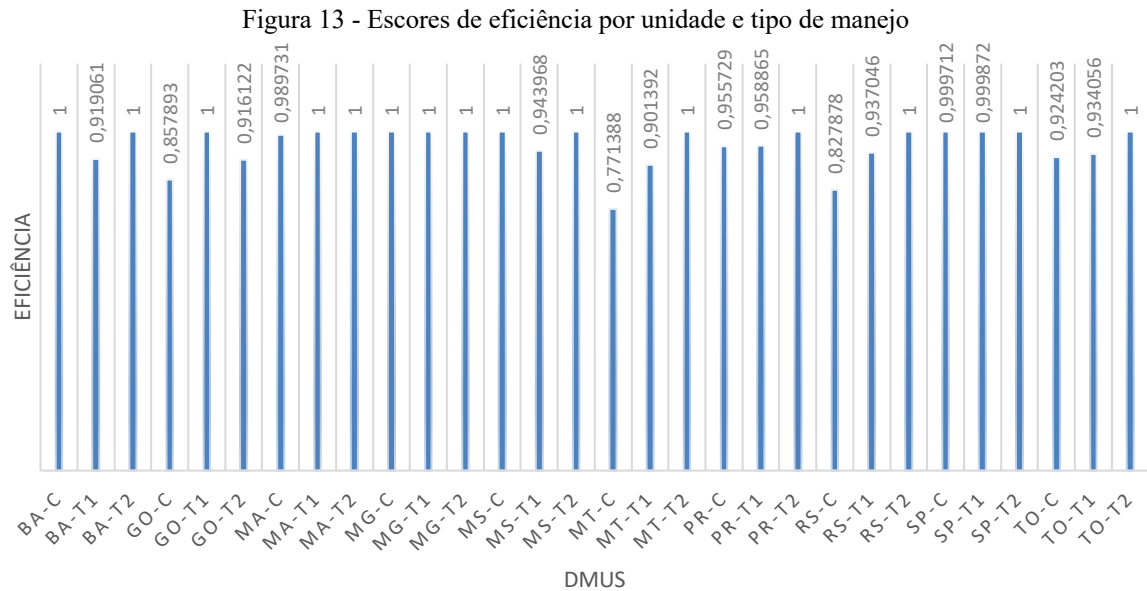
Fonte: Elaboração própria

É importante enfatizar que as DMUs classificadas como eficientes não necessariamente possuem desempenho idêntico. No contexto do modelo DEA, a eficiência apenas indica que, de acordo com os dados observados, não é possível produzir mais sem aumentar o consumo de recursos ou aumentar o impacto ambiental.

A eficiência de uma DMU não significa que ela está produzindo no nível máximo possível, mas sim que está utilizando seus recursos de forma otimizada em comparação com as outras DMUs avaliadas. No entanto, é importante destacar que a eficiência de uma DMU não significa necessariamente que ela esteja produzindo no nível máximo possível. Ou seja, mesmo que uma DMU seja considerada eficiente em relação às outras avaliadas, ainda é possível que ela possa melhorar sua produção ou reduzir o uso de recursos para manter sua eficiência em um nível mais elevado.

Além disso, mesmo entre as DMUs eficientes, pode haver variação na eficiência e no desempenho, dependendo das características específicas de cada DMU. Por exemplo, uma

DMU pode ser eficiente em um determinado período ou em um determinado mercado, mas pode não ser tão eficiente em outro contexto. Portanto, é importante avaliar a eficiência das DMUs de forma contínua e considerar as especificidades de cada caso para obter uma análise mais precisa.



Fonte: Elaboração própria

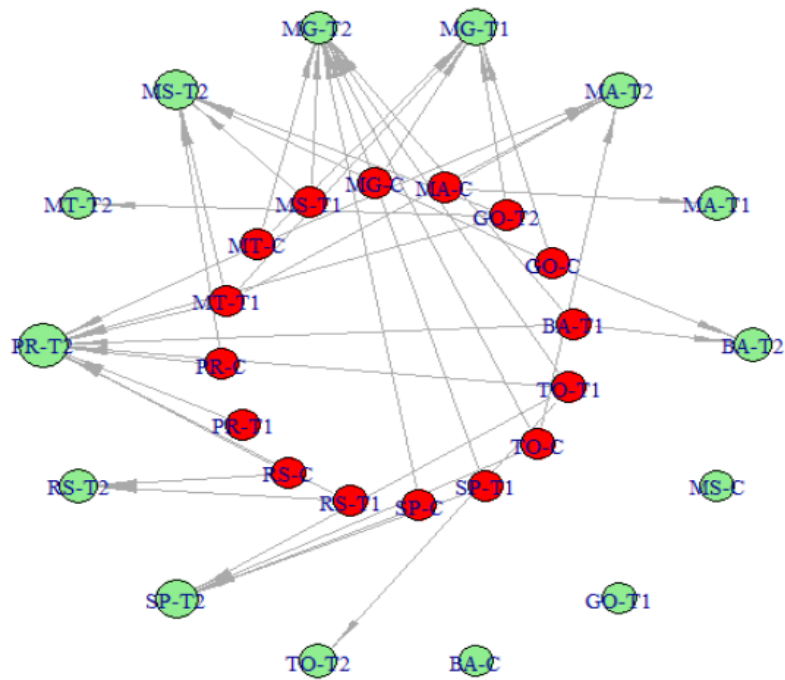
Ainda analisando os escores apresentados na Figura 13, nota-se que cada um dos estados analisados possui pelo menos um tipo de manejo na fronteira de eficiência. Considerando o manejo transgênico segunda geração, apenas Goiás não obteve o escore máximo. Mato Grosso do Sul convencional, Rio Grande do Sul convencional e Goiás convencional obtiveram os menores escores de eficiência, com valores de 0,77, 0,83 e 0,86 respectivamente.

Cada estado analisado possui pelo menos um tipo de manejo agrícola, que está na fronteira de eficiência, o que significa que esses estados estão operando nesses setores de maneira otimizada, em comparação com as outras DMUs avaliadas. As informações são específicas para o desempenho dos diferentes tipos de manejo em cada estado. Por exemplo, para o manejo transgênico de segunda geração, apenas Goiás não obteve o escore máximo de eficiência, sugerindo que os produtores em Goiás podem precisar adotar algumas mudanças em suas práticas para melhorar sua eficiência neste tipo de manejo. Por outro lado, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul e Goiás, os três no manejo convencional, obtiveram os menores escores de eficiência, indicando que os produtores nesses estados podem precisar realizar ajustes em suas práticas para otimizar seus recursos e melhorar a eficiência.

Na análise do impacto do ciclo de vida, Mato Grosso convencional já havia aparecido como o estado e manejo com o pior impacto em diversas categorias ambientais. Tal resultado indica que, além de impactos ambientais maiores, pode haver uma baixa eficiência operacional para a produção de soja não-transgênica no estado. A combinação da eficiência operacional com o impacto ambiental na produção de soja, sugerem que melhorias benéficas podem ser realizadas tanto para a melhoria da produção quanto para o meio ambiente.

Além do cálculo da eficiência, a DEA utiliza as DMUs eficientes como *benchmarks* para as DMUs que são consideradas ineficientes. Esses *benchmarks* são determinados pelas projeções das DMUs ineficientes na fronteira de eficiência. A Figura 14 explicita quais DMUs eficientes podem ser utilizadas como *benchmark* para cada DMU ineficiente.

Figura 14 - Escores de eficiência por unidade e tipo de manejo



Fonte: Elaboração própria

É possível observar que o Paraná transgênico segunda geração é a DMU que foi mais utilizada como referência, o que significa que muitas DMUs ineficientes podem se valer das práticas dessa DMU para identificar áreas de melhoria. Minas Gerais transgênico segunda e primeira geração foram as próximas DMUs a se apresentarem como referência na busca por um desempenho eficiente. Por outro lado, a Bahia convencional, Mato Grosso do Sul convencional e Goiás transgênico primeira geração apesar de estarem na fronteira de eficiência não foram considerados como *benchmark* para nenhuma DMU ineficiente. Isso pode indicar que, embora

essas DMUs apresentem um desempenho eficiente, não foram suficientemente superiores em termos de eficiência em relação a outras DMUs que foram usadas como *benchmarks*.

A partir dos *benchmarks* identificados para cada DMU ineficiente, é possível calcular as metas de redução necessárias para alcançar o desempenho das DMUs eficientes. Esse procedimento fornece informações para tomada de decisão com o intuito de diminuição nos insumos, o que resultaria em uma melhora na eficiência das unidades. Nesse sentido, a DEA possibilita a discriminação de pontos de operação ineficientes e metas de redução para cada impacto ambiental e insumo, de maneira a promover melhoria nos níveis de produção de soja e no impacto ambiental, para unidades ineficientes. Os resultados das metas de redução estão apresentados na Tabela 13.

Pela Tabela 13 é possível observar que há, em média, um potencial de redução de cerca 27% no uso de pesticidas (inseticidas, formicidas e fungicidas) e 23% no uso de herbicidas. Tal meta de redução no uso de agrotóxicos acompanha a média de redução de 28% na categoria de impacto toxicidade humana carcinogênica, que é diretamente ligada com a emissão de metais pesados advindas do uso de defensivos agrícolas.

Mato Grosso, no manejo convencional, que possui o menor índice de eficiência, apresenta potencial de redução de mais de 80% na utilização de recursos fósseis. Isso sugere que a unidade pode se beneficiar de mudanças em seus processos produtivos para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e, assim, melhorar sua eficiência nessa área. A partir dos *benchmarks*, foi possível identificar as áreas em que a unidade apresenta maior ineficiência e, assim, estabelecer metas de redução para melhorar a sua eficiência. Além disso, a unidade também apresenta metas de redução significativa em outras áreas, como aquecimento global com cerca de 58%, uso de pesticidas com cerca de 52% e herbicidas com cerca de 49%, o que indica que há espaço para melhorias em diversos aspectos ambientais e de sustentabilidade. Portanto, os resultados dessa análise podem fornecer *insights* importantes para a tomada de decisão e o planejamento estratégico na unidade de Mato Grosso.

Tabela 13 - Metas de redução para as DMUs ineficientes

DM Us	Eficiência	Metas de redução								
		Aquecimento global	Depleção de recursos fósseis	Toxicidade e humana carcinogênica	Toxicidade e humana não-carcinogênica	Diesel	Pesticida	N-fertilizante	Calcário	Herbicida
BA-T1	0,92	8,09%	10,97%	14,97%	23,47%	8,09%	23,85%	8,09%	11,56%	8,62%
GO-C	0,86	32,19%	14,21%	75,20%	91,45%	14,21%	26,08%	14,21%	38,42%	19,90%

GO-T2	0,92	8,39%	8,39%	42,69%	20,37%	8,39%	8,39%	24,59%	45,83%	41,38%
MA-C	0,99	28,80%	8,55%	1,03%	14,92%	4,74%	22,33%	1,03%	1,03%	18,76%
MS-T1	0,94	19,82%	16,23%	66,87%	5,60%	11,08%	8,43%	6,35%	6,87%	5,60%
MT-C	0,77	58,09%	86,14%	22,86%	30,51%	22,86%	52,10%	22,86%	22,86%	49,25%
MT-T1	0,90	50,38%	9,86%	56,01%	69,93%	9,86%	21,21%	9,86%	9,86%	20,13%
PR-C	0,96	4,43%	14,05%	23,14%	4,43%	13,20%	51,35%	7,54%	7,67%	30,05%
PR-T1	0,96	4,11%	11,37%	21,79%	4,17%	7,69%	37,53%	7,69%	7,69%	18,74%
RS-C	0,83	53,87%	30,38%	40,86%	27,43%	24,64%	17,21%	17,21%	38,68%	43,88%
RS-T1	0,94	9,41%	16,88%	21,76%	6,30%	9,98%	6,30%	7,82%	10,73%	23,30%
SP-C	0,99	0,03%	3,67%	11,02%	22,05%	8,10%	44,45%	0,03%	0,03%	11,30%
SP-T1	0,99	0,01%	1,73%	9,78%	15,77%	0,15%	13,48%	0,01%	0,01%	0,07%
TO-C	0,92	7,58%	18,81%	7,58%	21,41%	18,49%	66,33%	53,79%	7,58%	46,63%
TO-T1	0,93	6,59%	6,59%	7,65%	6,59%	14,05%	10,64%	12,35%	6,59%	8,18%
Média		19,5%	17,2%	28,2%	24,3%	11,7%	27,3%	12,9%	14,4%	23,1%

Fonte: Elaboração própria

Goiás convencional destaca-se por apresentar potenciais ganhos de 91% e 75% nas categorias de toxicidade humana carcinogênica e não-carcinogênica, respectivamente. Já, Goiás transgênico segunda geração apresenta metas de redução maiores, relacionadas ao uso de calcário (45%) e herbicida (41%). Na análise do inventário, Goiás foi o estado que teve o uso da maior quantidade de calcário por tonelada de soja; tal resultado sugere a existência de uma ineficiência operacional ligada com o processo de tratamento de solo e uso de defensivos agrícolas nesse estado e manejo.

Um aspecto final e muito importante da metodologia ACV + DEA é a possibilidade de, além de integrar as questões ambientais com as operacionais, também permitir a exploração de questões econômicas (VASQUEZ, 2012).

A Tabela 14 apresenta os potenciais de reduções econômicas que seriam possíveis de serem obtidas caso os estados, em cada manejo, aumentassem sua ecoeficiência com base nas metas de redução dos insumos utilizados no DEA.

Tabela 14 - Potencial de ganhos econômicos com base nas metas de redução

Estado	Insumos	Economia potencial total	Custo de produção	Economia/Custo
-				

manejo	Eficiência	Diesel	Pesticida	N-fertilizante	lime	Herbicida	Total por ton de soja	Total por ha	Total por ha	
BA-T1	0,92	R\$ 2,4	R\$ 50,0	R\$ 0,6	R\$ 5,6	R\$ 4,8	R\$ 63,4	R\$ 228,1	R\$ 5.081,4	4,5%
GO-C	0,86	R\$ 3,9	R\$ 120,5	R\$ 1,7	R\$ 14,1	R\$ 18,2	R\$ 158,3	R\$ 536,7	R\$ 5.870,7	9,1%
GO-T2	0,92	R\$ 2,0	R\$ 20,6	R\$ 2,7	R\$ 15,7	R\$ 33,4	R\$ 74,3	R\$ 269,9	R\$ 5.278,7	5,1%
MA-C	0,99	R\$ 1,6	R\$ 49,4	R\$ 0,1	R\$ 0,3	R\$ 15,8	R\$ 67,2	R\$ 217,7	R\$ 5.292,4	4,1%
MS-T1	0,94	R\$ 2,7	R\$ 25,7	R\$ 0,7	R\$ 1,8	R\$ 2,7	R\$ 33,7	R\$ 111,2	R\$ 4.860,1	2,3%
MT-C	0,77	R\$ 7,1	R\$ 226,5	R\$ 2,3	R\$ 5,5	R\$ 50,9	R\$ 292,3	R\$ 1.017,2	R\$ 5.566,6	18,3%
MT-T1	0,90	R\$ 3,0	R\$ 77,8	R\$ 1,0	R\$ 2,4	R\$ 16,4	R\$ 100,6	R\$ 350,0	R\$ 4.915,3	7,1%
PR-C	0,96	R\$ 6,5	R\$ 253,6	R\$ 0,5	R\$ 1,7	R\$ 14,8	R\$ 277,0	R\$ 997,4	R\$ 5.394,0	18,5%
PR-T1	0,96	R\$ 3,5	R\$ 144,0	R\$ 0,5	R\$ 1,7	R\$ 6,8	R\$ 156,5	R\$ 563,6	R\$ 4.943,6	11,4%
RS-C	0,83	R\$ 12,6	R\$ 33,6	R\$ 1,2	R\$ 16,0	R\$ 47,5	R\$ 110,9	R\$ 392,7	R\$ 5.492,7	7,1%
RS-T1	0,94	R\$ 4,6	R\$ 9,1	R\$ 0,5	R\$ 4,4	R\$ 19,1	R\$ 37,7	R\$ 133,4	R\$ 5.036,9	2,6%
SP-C	0,99	R\$ 2,8	R\$ 185,4	R\$ 0,0	R\$ 0,0	R\$ 3,5	R\$ 191,6	R\$ 684,1	R\$ 5.912,8	11,6%
SP-T1	0,99	R\$ 0,0	R\$ 36,1	R\$ 0,0	R\$ 0,0	R\$ 0,0	R\$ 36,2	R\$ 129,2	R\$ 5.162,5	2,5%
TO-C	0,92	R\$ 6,3	R\$ 233,8	R\$ 8,9	R\$ 1,7	R\$ 47,4	R\$ 298,0	R\$ 929,8	R\$ 5.282,3	17,6%
TO-T1	0,93	R\$ 4,7	R\$ 19,4	R\$ 2,0	R\$ 1,4	R\$ 4,1	R\$ 31,7	R\$ 98,8	R\$ 4.761,2	2,1%

Fonte: Elaboração própria

As estimativas dos ganhos apresentados na Tabela 14 foram baseadas nos preços dos valores unitários dos insumos nas planilhas do Agrianual. Exceto pelo valor do diesel, que foi calculado com base no preço médio do diesel por estado no segundo semestre de 2021 obtido da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2023).

Os resultados mostram uma economia estimada média de R\$ 444,00 por hectare de soja plantada, o que representa uma média de redução de 8% do custo total de produção dos estados e manejos considerados.

Dentre os estados que apresentaram maior potencial está o Mato Grosso convencional, com um valor estimado de mais de mil reais por hectare, representando 18% dos custos totais de produção. Considerando uma área plantada de soja convencional de 490 mil hectares (Soja livre, 20220), tal valor representaria uma economia estimada de aproximadamente R\$ 498 milhões.

Segundo os dados apresentados para o Paraná convencional, a economia estimada é de R\$997,00 por hectare, o que pode representar um montante significativo, quando considerada a área total destinada ao cultivo de soja no estado. Levando em conta a área uma área aproximada de 211 mil hectares (Soja livre, 2022) destinada ao cultivo de soja convencional representaria uma economia de R\$ 210 milhões.

Estes resultados são importantes para mostrar que existe uma margem para que os produtores do manejo convencional diminuam os custos vinculados à produção, para que o manejo convencional se torne economicamente mais viável.

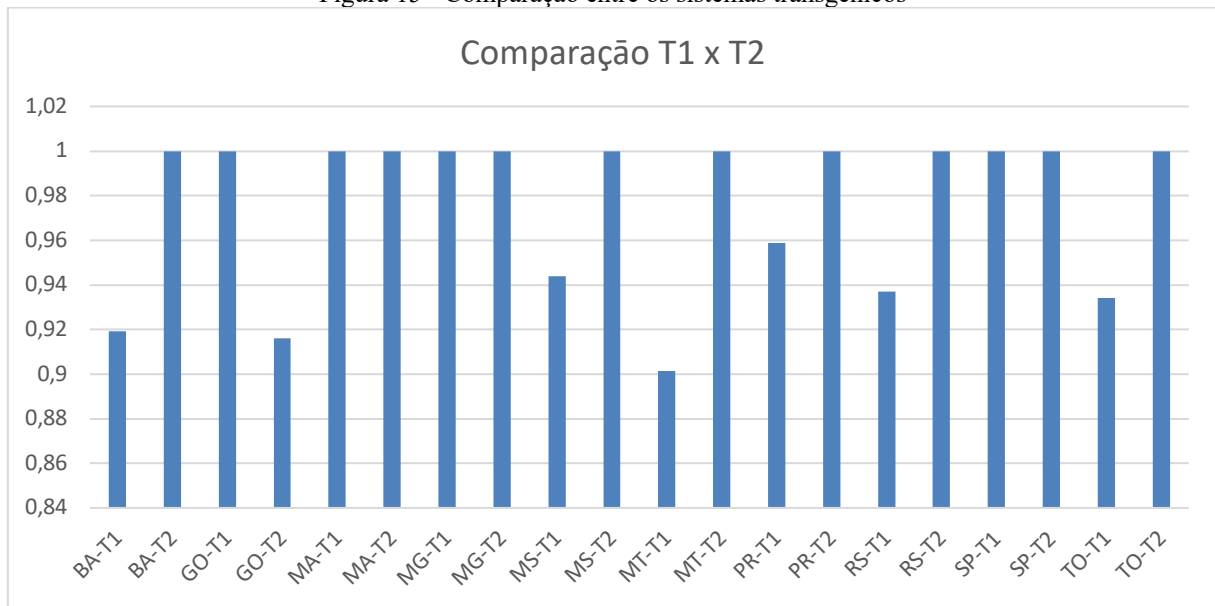
4.4 Análise dos sistemas transgênicos

A produção de soja tem sido beneficiada pelo uso de sementes transgênicas. As sementes transgênicas de primeira geração permitem aos produtores de soja uma maior eficiência no controle de plantas daninhas, resultando em um aumento significativo na produtividade da cultura.

A produção de soja, utilizando sementes transgênicas de segunda geração, tem permitido uma redução significativa no uso de herbicidas, o que resulta em uma agricultura mais sustentável e redução de custos para os produtores. Além disso, essas sementes também apresentam uma maior produtividade e qualidade de grãos.

De acordo com a Figura 15, as DMUs que apresentaram maior eficiência foram: BA-T2, GO-T1, MA-T1, MA-T2, MG-T1, MG-T2, MS-T2, MT-T2, PR-T2, RS-T2 e TO-T2, com valor máximo de 1 e as que apresentaram menor eficiência foram: MT-T1, PR-T1, RS-T1 e TO-T1.

Figura 15 - Comparação entre os sistemas transgênicos



Fonte: Elaboração própria.

Os fatores que contribuíram para os estados apresentarem maior eficiência na produção de soja podem ser diversos e podem incluir aspectos relacionados à genética da semente transgênica utilizada (se de primeira ou segunda geração), tecnologias de plantio e colheita, manejo do solo, clima favorável, infraestrutura adequada para o transporte e armazenamento da safra, entre outros.

A produção de soja na região Nordeste, em especial na Bahia e no Maranhão, tem apresentado um crescimento expressivo. Na Bahia, a produção de soja vem se expandindo principalmente na região oeste do estado, onde o clima é mais favorável para a cultura. Segundo dados da Associação dos Produtores de Soja e Milho da Bahia (Aprosoja Bahia, 2022), a safra de soja 2020/2021 do estado foi de cerca de 6,5 milhões de toneladas, sendo a segunda maior safra da história da Bahia. A maior parte da produção de soja na Bahia utiliza sementes transgênicas de segunda geração, que apresentam resistência a herbicidas e a pragas, o que favorece o aumento da produtividade.

No Maranhão, a produção de soja também vem se destacando, principalmente na região do cerrado maranhense. A produção de soja no estado teve um crescimento expressivo nas últimas décadas, chegando a cerca de 3,3 milhões de toneladas na safra 2020/2021, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022). A maioria dos produtores de soja no Maranhão utiliza sementes transgênicas de primeira geração, que apresentam resistência a herbicidas, mas não a pragas. A produção de soja no Maranhão tem sido alvo de críticas devido aos impactos socioambientais decorrentes do uso intensivo de agrotóxicos e da expansão

da fronteira agrícola em áreas de cerrado, que são ecossistemas sensíveis e importantes para a conservação da biodiversidade.

A produção de soja transgênica de primeira e segunda geração na região Centro-Oeste do Brasil é muito importante para a economia da região e do país como um todo, e apresenta diferenças em relação à produção convencional de soja.

No Mato Grosso, que é o maior produtor de soja do Brasil, a maioria da produção de soja é transgênica de primeira geração, com o uso de variedades resistentes a herbicidas como o glifosato, o que facilita o controle de plantas daninhas e aumenta a produtividade. Já a produção de soja transgênica de segunda geração ainda é pouco explorada na região, mas tem potencial para oferecer benefícios adicionais, como maior resistência a doenças e a pragas, e maior teor de nutrientes.

No Mato Grosso do Sul, a produção de soja transgênica de primeira geração também é predominante, com o uso de variedades resistentes a herbicidas. No entanto, a produção de soja convencional ainda é significativa, especialmente em áreas de preservação ambiental e de agricultura familiar. A produção de soja transgênica de segunda geração ainda é incipiente na região.

Em Goiás, a produção de soja transgênica de primeira geração é significativa, com o uso de variedades resistentes a herbicidas. A produção de soja convencional também é relevante, especialmente em áreas de preservação ambiental. A produção de soja transgênica de segunda geração ainda é pouco explorada na região, mas há potencial para seu desenvolvimento.

A produção de soja na região Centro-Oeste, seja ela transgênica ou convencional, é feita principalmente em grandes propriedades rurais, com o uso intensivo de maquinário e tecnologia para a preparação do solo, plantio, colheita e armazenagem. O uso de sementes de alta qualidade, adubação, controle de pragas e doenças, e manejo adequado de irrigação são fatores importantes para o aumento da produtividade e qualidade da soja produzida na região.

No sudeste do Brasil, em especial nos estados de MG e SP, a soja transgênica é amplamente utilizada pelos agricultores. Na maioria das vezes, a variedade de soja transgênica mais cultivada na região é a soja transgênica de primeira geração, que é resistente ao herbicida glifosato.

A produção agrícola é diversificada, com destaque para a produção de café, cana-de-açúcar, milho, feijão e soja. A produção de soja é significativa em algumas regiões do estado, como no Triângulo Mineiro e no Alto Paranaíba, em MG e em São Paulo, a produção de soja é significativa em algumas regiões do estado, como na região de Sorocaba e no Vale do Paraíba.

O Paraná é o segundo maior produtor de soja do Brasil, atrás apenas do Mato Grosso. A produção de soja no Paraná é concentrada nas regiões Oeste, Norte e Noroeste do estado.

No Rio Grande do Sul, o estado é o terceiro maior produtor de soja do Brasil, com produção concentrada principalmente nas regiões Noroeste, Norte e Missões.

Assim como em outras regiões do Brasil, a produção de soja no sul do país, especialmente nos estados do Paraná e do Rio Grande do Sul, também utilizam amplamente as variedades de soja transgênica. A variedade de soja transgênica mais utilizada é a de primeira geração, resistente ao herbicida glifosato. No entanto, à medida que novas variedades de soja transgênica de segunda geração são desenvolvidas e se tornam disponíveis, é possível que a utilização dessas variedades também aumente na região.

Tocantins está localizado na região Norte do Brasil. A produção agrícola é diversificada, com destaque para a produção de soja, milho, arroz, feijão e algodão. O estado é um dos principais produtores de soja do Brasil, com destaque para as regiões de Pedro Afonso e de Palmas. No estado, a produção de soja é uma atividade agrícola importante, e a variedade mais utilizada é a soja transgênica de primeira geração.

No entanto, é importante lembrar que a eficiência na produção de soja não deve ser analisada apenas em termos de produtividade, mas também em relação aos impactos ambientais e sociais decorrentes desse tipo de produção.

De fato, vários fatores podem influenciar a eficiência da produção de soja, como mencionado anteriormente. A escolha da semente transgênica pode ser um desses fatores, uma vez que as sementes de segunda geração podem oferecer benefícios adicionais em relação às de primeira geração, como resistência a mais pragas e doenças, além de maior produtividade.

No entanto, outros fatores também são importantes, como o manejo adequado do solo, que pode incluir práticas como rotação de culturas, uso de adubos orgânicos e controle adequado de pragas e doenças. Além disso, as condições climáticas e a disponibilidade de água e nutrientes também podem influenciar diretamente a produtividade da cultura.

5 CONCLUSÃO

Os resultados da ecoeficiência para os estados e manejos analisados deixaram clara a importância do estudo e mensuração dos pontos operacionais críticos. As informações decorrentes do presente trabalho são de grande valia para apoiar decisões na busca por uma produção agrícola mais eficiente do ponto de vista ambiental, de acordo com a definição de ecoeficiência, e do ponto de vista econômico, considerando a possibilidade de redução de custos de produção para operação na fronteira de eficiência.

O estudo analisou o impacto ambiental e a ecoeficiência da produção de soja em dez estados brasileiros, levando em consideração três tipos de manejo: convencional, transgênico de primeira geração e transgênico de segunda geração. Foram utilizados inventários de ciclo de vida e a metodologia *ReCiPe Midpoint* para avaliar 18 categorias de impacto. O modelo DEA foi aplicado para calcular a ecoeficiência e definir metas individuais para reduzir os impactos ambientais e aumentar a eficiência operacional.

Os resultados mostraram que o tipo de manejo transgênico de segunda geração não necessariamente possui o menor impacto ambiental. As quatro categorias de impacto mais críticas foram toxicidade humana não-carcinogênica, uso do solo, aquecimento global e ecotoxicidade terrestre, diretamente ligadas às emissões de dióxido de carbono e óxido nítrico e emissões de metais pesados no solo. O estado de Mato Grosso, com manejo convencional, obteve o maior impacto ambiental em diversas categorias, principalmente pelo uso de herbicidas e mudança no uso da terra.

O modelo DEA indicou que 14 das 30 unidades tomadas de decisão foram classificadas como eficientes, sendo que Mato Grosso, Rio Grande do Sul e Goiás, todas no manejo convencional, tiveram os piores escores. Os insumos que apresentaram maior média de possibilidade de redução foram pesticidas e herbicidas, com alvos médios de 27% e 23%, respectivamente. A economia média estimada por hectare, caso as unidades operassem na fronteira de eficiência, foi de R\$444,00, representando cerca de 8% do custo médio total de produção dos estados e manejos considerados. Mato Grosso apresentou o maior potencial de ganho econômico decorrente de ajustes, equivalente a cerca de R\$1.000 por hectare, o que representa uma diminuição de quase 20% do custo total de produção. A economia total estimada para Mato Grosso, considerando uma área estimada de 490 mil hectares destinada ao cultivo da soja convencional, é de R\$498 milhões.

A ecoeficiência é uma abordagem que busca conciliar a redução de impactos ambientais com a melhoria da eficiência econômica da produção. Dessa forma, o estudo e mensuração dos pontos operacionais críticos são fundamentais para identificar os gargalos e as oportunidades de melhoria do processo produtivo.

A ecoeficiência é uma abordagem que busca conciliar a redução de impactos ambientais com a melhoria da eficiência econômica da produção. Portanto, o estudo e a mensuração dos pontos operacionais críticos são fundamentais para identificar gargalos e oportunidades de aprimoramento no processo produtivo.

É importante ressaltar que os resultados podem ser mais específicos e precisos se houver um detalhamento das informações sobre cada tipo de manejo agrícola. Além disso, é necessário mencionar que os dados utilizados neste trabalho são secundários e, portanto, estão sujeitos a limitações, principalmente em relação à restrição geográfica, falta de dados para outros estados e ausência de dados regionalizados.

REFERÊNCIAS

- AGRIANUAL. *Relatório de Custo de Produção*. [S.l.]: IHS Markit, 2021. 104 p. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 50.
- AGROLINK. Tecnologia de Sementes – Conceitos. Disponível em: Acesso em: 04/05/2018
- ANDA. Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2009-2010. São Paulo, 2011.
- ANDERSSON, K. **LCA of food products and production systems**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 5, n. 4, p. 239-248, 2000.
- AMARAL, L.; JAIGOBIND, J.S.; JAIGOBIND, A.G.A.; **Dossiê Técnico: Óleo de Soja**; Instituto de Tecnologia do Paraná – TECPAR. p. 05-08. nov, 2006.
- ARAËJO, Aracy; SILVA, Yasmin Twanne de Cássia. **Avaliação do ciclo de vida agrícola de cultivos orgânico, convencional e transgênico de milho: potenciais impactos ambientais**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 1-18, 17 dez. 2021. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2022v15n4e9949>.
- ALMEIDA, F. **Os Desafios da Sustentabilidade: uma ruptura urgente**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. Citado na página 24.
- ALMEIDA, L. A. d. et al. **Melhoramento da soja para regiões de baixas latitudes. Recursos Genéticos e Melhoramento de Plantas Para o Nordeste Brasileiro**, v. 15, 1999. Citado na página 13.
- ALTAMIRANO, C. A. A. **ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DO BIODIESEL DE SOJA: UMA COMPARAÇÃO ENTRE AS ROTAS METÉLICA E ETÍLICA**. Tese (Dissertação (Mestrado)) — Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- ALVES, C.; Nova, Q. Aerossóis Atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. Escola Superior de Tecnologia e Gestão. vol. 28, n. 5, pag. 859-870, 13 abr. 2005.
- ANDRIOLI, A. I. **Soja Orgânica versus soja transgênica**. Chapecó: Editora FFS, 2016. Citado na página 22.
- APLICADA, Instituto de Economia (IEA). TEMPO TOTAL DE OPERAÇÃO. 1998. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/ie/1998/tec1-0198.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.
- APROSOJA. Disponível em: <http://www.aprosoja.com.br/>. Acesso em: 10 jan. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14001: **Sistema de gestão ambiental - especificação e diretrizes para uso**. Brasil, 1996. 22 p. Citado 3 vezes nas páginas 26, 28 e 33.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: **Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura**. Brasil, 2001. 10 p. Citado 8 vezes nas páginas 4, 25, 26, 27, 28, 33, 34 e 44.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14041: **Gestão ambiental -**

avaliação do ciclo de vida - avaliação do impacto do ciclo de vida. Brasil, 2004a. 25 p. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 33.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14042: **Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - avaliação do impacto do ciclo de vida.** Brasil, 2004b. 17 p. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 33.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: **Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações.** Brasil, 2009. 46 p. Citado 7 vezes nas páginas 4, 33, 34, 36, 37, 39 e 40.

BARBOSA, V. da S.; PELUZIO, J. M.; AFFÉRI F. S.; SIQUEIRA, G. B. de. **Comportamento de Cultivares de Soja, em Diferentes Épocas de Semeaduras, Visando à Produção de Biocombustível.** Revista Ciência Agronômica, v.42, n.3, 742- 749, . 2011.

BATISTA, Marcos Rafael Pereira. **Análise de Ciclo de Vida (ACV) de óleos refrigerantes para transformadores: comparação entre óleo mineral e óleo vegetal.** 2021. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis.** Management Science, v. 30, n. 9, 1984. Citado na página 43.

Barden Grillo, I., Maciel, V. G., Zortea, R. B., & Seferin, M. (2017). **Avaliação Estatística dos Inventários do Ciclo de Vida da Produção de Soja no Brasil.** *LALCA: Revista Latino-Americana Em Avaliação Do Ciclo De Vida*, 1(2 esp.), 7. <https://doi.org/10.18225/lalca.v1i1.3069>.

BENEDET JÚNIOR, G. **Avaliação de incertezas em inventários do ciclo de vida.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 35.

Braga, M. R., & Santos, M. M. (2016). **A evolução da tecnologia de sementes transgênicas na soja.** In Simpósio de Ciências Agrárias (pp. 1-6).

BROOKES, G.; BARFOOT, P. **GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2012.** PG Economics Ltd, Dorchester, 2014.

BOOTS, B. N. Voronoi (Thiessen) **Polygons.** [S.l.: s.n.], 1986. Citado na página 52.

Bueno, F. F., & Figueiredo, R. B. (2019). **O uso de sementes transgênicas na produção de soja no Brasil.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 7(1), 15-28.

CAVALETT, O. **Análise do ciclo de vida da soja.** 2009. 245 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

CAVALETT, O.; CHAGASM, M. F.; et al. **Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods.** International Journal of Life Cycle Assessment. v. 18, p. 647-658, 2012.

CARVALHO, I. R. et al. **Demanda hídrica das culturas de interesse agrônômico.** Enciclopédia Biosfera, v. 9, n. 17, 2013. p. 783-799.

CASTANHEIRA, É. G.; FREIRE, F. **Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems**. *Journal of Cleaner Production*, v. 54, p. 46-60, 2013.

CNA. **Panorama do Agro**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>>. Acesso em: 1 Nov. 2021.

CARRER, H. **Biotecnologia na Agricultura**. SCIELO Brasil, São Paulo, vol.24 n°.70,2010.

CHARNES, A.; COOPER, W.; RHODES, E. **Measuring the efficiency of decision-making units**. *European Journal of Operational Research*, v. 2, p. 429-444, 1978.

CHARNES, A. et al. **Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 104 p.

CLAUDINO, E. S.; TALAMINI, E. **Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, p. 77-85, 2013.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2019**. Brasília, 2019.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Norma Metodologia Do Custo De Produção 30.302**. Brasília, 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a agropecuária 2019/2020**. Brasília, 2020. v. 7.

CUNHA, R. C.; ESPÍNDOLA, C. J. **A dinâmica geoeconômica recente da cadeia produtiva da soja no Brasil e no mundo**. *GeoTextos*, v. 11, n. 1, p. 217-238, 2015.

COOK, W. D.; TONE, K.; ZHU, J. **Data envelopment analysis: Prior to choosing a model**. *Omega*, v. 44, p. 1-6, 2014.

DALL'AGNOL, A. et al. **O complexo agroindustrial da soja brasileira**. *Embrapa Soja*, 2007. Citado na página 14.

DIAS, R. **Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade**. São Paulo: Atlas, 2006. 232 p. Citado na página 24.

DUTRA, E. G.; et al. **Emissão Veicular e o Ozônio Troposférico na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil**. In: CIBIM9 - 9º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2009, Las Palmas de Gran Canaria. Anais... (9º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica), Las Palmas de Gran Canaria, 2009, p. 29-33.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Coleção 500 perguntas e 500 respostas: Soja**. Londrina, 2019. 3 v. Citado nas páginas 20, 21 e 22.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dados econômicos. **Soja em números (safra 2019/2020)**. Londrina, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 10 dez. 2020. Citado na página 8.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Evapotranspiração da soja no cerrado**. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/71924839/artigo-evapotranspiracao-atual-da-cultura-da-soja-no-cerrado>. Acesso em: 20 out. 2022.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry - Brazil**. Jaguariúna, 2018. Citado na página 50.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja transgênica. Londrina, 2021**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/soja-transgenica>. Acesso em: 1 nov. 2021. Citado na página 22.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014**. Londrina, 2014. Citado na página 19.

EMBRAPA. **Evapotranspiração da soja no cerrado**. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/71924839/artigo-evapotranspiracao-atual-da-cultura-da-soja-no-cerrado>. Acesso em: 20 out. 2022.

ESTEVEZ, Elisa Maria Mano. **Análise do ciclo de vida do biodiesel de soja: o impacto do sistema de integração lavoura pecuária (SILP)**. 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FORLEO, B.; PALMIERI, N. S. A. C. D. P. L. **The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy: joining environmental and economic assessment**. Journal of Cleaner Production, v. 172, 2018. Citado na página 9.

FAGUNDES, M. B. B.; SIQUEIRA, R. P. **Caracterização do sistema agroindustrial da soja em Mato Grosso do Sul**. Revista de Política Agrícola, v. 22, n. 3, 2013. Citado na página 14.

FURLANETO, F. d. P. B. et al. **Soja transgênica versus convencional: estimativa dos custos operacionais de produção na região do Médio Paranapanema, estado de São Paulo**. Ciência e Agrotecnologia, v. 32, n. 6, p. 1935–1940, 2008. Citado na página 22.

GALLI, B. J. A.; MONTEZUMA, C. M.; **Glifosato: Alguns aspectos da utilização do herbicida**: Acadcom .p. 55-56, 2005.

GENNARI, R. F. **Determinação de metais em material particulado pela técnica de espectrometria de emissão atômica de plasma de argônico induzido**. São Paulo, 1991. 90 p. Dissertação de mestrado – Instituto de Química, Universidade de São Paulo.

GOEDKOOOP, M. et al. **Recipe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level**. Primeira edição, Holanda, 2013.

HOBOLD, V. **Avaliação de metodologias para análise toxicológica utilizando algas do tipo *Scenedesmus subspicatus* e *Daphnia magna***. 2007, 84 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do extremo sul catarinense, Criciúma, 2007.

HUIJBREGTS, Mark A. J.; STEINMANN, Zoran J.N.; ELSHOUT, Pieter M.F.; STAM, Gea; VERONES, Francesca; VIEIRA, Marisa; ZIJP, Michiel; HOLLANDER, Anne; VAN ZELM, Rosalie. **ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, [s.l.], v. 22, n. 2, p.138-147, 22 dez. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.

IRIBARREN, D. et al. **Benchmarking environmental and operational parameters through eco-efficiency criteria for dairy farms**. *Science Total Environment*, v. 409, 2011. Citado na página 9.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040 : Environmental management—life cycle assessment—principle and framework**. [S.l.], 2006. Citado na página 26.

IPCC, 2006. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Agriculture, forestry and Other land use, Kanagawa, Japan**.

JAN, P. et al. **On the link between economic and environmental performance of swiss dairy farms of the alpine area**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, 2012. Citado na página 9.

LAZZARINI, S. G.; NUNES, R. **Competitividade do sistema agroindustrial da soja**. São Paulo: [s.n.], 2000. Citado 3 vezes nas páginas 4, 14 e 15.

LINS, M. P. E.; MEZA, L. Â. **Análise Envoltória de Dados e Perspectivas de Integração no Ambiente de Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.

MAIS SOJA. Disponível em: <https://maissoja.com.br/soja-intacta-2-xtend-saiba-quais-sao-as-novidades-na-nova-geracao-da-biotecnologia/>> Acesso em 21/12/2021.

MATEUS, R. P. G.; SILVA, C. M. **Avanços biotecnológicos na cultura da soja**. *Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias*, v. 8, n. 2, p. 23-27, dez. 2013.

MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R. **Agricultura de Precisão**. Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2000. Citado na página 20.

Manual de segurança e qualidade para a cultura da soja. – Brasília, DF : Embrapa Transferência de Tecnologia, 2005. 69 p. : il. – (Série Qualidade e segurança dos alimentos).

MARIANO, E. B.; ALMEIDA; REBELATTO, D. A. d. N. **Sistematização do processo de escolha dos modelos e perspectivas da análise envoltória de dados por meio de um sistema especialista**. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2010, São Carlos. [S.l.], 2010. Citado na página 30

MARIANO, E. B.; ALMEIDA, M. R.; REBELATTO, D. A. d. N. **Peculiaridades da análise por envoltória de dados**. In: Simpósio de engenharia de Produção - SIMPEP, 2006, Bauru. [S.l.], 2006. Citado 4 vezes nas páginas 4, 5, 31 e 32.

MASUDA, K. **Measuring eco-efficiency of wheat production in japan: A combined application of life cycle assessment and data envelopment analysis.** *Journal of Cleaner Production*, v. 126, 2016. Citado na página 9.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídio para a aplicação no Brasil.** 2013. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MILAZZO, M.; SPINA, F.; PRIMERANO, J. B. P. Soy biodiesel pathways: Global prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, p. 579–624, 2013. Citado na página 29.

MIRANDA, E. J. *Avaliação de ciclo de vida da soja mato-grossense.* Tese (Tese (Doutorado)) — Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016. Citado na página 29.

MOHAMMADI, A. et al. Potential greenhouse gas emission reductions in soybean farming: A combined use of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 54, 2013. Citado na página 9.

MOHAMMADI, A. et al. Joint life cycle assessment and data envelopment analysis for the benchmarking of environmental impacts in rice paddy production. *Journal of Cleaner Production*, v. 106, 2015. Citado na página 9.

MOHSENI, P.; BORGHEI, A.; KHANALI, M. Coupled life cycle assessment and data envelopment analysis for mitigation of environmental impacts and enhancement of energy efficiency in grape production. *Journal of Cleaner Production*, v. 197, 2018. Citado na página 9.

MOUSAVI-AVVAL, S. H. et al. Optimization of energy consumption for soybean production using Data Envelopment Analysis (DEA) approach. *Applied Energy*, v. 88, p. 3765–3772, 2011. Citado na página 32.

MORAIS, A. A. C.; SILVA, A. L. Valor nutritivo e Funcional da Soja. *Revista Brasileira de Nutrição Clínica*, v. 15, n.2, p. 306-315, 2000. 2000.

NORO, G. D. B. et al. A ecoeficiência e a gestão sustentável: um estudo de caso. *Simpósio de Excelência Em Gestão e Tecnologia*, 15, 2012. Citado na página 24.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. *Glossary of Statistical Terms: ECO-EFFICIENCY PROFILES.* Nova York: Oecd Publications, 2005. Citado na página 23.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. Física das radiações. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. PENA, R. F. A. Site da UOL, Mundo Educação. Disponível em: . Acesso em 07/02/2020, 15:13:14.

OMETTO, A. R. *Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, exergia e emergia.* Tese (Dissertação (Mestrado)) — Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Citado na página 25.

Oliveira, L. F., Oliveira, M. A., Peres, L. E. P., & Rezende, D. C. (2016). Agricultura e Biotecnologia: a evolução das sementes transgênicas. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde*, 14(2), 631-644.

PRUDÊNCIO DA SILVA, V.; VAN DER WERF, H.M.G.; SPIES, A. et al. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 9, p. 1831-1839, 2010.

PUGLIESE, A. C. V. *Valoração econômica pelo método de custo de reposição do efeito da erosão em sistemas de produção agrícola*. 158 p. Tese (Dissertação (Mestrado)) — Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas, **Campinas, Maringá**, 2007. Citado na página 19.

RAUCCI, G. S. et al. Greenhouse gas assessment of brazilian soybean production: a case study of mato grosso state. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 418–425, 2015. Citado na página 29.

REBOLLEDO-LEIVA, R. et al. A new method for eco-efficiency assessment using carbon footprint and network data envelopment analysis applied to a beekeeping case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 320, 2021. Citado na página 25.

Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida – RAICV. *Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro*. 2019. 165 p. Organização: Cássia Maria Lie Ugaya, José Adolfo de Almeida Neto e Maria Cléa Brito de Figueiredo. Brasília, DF: Ibict.

REICHEL, Leandro de Souza. *INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV) DA PRODUÇÃO DE SOJA NO PARANÁ*. 2012. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Bioenergia da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

RIBEIRO, M. L.; et al. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 688-694, 2007.

RINALDI; A,G; Dechechi, C,E.; Sobrinho C,J. Análise Comparativa dos Custos de Produção entre uma Variedade de Soja não Transgênica e uma Variedade Transgênica em Toledo-Paraná *Revista Gestão Industrial*;V. 1, n. 3, pg 326 327, 2005.

RODALE INSTITUTE, The Farming Systems Trial, 2019, 22p. Disponível em: <<https://mk0rodaleinstitydwux.kinstacdn.com/wp-content/uploads/fst-30-year-report.pdf>> Acesso em: 31/07/2022.

RUVIARO, C.F.; GIANEZINI, M.; BRANDAO, F.S. et al. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. *Journal of Cleaner Production*, v. 28, p. 9-24, 2012.

SANTOS, A. A.; MONTOYA, M. A. A soja transgênica versus a soja convencional: percepção dos agentes econômicos envolvidos. *Passo Fundo*, 2004.

SILVA, K. et al. *Abc costing methods applied to transgenic soybean by conventional and precision farming systems*. *Custos e agronegócio online*, v. 16, n. 4, 2020. **Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.**

Silva, J. F., & Pereira, J. E. S. (2014). **Soja transgênica: análise crítica de seus impactos econômicos e sociais no Brasil**. *Interações (Campo Grande)*, 15(4), 595-606.

Souza, R. M. A., Ribeiro, J. K., & Pimentel, L. D. (2019). **Uso de sementes transgênicas na produção de soja: impactos na produtividade e no meio ambiente**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 11(2), 30-41.

TOMADON JUNIOR, J. *Avaliação do impacto ambiental causado pelo sistema produção de soja na região oeste do Paraná*. Tese (Tese (Doutorado)) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015. Citado na página 19.

TUPY, O.; YAMAGUCHI, L.C.T. Identificando benchmarks na produção de leite. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 40, n. 1, p. 81-96, 2002.

UGAYA, C. M. L.; NETO JOSÉ ADOLFO DE, F. M. C. B. d. A. *Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro*. Brasília: Ibict, 2019. **Citado 2 vezes nas páginas 9 e 38.**

ULLAH, A. et al. Eco-efficiency of cotton-cropping systems in pakistan: An integrated approach of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 134, 2016. Citado na página 9.

VAN HUYLENBROEK, G.; MONDELAERS, K.; AERTSENS, J. et al. A meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming. *British Food Journal*, v. 111, n. 10, p. 1098-1119, 2009.

VAZQUEZ-ROWE, I. et al. Joint life cycle assessment and data envelopment analysis of grape production for vinification in the rias baixas appellation (nw Spain). *Journal of Cleaner Production*, v. 27, 2012. Citado na página 9.

VALLE, D. X. P.; PEREIRA, R. E. M.; CIABOTTI, S.; OLIVEIRA, S. C de; CHARLO, H. C. O. Composição Centesimal de Grãos de Duas Cultivares de Soja Hortaliça Submetidos a Diferentes Tempos de Branq

WALLAU, F. D. *Análise da cadeia produtiva da soja no município de Sapezal/MT*. Tese (Dissertação (Especialização)) — Departamento de Economia Rural e Extensão, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Citado na página 14.

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT.

Eco-efficiency: Learning Module. [S.l.]: File Winds International, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 4, 8 e 23.

ZORTEA, Rafael Batista. Avaliação da sustentabilidade do biodiesel da soja no Rio Grande do Sul: Uma abordagem de Ciclo de Vida. 2015. 238 f. Tese (Doutorado) - Curso de Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

APÊNDICE - INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA

Tabela A1: Inventário do estado da Bahia

BAHIA						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
<i>Inputs</i>						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.13E-01	9.13E-01	8.43E-01	Lognormal	1.09E+00
Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	2.78E+00	2.78E+00	2.56E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.78E+00	2.78E+00	2.56E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	2.22E-03	2.22E-03	1.89E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	8.33E-07	8.33E-07	7.69E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	6.18E-04	6.18E-04	5.26E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	1.94E-03	1.94E-03	1.79E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	1.75E-02	1.75E-02	1.62E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	2.03E-04	2.03E-04	2.03E-04		
lime	kg	1.94E-01	1.94E-01	1.79E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	2.22E-03	2.22E-03	1.89E-03	Lognormal	1.05E+00

molybdenum	kg	8.33E-06	8.33E-06	7.69E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	1.43E-03	1.35E-03	1.25E-03	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	3.30E-03	3.20E-03	2.63E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.24E-03	1.24E-03	1.05E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	3.36E-02	3.36E-02	3.10E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.39E-02	1.39E-02	1.28E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.44E-01	4.44E-01	4.10E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.32E-04	1.32E-04	1.21E-04	Lognormal	1.05E+00
Outputs						
<i>To Environment</i>						
Air						
Ammonia	kg	2.20E-04	2.20E-04	2.03E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	1.43E-01	1.43E-01	1.32E-01	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.18E-04	5.18E-04	4.78E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.09E-04	1.09E-04	1.00E-04	Lognormal	1.41E+00
Soil						
Acephate	kg	1.63E-03	1.62E-03	1.17E-03	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-8.61E-09	-8.61E-09	-8.72E-09	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	1.96E-06	1.96E-06	1.81E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.33E-07	8.33E-07	7.69E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-8.71E-06	-8.71E-06	-8.81E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	1.43E-03	1.35E-03	1.25E-03	Lognormal	1.44E+00
Lead	kg	1.33E-07	1.33E-07	1.23E-07	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	8.33E-06	8.33E-06	7.69E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.05E-06	-3.31E-06	-3.46E-05	Lognormal	1.49E+00

Prothioconazol	kg	1.26E-04	1.26E-04	1.17E-04	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	1.08E-04	1.08E-04	1.00E-04	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	1.11E-07	1.11E-07	1.03E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.75E-05	-3.75E-05	-3.77E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-8.61E-13	-8.61E-13	-8.72E-13	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	1.96E-10	1.96E-10	1.81E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-8.71E-10	-8.71E-10	-8.81E-10		
Lead	kg	1.33E-11	1.33E-11	1.23E-11	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.05E-10	-3.31E-10	-3.46E-09	Lognormal	1.82E+00
Nitrate	kg	9.27E-03	9.27E-03	8.56E-03	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.44E-04	4.44E-04	4.10E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.752E-09	-3.75E-09	-3.771E-09		

Tabela A2: Inventário do estado de Goiás

GOIAS						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
Inputs						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.70E-01	9.70E-01	9.06E-01	Lognormal	1.09E+00
Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00

Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	2.09E-03	2.09E-03	1.82E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	8.85E-07	8.85E-07	8.26E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	6.60E-04	6.60E-04	5.76E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	2.95E-03	2.95E-03	2.75E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	2.65E-02	2.65E-02	2.48E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	1.87E-04	1.87E-04	1.87E-04		
lime	kg	2.36E-01	2.36E-01	2.20E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	2.09E-03	2.09E-03	1.82E-03	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	8.85E-06	8.85E-06	8.26E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	1.52E-03	1.43E-03	1.34E-03	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	2.98E-03	2.51E-03	1.59E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.25E-03	1.25E-03	1.09E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	2.65E-02	2.65E-02	2.48E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.47E-02	1.47E-02	1.38E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.72E-01	4.72E-01	4.41E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.40E-04	1.40E-04	1.30E-04	Lognormal	1.05E+00
Outputs						
<i>To Environment</i>						
Air						

Ammonia	kg	3.33E-04	3.33E-04	3.11E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	1.73E-01	1.73E-01	1.62E-01	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.54E-04	5.54E-04	5.18E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.16E-04	1.16E-04	1.09E-04	Lognormal	1.41E+00

Soil

Acephate	kg	1.22E-03	1.22E-03	5.79E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-1.00E-08	-1.00E-08	-1.00E-08	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	2.33E-06	2.33E-06	2.17E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.85E-07	8.85E-07	8.85E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-8.58E-06	-8.58E-06	-8.68E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	1.67E-03	1.20E-03	9.19E-04	Lognormal	1.44E+00
Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	8.85E-06	8.85E-06	8.85E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.10E-06	-3.32E-06	-3.58E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	5.16E-05	5.16E-05	4.82E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	4.42E-05	4.42E-05	4.13E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	1.18E-07	1.18E-07	1.10E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.83E-05	-3.83E-05	-3.85E-05		

Water

Cadmium, ion	kg	-1.00E-12	-1.00E-12	-1.00E-12	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	2.33E-10	2.33E-10	2.17E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-8.58E-10	-8.58E-10	-8.68E-10		
Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.10E-10	-3.32E-10	-3.58E-09	Lognormal	1.82E+00
Nitrate	kg	4.13E-03	4.13E-03	3.86E-03	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.72E-04	4.72E-04	4.41E-04	Lognormal	1.05E+00

Zinc, ion kg -3.835E-09 -3.83E-09 -3.846E-09

Tabela A3: Inventário do estado do Maranhão

MARANHÃO						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
<i>Inputs</i>						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	1.01E+00	1.01E+00	9.45E-01	Lognormal	1.09E+00
Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	3.09E+00	3.09E+00	2.87E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	2.29E-03	2.29E-03	1.98E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	6.17E-07	1.23E-06	1.15E-06	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	7.63E-04	7.63E-04	6.61E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	2.16E-03	2.16E-03	2.01E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	1.94E-02	1.94E-02	1.81E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	2.64E-04	2.64E-04	2.64E-04		
lime	kg	1.08E-01	1.08E-01	1.01E-01	Lognormal	1.05E+00

limestone and gypsum application, by spreader	ha	2.29E-03	2.29E-03	1.98E-03	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	6.17E-06	1.23E-05	1.15E-05	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	1.75E-03	1.25E-03	9.59E-04	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	1.61E-03	1.33E-03	8.08E-04	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.53E-03	1.53E-03	1.32E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	4.09E-02	4.09E-02	3.81E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.54E-02	1.54E-02	1.44E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.94E-01	4.94E-01	4.60E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.46E-04	1.46E-04	1.36E-04	Lognormal	1.05E+00

Outputs

To Environment

Air

Ammonia	kg	2.44E-04	2.44E-04	2.27E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	7.92E-02	7.92E-02	7.38E-02	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.44E-04	5.44E-04	5.07E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.14E-04	1.14E-04	1.06E-04	Lognormal	1.41E+00

Soil

Acephate	kg	1.56E-03	1.28E-03	7.56E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-8.15E-09	-8.15E-09	-8.28E-09	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	1.12E-06	1.12E-06	1.05E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	6.17E-07	6.17E-07	6.17E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-9.19E-06	-9.19E-06	-9.25E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.44E+00
Lead	kg	1.78E-07	1.78E-07	1.66E-07	Lognormal	1.49E+00

Molybdenum	kg	6.17E-06	6.17E-06	6.17E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.03E-06	-3.26E-06	-3.51E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	2.97E-05	2.97E-05	2.77E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	2.55E-05	2.55E-05	2.37E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	3.70E-07	3.70E-07	3.45E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.78E-05	-3.78E-05	-3.79E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-8.15E-13	-8.15E-13	-8.28E-13	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	1.12E-10	1.12E-10	1.05E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-9.19E-10	-9.19E-10	-9.25E-10		
Lead	kg	1.78E-11	1.78E-11	1.66E-11	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.03E-10	-3.26E-10	-3.52E-09	Lognormal	1.82E+00
Nitrate	kg	-8.10E-03	-8.10E-03	-7.54E-03	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.94E-04	4.94E-04	4.60E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.776E-09	-3.78E-09	-3.791E-09		

Tabela A4: Inventário do estado do Minas Gerais

MINAS GERAIS						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
Inputs						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.13E-01	9.13E-01	8.70E-01	Lognormal	1.09E+00

Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	2.78E+00	2.78E+00	2.65E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	1.85E-03	1.85E-03	1.68E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	8.33E-07	8.33E-07	7.94E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	4.45E-03	4.45E-03	4.03E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	2.22E-03	2.22E-03	2.12E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	2.00E-02	2.00E-02	1.90E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	2.02E-04	2.02E-04	2.02E-04		
lime	kg	1.11E-01	1.11E-01	1.06E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	1.85E-03	1.85E-03	1.68E-03	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	8.33E-06	8.33E-06	7.94E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	2.25E-03	1.60E-03	1.39E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.11E-03	1.11E-03	1.01E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	2.00E-02	2.00E-02	1.90E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.39E-02	1.39E-02	1.32E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.44E-01	4.44E-01	4.23E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.32E-04	1.32E-04	1.25E-04	Lognormal	1.05E+00
Outputs						

<i>To Environment</i>						
Air						
Ammonia	kg	2.51E-04	2.51E-04	2.39E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	8.15E-02	8.15E-02	7.76E-02	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.31E-04	5.31E-04	5.06E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.11E-04	1.11E-04	1.06E-04	Lognormal	1.41E+00
Soil						
Acephate	kg	7.65E-04	5.35E-04	3.77E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-1.00E-08	-1.00E-08	-1.00E-08	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	1.09E-06	1.09E-06	1.04E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.33E-07	8.33E-07	8.33E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-9.33E-06	-9.33E-06	-9.36E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	1.39E-03	9.63E-04	9.17E-04	Lognormal	1.44E+00
Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	8.33E-06	8.33E-06	8.33E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.10E-06	-3.25E-06	-3.74E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	5.35E-05	5.35E-05	5.09E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	4.58E-05	4.58E-05	4.37E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	3.33E-07	3.33E-07	3.17E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.92E-05	-3.92E-05	-3.93E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-1.00E-12	-1.00E-12	-1.00E-12	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	1.09E-10	1.09E-10	1.04E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-9.33E-10	-9.33E-10	-9.37E-10		
Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.10E-10	-3.26E-10	-3.74E-09	Lognormal	1.82E+00

Nitrate	kg	1.43E-02	1.43E-02	1.37E-02	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.44E-04	4.44E-04	4.23E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.922E-09	-3.92E-09	-3.926E-09		

Tabela A5: Inventário do estado de Mato Grosso do Sul

MATO GROSSO DO SUL						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
<i>Inputs</i>						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.96E-01	9.96E-01	9.45E-01	Lognormal	1.09E+00
Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	3.03E+00	3.03E+00	2.87E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	2.21E-03	2.21E-03	1.98E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	9.09E-07	9.09E-07	8.62E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	7.35E-04	7.35E-04	6.61E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	2.73E-03	2.73E-03	2.59E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	2.45E-02	2.45E-02	2.33E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	1.94E-04	1.94E-04	1.94E-04		

lime	kg	1.52E-01	1.52E-01	1.44E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	2.21E-03	2.21E-03	1.98E-03	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	9.09E-06	9.09E-06	8.62E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	1.51E-03	1.05E-03	9.97E-04	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	3.28E-03	2.33E-03	2.19E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.32E-03	1.32E-03	1.19E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	2.45E-02	2.45E-02	2.33E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.52E-02	1.52E-02	1.44E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.85E-01	4.85E-01	4.60E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.44E-04	1.44E-04	1.36E-04	Lognormal	1.05E+00

Outputs

To Environment

Air

Ammonia	kg	3.08E-04	3.08E-04	2.92E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	1.11E-01	1.11E-01	1.05E-01	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.77E-04	5.77E-04	5.47E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.21E-04	1.21E-04	1.15E-04	Lognormal	1.41E+00

Soil

Acephate	kg	1.25E-03	7.05E-04	6.47E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-1.00E-08	-1.00E-08	-1.00E-08	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	1.49E-06	1.49E-06	1.41E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-9.09E-06	-9.09E-06	-9.14E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	1.93E-03	1.53E-03	1.45E-03	Lognormal	1.44E+00

Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	1.32E-03	1.32E-03	1.32E-03	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	9.09E-06	-3.27E-06	-3.69E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	5.30E-05	5.30E-05	5.03E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	4.55E-05	4.55E-05	4.31E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	3.03E-07	3.03E-07	2.87E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.89E-05	-3.89E-05	-3.90E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-1.00E-12	-1.00E-12	-1.00E-12	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	1.49E-10	1.49E-10	1.41E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-9.09E-10	-9.09E-10	-9.14E-10		
Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.10E-10	-3.27E-10	-3.69E-09	Lognormal	1.82E+00
Nitrate	kg	1.17E-02	1.17E-02	1.11E-02	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.85E-04	4.85E-04	4.60E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.894E-09	-3.89E-09	-3.899E-09		

Tabela A6: Inventário do estado de Mato Grosso

MATO GROSSO						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
Inputs						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.45E-01	9.45E-01	8.84E-01	Lognormal	1.09E+00

Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	2.87E+00	2.87E+00	2.69E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	1.98E-03	1.98E-03	1.74E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	8.62E-07	8.62E-07	8.06E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	4.76E-04	4.76E-04	4.17E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	2.59E-03	2.59E-03	2.42E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	2.33E-02	2.33E-02	2.18E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	2.30E-04	2.30E-04	2.30E-04		
lime	kg	1.44E-01	1.44E-01	1.34E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	1.98E-03	1.98E-03	1.74E-03	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	8.62E-06	8.62E-06	8.06E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	1.83E-03	1.45E-03	1.35E-03	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	2.54E-03	2.15E-03	1.26E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.32E-03	1.32E-03	1.16E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	2.33E-02	2.33E-02	2.18E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.44E-02	1.44E-02	1.34E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.60E-01	4.60E-01	4.30E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.36E-04	1.36E-04	1.27E-04	Lognormal	1.05E+00
Outputs						

<i>To Environment</i>						
Air						
Ammonia	kg	2.92E-04	2.92E-04	2.73E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	1.05E-01	1.05E-01	9.86E-02	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.19E-04	5.19E-04	4.85E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.09E-04	1.09E-04	1.02E-04	Lognormal	1.41E+00
Soil						
Acephate	kg	1.08E-03	1.04E-03	5.58E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-1.00E-08	-1.00E-08	-1.00E-08	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	1.41E-06	1.41E-06	1.32E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.62E-07	8.62E-07	8.62E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-9.14E-06	-9.14E-06	-9.19E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	1.37E-03	1.01E-03	6.13E-04	Lognormal	1.44E+00
Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	8.62E-06	8.62E-06	8.62E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.10E-06	-3.31E-06	-3.65E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	5.03E-05	5.03E-05	4.70E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	4.31E-05	4.31E-05	4.03E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	1.15E-07	1.15E-07	1.08E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.90E-05	-3.90E-05	-3.91E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-1.00E-12	-1.00E-12	-1.00E-12	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	1.41E-10	1.41E-10	1.32E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-9.14E-10	-9.14E-10	-9.19E-10		
Lead	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.10E-10	-3.31E-10	-3.65E-09	Lognormal	1.82E+00

Nitrate	kg	-5.93E-03	-5.93E-03	-5.54E-03	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.60E-04	4.60E-04	4.30E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.899E-09	-3.9E-09	-3.906E-09		

Tabela A7: Inventário do estado do Paraná

PARANÁ						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
<i>Inputs</i>						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.13E-01	9.13E-01	8.43E-01	Lognormal	1.09E+00
Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	2.78E+00	2.78E+00	2.56E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	4.94E-04	4.94E-04	4.21E-04	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	8.33E-07	8.33E-07	7.69E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	4.04E-04	4.04E-04	3.45E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	1.67E-03	1.67E-03	1.54E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	1.50E-02	1.50E-02	1.38E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	1.51E-04	1.51E-04	1.51E-04		

lime	kg	1.39E-01	1.39E-01	1.28E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	4.94E-04	4.94E-04	4.21E-04	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	8.33E-06	8.33E-06	7.69E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	1.32E-03	9.80E-04	5.85E-04	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	2.09E-03	1.62E-03	1.01E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	5.56E-04	5.56E-04	4.74E-04	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	3.43E-02	3.43E-02	3.17E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.39E-02	1.39E-02	1.28E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.44E-01	4.44E-01	4.10E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.32E-04	1.32E-04	1.21E-04	Lognormal	1.05E+00

Outputs

To Environment

Air

Ammonia	kg	1.88E-04	1.88E-04	1.74E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	1.02E-01	1.02E-01	9.40E-02	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.23E-04	5.23E-04	4.83E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.10E-04	1.10E-04	1.01E-04	Lognormal	1.41E+00

Soil

Acephate	kg	1.10E-04	1.10E-04	7.31E-05	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-8.33E-09	-8.33E-09	-8.46E-09	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	1.42E-06	1.42E-06	1.31E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.33E-07	8.33E-07	8.33E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-9.02E-06	-9.02E-06	-9.10E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	1.91E-03	1.44E-03	8.74E-04	Lognormal	1.44E+00

Lead	kg	1.60E-07	1.60E-07	1.48E-07	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	8.33E-06	8.33E-06	8.33E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.04E-06	-3.30E-06	-3.48E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	3.89E-05	3.89E-05	3.59E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	3.33E-05	3.33E-05	3.08E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	2.78E-07	2.78E-07	2.56E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.77E-05	-3.77E-05	-3.79E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-8.33E-13	-8.33E-13	-8.46E-13	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	1.42E-10	1.42E-10	1.31E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-9.02E-10	-9.02E-10	-9.10E-10		
Lead	kg	1.60E-11	1.60E-11	1.48E-11	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.04E-10	-3.30E-10	-3.48E-09	Lognormal	1.82E+00
Nitrate	kg	1.48E-02	1.48E-02	1.37E-02	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.44E-04	4.44E-04	4.10E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.769E-09	-3.77E-09	-3.787E-09		

Tabela A8: Inventário do estado do Rio Grande do Sul

RIO GRANDE DO SUL						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
Inputs						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.29E-01	9.29E-01	8.70E-01	Lognormal	1.09E+00

Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	2.82E+00	2.82E+00	2.65E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	6.05E-04	6.05E-04	5.31E-04	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	8.47E-07	8.47E-07	7.94E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	4.18E-04	4.18E-04	3.67E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	1.86E-03	1.86E-03	1.75E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	1.68E-02	1.68E-02	1.57E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	1.48E-04	1.48E-04	1.48E-04		
lime	kg	2.12E-01	2.12E-01	1.98E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	6.05E-04	6.05E-04	5.31E-04	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	8.47E-06	8.47E-06	7.94E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	1.94E-03	1.46E-03	9.02E-04	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	1.22E-03	8.98E-04	8.15E-04	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	5.75E-04	5.75E-04	5.04E-04	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	3.32E-02	3.32E-02	3.11E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.41E-02	1.41E-02	1.32E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.52E-01	4.52E-01	4.23E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.34E-04	1.34E-04	1.25E-04	Lognormal	1.05E+00

Outputs

<i>To Environment</i>						
Air						
Ammonia	kg	2.11E-04	2.11E-04	1.97E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	1.55E-01	1.55E-01	1.46E-01	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.28E-04	5.28E-04	4.95E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.11E-04	1.11E-04	1.04E-04	Lognormal	1.41E+00
Soil						
Acephate	kg	4.18E-04	2.99E-04	2.54E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-8.59E-09	-8.59E-09	-8.68E-09	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	2.14E-06	2.14E-06	2.00E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.47E-07	8.47E-07	8.47E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-8.60E-06	-8.60E-06	-8.69E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	6.62E-04	4.61E-04	4.32E-04	Lognormal	1.44E+00
Lead	kg	1.36E-07	1.36E-07	1.27E-07	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	8.47E-06	8.47E-06	8.47E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.05E-06	-3.26E-06	-3.50E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	7.42E-05	7.42E-05	6.94E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	6.36E-05	6.36E-05	5.95E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	2.82E-07	2.82E-07	2.65E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.74E-05	-3.74E-05	-3.75E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-8.59E-13	-8.59E-13	-8.68E-13	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	2.14E-10	2.14E-10	2.00E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-8.61E-10	-8.61E-10	-8.69E-10		
Lead	kg	1.36E-11	1.36E-11	1.27E-11	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.05E-10	-3.26E-10	-3.50E-09	Lognormal	1.82E+00

Nitrate	kg	1.15E-02	1.15E-02	1.08E-02	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.52E-04	4.52E-04	4.23E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.738E-09	-3.74E-09	-3.755E-09		

Tabela A9: Inventário do estado de São Paulo

SÃO PAULO						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
<i>Inputs</i>						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	9.21E-01	9.21E-01	9.21E-01	Lognormal	1.09E+00
Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	2.80E+00	2.80E+00	2.80E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	2.26E-03	2.26E-03	2.26E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	8.40E-07	8.40E-07	8.40E-07	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	4.52E-04	4.52E-04	4.52E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	2.24E-03	2.24E-03	2.24E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	2.02E-02	2.02E-02	2.02E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	1.52E-04	1.52E-04	1.52E-04		

lime	kg	1.12E-01	1.12E-01	1.12E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	2.26E-03	2.26E-03	2.26E-03	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	8.40E-06	8.40E-06	8.40E-06	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	6.57E-04	4.57E-04	4.57E-04	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	3.36E-03	2.16E-03	1.87E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.13E-03	1.13E-03	1.13E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	2.83E-02	2.83E-02	2.83E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	4.48E-01	4.48E-01	4.48E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	Lognormal	1.05E+00

Outputs

To Environment

Air

Ammonia	kg	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	8.22E-02	8.22E-02	8.22E-02	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.10E-04	5.10E-04	5.10E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.07E-04	1.07E-04	1.07E-04	Lognormal	1.41E+00

Soil

Acephate	kg	1.14E-03	9.94E-04	7.04E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	-9.30E-09	-9.30E-09	-9.30E-09	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.40E-07	8.40E-07	8.40E-07	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-9.27E-06	-9.27E-06	-9.27E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	2.09E-03	1.03E-03	1.03E-03	Lognormal	1.44E+00

Lead	kg	6.72E-08	6.72E-08	6.72E-08	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	8.40E-06	8.40E-06	8.40E-06	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-3.07E-06	-3.07E-06	-3.86E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	7.11E-05	7.11E-05	7.11E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	6.09E-05	6.09E-05	6.09E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	3.36E-07	3.36E-07	3.36E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.86E-05	-3.86E-05	-3.86E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	-9.30E-13	-9.30E-13	-9.30E-13	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	1.12E-10	1.12E-10	1.12E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-9.27E-10	-9.27E-10	-9.27E-10		
Lead	kg	6.72E-12	6.72E-12	6.72E-12	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-3.07E-10	-3.07E-10	-3.87E-09	Lognormal	1.82E+00
Nitrate	kg	-5.86E-04	-5.86E-04	-5.86E-04	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	4.48E-04	4.48E-04	4.48E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.865E-09	-3.87E-09	-3.865E-09		

Tabela A10: Inventário do estado de Tocantins

TOCANTINS						
	Unidade	Convencional	Transgênico 1 geração	Transgênico 2 geração	Uncertainty	SD
Inputs						
<i>From Environment</i>						
Carbon dioxide, in air	kg	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	Lognormal	1.05E+00
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	2.05E+01	2.05E+01	2.05E+01	Lognormal	1.05E+00
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*year	1.05E+00	1.05E+00	9.78E-01	Lognormal	1.09E+00

Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	3.21E+00	3.21E+00	2.98E+00	Lognormal	1.20E+00
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	2.95E+00	2.95E+00	2.75E+00	Lognormal	1.20E+00
<i>From Technosphere</i>						
application of plant protection product, by field sprayer	ha	2.47E-03	2.47E-03	2.13E-03	Lognormal	1.05E+00
cobalt	kg	1.28E-06	1.28E-06	1.19E-06	Lognormal	1.05E+00
combine harvesting	ha	8.22E-04	8.22E-04	7.09E-04	Lognormal	1.05E+00
inorganic nitrogen fertiliser, as N	kg	4.49E-03	4.49E-03	4.17E-03	Lognormal	1.05E+00
inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	2.98E-02	2.98E-02	2.77E-02	Lognormal	1.05E+00
land use change, annual crop	ha	3.03E-04	3.03E-04	3.03E-04		
lime	kg	1.12E-01	1.12E-01	1.04E-01	Lognormal	1.05E+00
limestone and gypsum application, by spreader	ha	2.47E-03	2.47E-03	2.13E-03	Lognormal	1.05E+00
molybdenum	kg	1.28E-05	1.28E-05	1.19E-05	Lognormal	1.05E+00
Glyphosate	kg	2.39E-03	1.18E-03	1.10E-03	Lognormal	1.44E+00
pesticide, unspecified	kg	3.28E-03	1.70E-03	1.53E-03	Lognormal	1.05E+00
planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	1.64E-03	1.64E-03	1.42E-03	Lognormal	1.05E+00
potassium chloride	kg	3.67E-02	3.67E-02	3.41E-02	Lognormal	1.05E+00
soybean seed, for sowing	kg	1.60E-02	1.60E-02	1.49E-02	Lognormal	1.05E+00
tap water	kg	5.13E-01	5.13E-01	4.76E-01	Lognormal	1.05E+00
transport, tractor and trailer, agricultural	metric ton*km	1.52E-04	1.52E-04	1.41E-04	Lognormal	1.05E+00

Outputs

<i>To Environment</i>						
Air						
Ammonia	kg	5.07E-04	5.07E-04	4.71E-04	Lognormal	1.20E+00
Carbon dioxide, fossil	kg	8.23E-02	8.23E-02	7.64E-02	Lognormal	1.05E+00
Dinitrogen monoxide	kg	5.33E-04	5.33E-04	4.94E-04	Lognormal	1.41E+00
Nitrogen oxides	kg	1.12E-04	1.12E-04	1.04E-04	Lognormal	1.41E+00
Soil						
Acephate	kg	9.18E-04	4.28E-04	3.48E-04	Lognormal	1.44E+00
Cadmium	kg	4.15E-07	4.15E-07	3.84E-07	Lognormal	1.49E+00
Chromium	kg	5.75E-06	5.75E-06	5.33E-06	Lognormal	1.49E+00
Cobalt	kg	8.22E-04	8.22E-04	8.22E-04	Lognormal	1.49E+00
Copper	kg	-8.08E-06	-8.08E-06	-8.22E-06	Lognormal	1.49E+00
Glyphosate	kg	2.30E-03	1.20E-03	1.12E-03	Lognormal	1.44E+00
Lead	kg	7.01E-07	7.01E-07	6.51E-07	Lognormal	1.49E+00
Molybdenum	kg	2.39E-03	2.39E-03	2.39E-03	Lognormal	1.49E+00
Nickel	kg	-2.22E-06	-2.46E-06	-2.95E-05	Lognormal	1.49E+00
Prothioconazol	kg	3.65E-05	3.65E-05	3.39E-05	Lognormal	1.44E+00
Trifloxystrobin	kg	3.13E-05	3.13E-05	2.90E-05	Lognormal	1.44E+00
Sulfluramid	kg	3.85E-07	3.85E-07	3.57E-07	Lognormal	1.44E+00
Zinc	kg	-3.18E-05	-3.18E-05	-3.24E-05		
Water						
Cadmium, ion	kg	4.15E-11	4.15E-11	3.84E-11	Lognormal	1.82E+00
Chromium, ion	kg	5.75E-10	5.75E-10	5.34E-10	Lognormal	1.82E+00
Copper, ion	kg	-8.08E-10	-8.08E-10	-8.22E-10		
Lead	kg	7.01E-11	7.01E-11	6.51E-11	Lognormal	1.82E+00
Nickel, ion	kg	-2.22E-10	-2.46E-10	-2.95E-09	Lognormal	1.82E+00

Nitrate	kg	-4.86E-02	-4.86E-02	-4.52E-02	Lognormal	1.49E+00
Water	m3	5.13E-04	5.13E-04	4.76E-04	Lognormal	1.05E+00
Zinc, ion	kg	-3.182E-09	-3.18E-09	-3.241E-09		