



Relatório Final de Iniciação Científica
Bolsa PIBIC/CNPq – cota 2024/2025

**Otimização multiobjetivo aplicado ao problema da cadeia
logística de produção de milho no Brasil**

Orientando: Matheus Queiroz Mota

Orientadora: Profa. Kelly Cristina Poldi

Resumo

Este trabalho visa estudar os fundamentos da Otimização Multiobjetivo Inteira Mista e sua aplicação na cadeia logística de produção de milho no Brasil. Para isso, foi realizada uma análise do modelo de produção, com base em artigos da literatura, e propostas novas restrições. Em seguida, utilizando dados extraídos dessas publicações e de fontes governamentais, desenvolveu-se um modelo de programação linear inteira multiobjetivo, posteriormente solucionado por meio da abordagem AUGMECON2. Ao final, é apresentada uma análise detalhada das soluções obtidas pelo modelo multiobjetivo aplicado, visando mostrar a importância desta ferramenta para a tomada de decisão.

Palavras-chave: programação linear inteira, modelagem matemática, multiobjetivo, análise de dados.

1 Introdução

O Brasil é um dos principais produtores e exportadores de milho do mundo, atuando com destaque nos mercados nacional e internacional. Sua cadeia logística é composta por diversas etapas estratégicas, iniciando pela escolha de áreas de cultivo — que leva em conta fatores como localização, solo e viabilidade econômica — seguida pelo transporte dos grãos para silos, onde ocorre secagem e armazenamento, e, posteriormente, pelo envio do milho aos mercados internos ou portos para exportação.

A eficiência dessa cadeia depende de múltiplos fatores, incluindo custos de transporte (que variam conforme o modal), taxas de impostos interestaduais e custos de exportação. Além do aspecto econômico, há também a crescente necessidade de

reduzir o impacto ambiental, especialmente as emissões de carbono, em um país de grandes dimensões como o Brasil.

Este trabalho apresenta um modelo matemático multiobjetivo misto, considerando tanto o transporte rodoviário para o mercado interno quanto o uso do modal hidroviário para exportação, com ênfase no fluxo para a China, maior importadora do milho brasileiro em 2023 [5]. O modelo propõe duas funções objetivo: a minimização dos custos totais da cadeia logística e do balanço de CO₂ (emissões menos sequestro pelo plantio).

A base teórica utiliza o modelo de [6], aprimorando-o com a inclusão do balanço de CO₂ na função objetivo, restrições de estoque, conservação de fluxo, ativação de silos e nova dinâmica de escoamento entre produtores e silos, conforme detalhado na sequência deste relatório.

2 Descrição do Problema

O problema da cadeia logística de produção de milho no Brasil deste trabalho envolve as seguintes etapas:

1. **Seleção de áreas produtoras:** definição das regiões produtoras e estimativa da produtividade (ton/ha), com base em dados históricos de cada localidade;
2. **Transporte para silos:** envio dos grãos dos centros produtores aos silos para secagem e armazenamento, respeitando a restrição de que cada produtor só pode encaminhar sua produção para silos situados no mesmo estado;
3. **Distribuição final:** atendimento da demanda interna e da demanda externa (via portos). Todos os silos têm permissão para enviar mercadoria tanto aos mercados internos quanto aos portos, para exportação;
4. **Parâmetros logísticos:** incorporação de distâncias por modal (rodoviário e hidroviário), custos de frete, tarifas de exportação e ICMS, além das capacidades de silos e portos;
5. **Formulação das restrições:** modelagem de fluxos de entrada e saída em cada nó da rede, limites de capacidade, balanço de estoque, atendimento da demanda e viabilidade de produção;
6. **Objetivos conflitantes:** desenvolvimento de um modelo de Programação Linear Inteira Misto multiobjetivo para minimizar o custo total que envolve todas as partes da rede, e o balanço de CO₂ (emissões de transporte menos sequestro por área cultivada).

A seguir, apresentamos uma formulação matemática de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o problema, baseada em [6].

2.1 Formulação matemática

Deste modo, a partir da descrição apresentada na Seção 2, foi estabelecido que o modelo matemático segue algumas hipóteses:

- O transporte do milho das localidades produtoras para os silos e dos silos para os mercados internos ou portos, ocorrem exclusivamente por rodovias. Foi considerado uma frota de caminhões disponível suficiente para atender à demanda de transporte ao longo das rotas logísticas (isto é, não há limite de carga em cada conexão de transporte);
- O transporte do milho para os mercados externos ocorrem somente pelo meio marítimo;
- O estoque ao final do último período deve ser zero. No primeiro período, considera-se que não há estoque inicial remanescente;
- Há apenas dois períodos, de modo que no segundo período o estoque é nulo.

A seguir, são apresentados os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão que são utilizados na formulação do Problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) multiobjetivo:

Conjuntos:

- D : conjunto dos estados;
- E : conjunto dos produtores;
- J : conjunto dos silos;
- M : conjunto dos mercados consumidores;
- T : conjunto dos períodos;
- S : conjunto das safras;
- \mathcal{A}_c^d : conjunto de silos presentes em uma mesma cidade c , no estado d ;
- \mathcal{E}_p^d : conjunto de produtores pertencentes a um mesmo estado d ;
- P : conjunto de portos;
- Υ : conjunto de mercados externos;
- C_d : conjunto de cidades no estado d .

Parâmetros:

- α_{ets} : produtividade agrícola na localidade e , período t , safra s (ton/ha);
- β_{ets} : área máxima disponível para cultivo na localidade e , período t , safra s (ha);

- δ_j : capacidade fixa do silo j (ton);
- γ_1 : custo de produção do milho (R\$/ha);
- γ_2 : custo de transporte do produtor e até o silo j (R\$/ton), calculado como:

$$\gamma_2 = c_r \cdot d_{ej} + \pi_{ej}(1 + \theta_{ej}),$$

onde $c_r = 0,3194$ R\$/ton.km é o custo unitário do transporte rodoviário, d_{ej} representa a distância entre o produtor e e o silo j (em km), e θ_{ej} é a alíquota do ICMS incidente sobre o transporte entre essas localidades, e π_{ej} é o valor da carga (R\$ / ton).

- γ_3 : custo de transporte do silo j ao mercado interno m (R\$/ton), cujo calculo é o mesmo de γ_2 ;
- γ_4 : custo de transporte do silo j ao porto p (R\$/ton), cujo calculo é o mesmo de γ_2 ;
- γ_5 : custo de transporte do porto p ao mercado externo l (R\$/ton), calculado como:

$$\gamma_5 = c_{plt} \cdot d_{pl} + v_{plt},$$

onde c_{plt} é o custo unitário do transporte marítimo (R\$/ton.km), d_{pl} representa a distância entre o porto p e o mercado externo l (em km), e v_{plt} é a taxa de exportação aplicável (R\$/ton).

- γ_6 : custos unitários de armazenagem (silos e portos, cujo custo é variável) (R\$/ton);
- γ_7 : custo de ativação de silo (R\$);
- λ : sequestro de CO₂ (ton CO₂/ha);
- τ : emissão de CO₂ no transporte (ton CO₂/ton.km);
- d_{ij} : distância entre a localidade i e j (km);
- σ_{it} : demanda do mercado i no período t (ton).

Variáveis de decisão:

- P_{ets} : área cultivada do produtor e , período t , safra s (ha);
- X_{ejts} : quantidade de milho transportada do produtor e para o silo j , no período t e safra s (ton);
- W_{ejt} : quantidade total transportada do produtor e para o silo j no período t , definida como:

$$W_{ejt} = \sum_{s \in S} X_{ejts}, \quad \forall e \in E, j \in J, t \in T; \tag{1}$$

- Y_{jmt} : quantidade de milho transportada do silo j para o mercado m , no período t (ton);
- I_{jt} : estoque de milho armazenado no silo j , ao final do período t (ton);
- B_{jt} : variável binária indicando ativação do silo j no período t ($B_{jt} \in \{0, 1\}$);
- Z_{jpt} : quantidade de milho transportada do silo j para o porto p , no período t (ton);
- R_{plt} : quantidade de milho transportada do porto p para o mercado externo l , no período t (ton);

Funções-objetivos:

- f_1 : função de custo, que considera os custos associados ao plantio e produção de milho, transporte da mercadoria entre produtores, silos e mercados, armazenagem dos grãos e ativação de áreas produtoras e silos;
- f_2 : função de balanço de CO₂, representando a diferença entre a emissão de CO₂ proveniente do transporte das cargas e o sequestro de CO₂ realizado pelas áreas cultivadas ao longo do período de plantio.

$$\begin{aligned} \min f_1 = & \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \gamma_1 P_{ets} + \sum_{e \in E} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \gamma_2 W_{ejt} d_{ej} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \gamma_3 Y_{jmt} d_{jm} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma_4 Z_{jpt} d_{jp} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \gamma_5 R_{plt} d_{pl} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \gamma_6 I_{jt} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \gamma_7 B_{jt}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \min f_2 = & \sum_{e \in E} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \tau W_{ejt} d_{ej} + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \tau Y_{jmt} d_{jm} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \tau Z_{jpt} d_{jp} + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \tau R_{plt} d_{pl} \\ & - \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \lambda P_{ets}. \end{aligned} \quad (3)$$

Restrições:

- Conservação do fluxo produtor-silo: Toda a produção deve ser transportada para os silos:

$$\alpha_{ets} P_{ets} = \sum_{j \in J} X_{ejts}, \quad \forall e \in E, t \in T, s \in S.$$

- Atendimento da demanda: O transporte dos silos para os mercados deve atender à demanda:

$$\sum_{j \in J} Y_{jmt} = \sigma_{mt}, \quad \forall m \in M, t \in T.$$

- Balanço de estoque: O estoque em um silo depende do período anterior, entrada e saída, e o estoque final (período (T) deve ser nulo):

$$I_{jt} = I_{j,t-1} + \sum_{e \in E} W_{ejt} - \sum_{m \in M} Y_{jmt} - \sum_{p \in P} Z_{jpt}, \quad \forall j \in J, \forall p \in P, t \geq 1.$$

$$I_{jT} = 0, \quad \forall j \in J.$$

- Ativação de silos: Apenas silos ativados podem armazenar milho, e, caso ativados, devem ter de armazenar no mínimo 150.000ton.:

$$150.000B_{jt} \leq \sum_{e \in E} W_{ejt} \leq \delta_j B_{jt}, \quad \forall j \in J, t \in T.$$

$$\sum_{j \in \mathcal{A}_{s,c}^d} B_{jt} \leq 2, \quad \forall j \in J, d \in D, t \in T.$$

- Limite de área disponível: a área total utilizada na produção não deve exceder o limite de área disponível:

$$P_{ets} \leq \beta_{ets}, \quad \forall e \in E, t \in T.$$

- Conservação de fluxo nos portos: toda mercadoria que chega aos portos deve ir ao mercado externo diretamente, ou seja, não há estoque:

$$\sum_{j \in J} Z_{jpt} = \sum_{l \in \Upsilon} R_{plt}, \quad \forall p \in P, t \in T.$$

- Demanda Externa: toda demanda dos mercados externos devem ser atendidas:

$$\sum_{p \in P} R_{plt} = \sigma_{lt}, \quad \forall l \in \Upsilon, t \in T.$$

3 Extração de Dados e Elaboração do Modelo Matemático

Deste modo, para implementar o modelo de PLIM descrito na Seção 2.1, foi necessário realizar a extração das informações para a formulação do modelo da

cadeia logística. Inicialmente, foram selecionadas as localidades produtoras com base nos dados do site [1], considerando os estados de Mato Grosso-MT, Mato Grosso do Sul-MS, Paraná-PR, Minas Gerais-MG e Goiás-GO, que apresentam maior relevância na produção de milho.

Na sequência, foram determinadas as localidades dos silos, supondo que, para cada localidade produtora dentro de um estado, existem três silos situados na mesma cidade. Além disso, para simplificação do modelo, consideramos que os produtores podem enviar milho apenas para localidades dentro do mesmo estado, independentemente de estarem na mesma cidade. Também foram definidos os mercados consumidores internos, contemplando um mercado por estado nos seguintes locais: São Paulo-SP, Ceará-CE, Pará-PA, Acre-AC, Santa Catarina-SC, Amazonas-AM, Rondônia-RO, Mato Grosso do Sul-MS e Tocantins-TO.

Os estados consumidores apresentam demandas distintas pelo milho, refletindo suas características de demanda. Por exemplo, em Santa Catarina, o milho é essencial para a produção de ração animal, especialmente na suinocultura e avicultura [10]. Já em São Paulo, o milho é amplamente utilizado na indústria alimentícia e na produção de etanol. No Ceará e no Pará, o milho é importante tanto para a alimentação humana quanto animal. Além disso, apesar de possuírem demanda menor, o Acre e o Amazonas utilizam o milho na alimentação animal e em pequenas agroindústrias.

Para representar o escoamento da produção destinada à exportação, foram considerados os seguintes portos: Santos-SP, São Francisco do Sul-SC, Vitória-ES e Paranaguá-PR. Esses portos são responsáveis por uma parcela significativa das exportações de milho do Brasil, sendo o Porto de Santos o principal entre eles [4].

Com as localidades definidas, procedeu-se à extração de dados sobre a cadeia logística a partir das referências [6], [2], [9], [3]. Algumas informações são específicas ao período de análise, como os estoques nos silos e a demanda dos mercados internos e externos, enquanto outras variam conforme a safra, incluindo a produtividade agrícola por localidade, a área disponível para plantio [2] e o volume de milho enviado pelos produtores aos silos. Além disso, há parâmetros que não variam com o tempo, como a taxa de emissão e sequestro de CO₂, as distâncias entre localidades e a capacidade dos silos e portos.

Outro aspecto fundamental do modelo foi a definição das rotas rodoviárias e hidroviárias. Para as distâncias rodoviárias, foram calculadas as distâncias entre produtores e silos, assim como entre silos e mercados internos e portos, utilizando uma API do *Google Maps*. A partir das coordenadas geográficas (latitude e longitude) de cada localidade, a API retorna a distância rodoviária real entre os pontos. Além disso, foram adicionadas ao modelo as alíquotas de ICMS aplicáveis tanto ao transporte interestadual quanto ao intraestadual, conforme os valores disponíveis em [8]. Por outro lado, não foi encontrada, pelo menos de forma gratuita, uma API que pudesse realizar o cálculo das distâncias marítimas; sendo assim, foi utilizada uma aproximação por meio da fórmula da *Haversine*.

4 Abordagem de resolução

Para resolver o problema descrito na Seção 2, foi utilizada a biblioteca **PuLP** do *Python* para a modelagem e otimização do problema, em conjunto com **Pandas** e **NumPy** para análise e tratamento dos dados. Por meio destas ferramentas, o modelo computacional AUGMECON2, proposto em [7], foi implementado. Para a resolução dos subproblemas de programação linear e inteira mista dentro do método, foi necessário utilizar o *solver* **CBC** (*Coin-OR Branch and Cut*), que é o *solver* padrão da biblioteca **PuLP**.

4.1 AUGMECON2

O método AUGMECON2 (*Augmented ε -Constraint 2*), introduzido por [7], é uma versão aprimorada do método ε -*constraint* (ε -restrito), utilizado para a resolução de problemas de otimização multiobjetivo, em específico, problemas de programação inteira multiobjetivo. Diferente do método clássico, o AUGMECON2 introduz uma variável de penalização na função objetivo, garantindo assim uma exploração mais eficiente do espaço de soluções de Pareto, além de introduzir um coeficiente de *bypass*, para evitar iterações redundantes.

A formulação geral do AUGMECON2 para um problema com múltiplos objetivos é dada por:

$$\begin{aligned} \max \quad & f_1(x) + \epsilon \left(\frac{S_2}{r_2} + 10^{-1} \frac{S_3}{r_3} + \dots + 10^{-(p-2)} \frac{S_p}{r_p} \right) \\ \text{sujeito a} \quad & \begin{cases} f_k(x) - S_k = e_k, & k = 2, \dots, p \\ x \in S, \quad S_k \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{4}$$

em que ϵ é um número pequeno (entre 10^{-6} e 10^{-3}), r_k é o intervalo da função objetivo f_k , e S_k são variáveis de folga introduzidas.

4.1.1 Pseudocódigo do AUGMECON2

Algorithm 1: Método AUGMECON2

Input: Tabela *Payoff* contendo os *ranges* das funções-objetivo

Output: Conjunto de soluções não dominadas

- (1) Definir o número de intervalos e calcular o passo para cada objetivo:

$$step_k = r_k/q_k;$$

```

(2) for  $i_p = 0$  to  $q_p$  do
(3)   Atualizar:  $e_p \leftarrow f_p^{\min} + i_p \cdot step_p$ ;
(4)   for  $i_{p-1} = 0$  to  $q_{p-1}$  do
(5)     Atualizar:  $e_{p-1} \leftarrow f_{p-1}^{\min} + i_{p-1} \cdot step_{p-1}$ ;
        ; // ... Aninhamento de objetivos menores
(6)     for  $i_2 = 0$  to  $q_2$  do
(7)       Atualizar:  $e_2 \leftarrow f_2^{\min} + i_2 \cdot step_2$ ;
(8)       Resolver o problema de otimização definido pela Equação (4);
(9)       Obter valores de  $S_k$ ;
(10)      Calcular:  $b \leftarrow \left\lfloor \frac{S_2}{step_2} \right\rfloor$ ;           // coeficiente de bypass
(11)      if  $b < 1$  then
(12)        | Atualizar:  $i_2 \leftarrow i_2 + 1$ ;
(13)      end
(14)      else
(15)        | Atualizar:  $i_2 \leftarrow i_2 + b$ ;
(16)      end
(17)    end
(18)  end
(19) end

```

4.1.2 Definição das Variáveis

Nesta subseção, são definidos os principais parâmetros utilizados na implementação do método AUGMECON2. Esses parâmetros são necessários para calcular os limites de corte nas funções objetivo, dividir o espaço de soluções em intervalos e aplicar a técnica de *bypass* que otimiza a busca por soluções não dominadas.

- r_k : Intervalo (*range*) da função objetivo f_k , definido como a diferença entre os valores máximo e mínimo.
- q_k : Número de divisões do intervalo r_k .
- $step_k$: Tamanho de cada subintervalo da função objetivo f_k , dado por $step_k = r_k/q_k$.
- f_k^{\min} : Valor mínimo observado para a função objetivo f_k na tabela de *payoff*.
- e_k : Valor da restrição associada à função objetivo f_k , calculado como $e_k = f_k^{\min} + i_k \cdot step_k$.

- S_k : Variáveis de excesso, representando o quanto uma solução ultrapassa o limite estabelecido por e_k .
- b : Coeficiente de *bypass*, calculado como $b = \lfloor S_2 / step_2 \rfloor$, utilizado para pular iterações redundantes no *loop* interno.

5 Resultados

Utilizando a biblioteca PuLP do *Python* para a implementação computacional e otimização, em conjunto com Pandas e NumPy para análise e tratamento dos dados, aplicamos o método AUGMECON2 para obter a seguinte fronteira de Pareto, por meio de 100 iterações do algoritmo. Para a resolução dos subproblemas de programação linear e inteira mista dentro do método, utilizamos o *solver* CBC (*Coin-OR Branch and Cut*), que é o *solver* padrão da biblioteca PuLP.

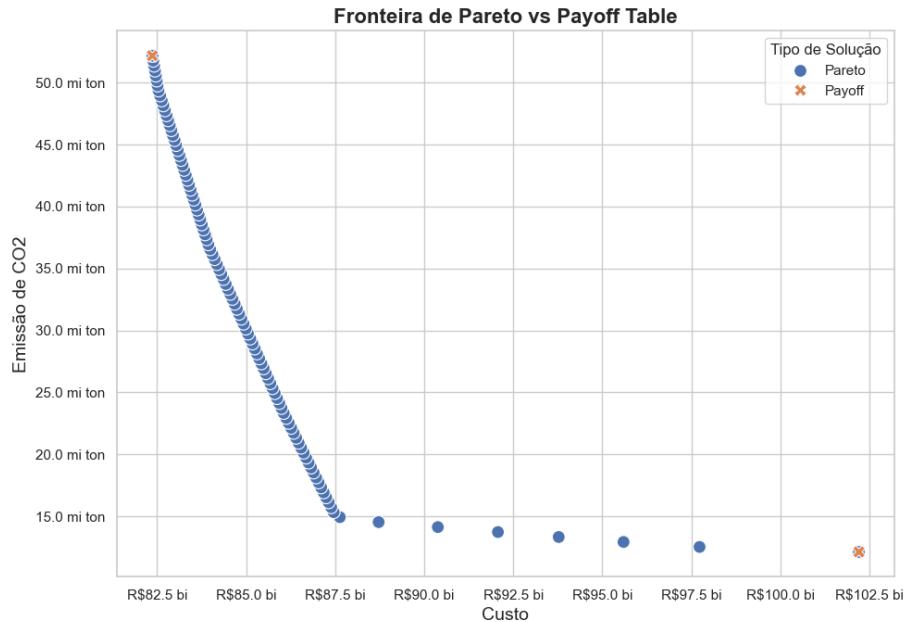


Figura 1: Fronteira de Pareto do método AUGMECON2 e pontos *payoff*.

Agora, deve-se analisar especificamente o comportamento das variáveis de decisão nos casos em que é minimizado o custo, balanço de CO₂ e duas soluções obtidas pelo método AUGMECON2. A ideia é verificar se há um comportamento similar das variáveis de decisão ao longo da rede de nosso problema e, caso contrário, propor possíveis abordagens que possam sanar ou descrever essas diferenças.

Vale ressaltar que para coletar os dados das tabelas seguintes e exibir os gráficos, foi utilizada uma excelente ferramenta de visualização, o *Power BI*. Nela, foi possível extrair tanto os valores apresentados a seguir, quanto obter uma representação visual do comportamento de todas as etapas da cadeia produtiva, de modo a comparar cada uma das soluções obtidas.

5.1 Resultados Minimização da Função Custo

Como pode-se observar, o custo que mais possui representação nesta solução, e nas demais analisadas, é o Custo com Transporte Interno. Esse custo abrange tanto o transporte das mercadorias dos centros produtores até os silos, quanto dos silos até os mercados internos e portos. De modo geral, como será apresentado nas demais soluções, os custos associados a esse transporte interno permanecem na faixa de R\$ 60 bilhões, indicando a existência de rotas preferenciais entre as localidades logísticas dentro do território nacional (ver Seção 5.4).

Além disso, nota-se que o custo com estoque e armazenagem é praticamente irrelevante quando comparado aos custos de transporte e da área de cultivo.

Dessa forma, podemos dizer que os custos mais significativamente reduzidos ao longo das soluções foram aqueles relacionados ao transporte para o mercado externo (dos portos aos destinos internacionais) e à área cultivada.

Categoria de Custo	Valor Absoluto (R\$)	Participação Relativa (%)
Custo Área Cultivada	12.924.360.645	15,69%
Custo Ativação de Silos	12.136.609	0,01%
Custo Estoque e Secagem	257.160.741	0,31%
Custo Transporte ao Mercado Externo	8.693.994.930	10,56%
Custo Transporte Interno	60.478.698.327	73,43%
Total Geral	82.366.351.252	100%

Tabela 1: Custos relativos ao problema de minimização de custo.

Sobre o comportamento da emissão, sequestro e balanço de CO₂, observa-se que o principal responsável pelas emissões nesta solução foi a Emissão CO₂ – Mercado Externo, ou seja, a que vem do transporte de cargas dos portos brasileiros até os mercados internacionais. Como será discutido na Seção 5.4, esta solução priorizou o uso do porto com menores taxas de exportação e custos logísticos, porém associado a uma frota marítima com altos índices de emissão de poluentes, o que explica o aumento relativo nesse componente de emissão.

Indicador	Valor (ton)	Observação
Emissão CO ₂ - Mercado Externo	50.182.326	91,66% da emissão total
Emissão CO ₂ - Mercado Interno	4.566.579	8,34% da emissão total
Sequestro de CO ₂	2.576.321	–
Balanço de CO₂	52.172.584	Emissão total menos sequestro

Tabela 2: Indicadores de emissão, sequestro e balanço de CO₂ para a minimização de custo.

5.2 Resultados Minimização da Função Balanço de CO₂

Como descrito anteriormente, o custo associado ao Transporte Interno manteve-se estável, na ordem de R\$ 60 bilhões, enquanto os custos relacionados à secagem, estoque e ativação de silos continuam sendo baixos.

Por outro lado, observa-se um aumento de aproximadamente R\$ 3 bilhões no custo da Área Cultivada, o que era esperado, tendo em vista que a redução do balanço de CO₂ exige o uso de uma área agrícola maior, resultando em um custo mais elevado.

Porém, a principal diferença encontra-se no custo de transporte para os mercados externos: houve um aumento de quase três vezes em relação ao valor observado na solução que minimiza apenas o custo. Como será discutido posteriormente, essa elevação decorre da escolha de outros portos, cujos custos logísticos e taxas de exportação são mais altos, mas que apresentam índices de emissão de CO₂ mais baixos — alinhando-se, portanto, ao objetivo de redução das emissões totais.

Categoria de Custo	Valor Absoluto (R\$)	Participação Relativa (%)
Custo Área Cultivada	15.578.411.322	15,48%
Custo Ativação de Silos	11.386.067	0,01%
Custo Estoque e Secagem	296.400.146	0,29%
Custo Transporte ao Mercado Externo	24.400.461.941	24,25%
Custo Transporte Interno	60.319.688.834	59,96%
Total Geral	100.606.348.310	100%

Tabela 3: Custos referentes ao problema de minimização do Balanço de CO₂.

Para o balanço de CO₂, observa-se que tanto a taxa de sequestro quanto a emissão proveniente do Mercado Interno mantiveram-se próximas aos valores da solução anterior. Dessa forma, fica evidente que o fator determinante para a variação no balanço de CO₂ está diretamente relacionado à escolha dos portos utilizados para o envio das cargas. Portos com menores taxas de emissão têm sido priorizados nas soluções que visam à sustentabilidade ambiental, ainda que isso implique em maiores custos.

Indicador	Valor (ton)	Observação
Emissão CO ₂ - Mercado Externo	11.186.626,5	73,11% da emissão total
Emissão CO ₂ - Mercado Interno	4.114.772,6	26,89% da emissão total
Sequestro de CO ₂	2.868.027,1	—
Balanço de CO₂	12.433.372	Emissão total menos sequestro

Tabela 4: Indicadores de emissão, sequestro e balanço de CO₂ para a minimização da função Balanço de CO₂.

5.3 Resultados obtidos pelo método AUGMECON2

Para as soluções obtidas por meio do método AUGMECON2, descrito no Algoritmo 1, observa-se um comportamento semelhante aos cenários anteriores em relação aos custos com Área Cultivada, Transporte Interno, Estoque e Secagem. Especificamente, foram analisadas duas soluções intermediárias: a 1^a solução (iteração 3) e a 2^a solução (iteração 6) do método. Esse padrão indica que, de forma geral, o modelo adotado apresenta uma preferência estrutural por determinadas localidades para a produção, o envio da mercadoria aos silos e a distribuição dos silos aos mercados internos.

A principal diferença, portanto, está nos custos associados aos portos, o que sugere que, nessas soluções intermediárias, a carga foi distribuída entre um número maior de portos. Essa diversificação possibilitou um maior equilíbrio entre custo logístico e emissões de CO₂.

Categoria de Custo	Valor Absoluto (R\$)	Participação Relativa (%)
Custo Área Cultivada	12.975.044.143	14,07%
Custo Ativação de Silos	11.816.104	0,01%
Custo Estoque e Secagem	260.295.191	0,28%
Custo Transporte ao Mercado Externo	18.554.653.338	20,12%
Custo Transporte Interno	60.398.359.527	65,51%
Total Geral	92.199.168.303	100%

Tabela 5: Custos referente à 1^a Solução – AUGMECON2.

Como pode ser observado na Tabela 6, o balanço de CO₂ apresentou um acréscimo de aproximadamente 1,4 milhão de toneladas em comparação à solução que minimiza exclusivamente essa função. Em contrapartida, houve uma redução de R\$ 8,4 bilhões no custo total, evidenciando um ganho econômico significativo. Além disso, embora a emissão proveniente do transporte externo ainda represente a maior parcela das emissões totais, observa-se uma redução de quase 40 milhões de toneladas nesse componente. Esse comportamento reforça a hipótese de que a distribuição da mercadoria passou a ser feita por múltiplos portos, o que contribui para um equilíbrio mais eficiente entre custo e impacto ambiental.

Indicador	Valor (ton)	Observação
Emissão CO ₂ - Mercado Externo	12.320.966	74,73% da emissão total
Emissão CO ₂ - Mercado Interno	4.165.360	25,27% da emissão total
Sequestro de CO ₂	2.600.530	–
Balanço de CO₂	13.885.796	Emissão total menos sequestro

Tabela 6: Indicadores de emissão, sequestro e balanço de CO₂ para a 1^a Solução – AUGMECON2.

Para a análise desta outra solução obtida pelo método AUGMECON2, podemos notar os mesmos comportamentos citados anteriormente.

Categoria de Custo	Valor Absoluto (R\$)	Participação Relativa (%)
Custo Área Cultivada	12.924.360.645	14,77%
Custo Ativação de Silos	12.131.520	0,01%
Custo Estoque e Secagem	256.286.814	0,29%
Custo Transporte ao Mercado Externo	13.801.392.026	15,77%
Custo Transporte Interno	60.514.145.709	69,15%
Total Geral	87.496.316.714	100%

Tabela 7: Custos relativos à 2^a Solução – AUGMECON2.

Indicador	Valor (ton)	Observação
Emissão CO ₂ - Mercado Externo	13.258.602	75,24% da emissão total
Emissão CO ₂ - Mercado Interno	4.362.592	24,76% da emissão total
Sequestro de CO ₂	2.576.321	–
Balanço de CO₂	15.044.873	Emissão total menos sequestro

Tabela 8: Indicadores de emissão, sequestro e balanço de CO₂ para a 2^a Solução – AUGMECON2.

5.4 Comparação dos Resultados

Antes de avançarmos para a análise dos resultados, é importante apresentar algumas informações complementares referentes à demanda interna e externa por período, bem como aos custos de exportação, emissões de CO₂ associadas aos portos e suas respectivas capacidades de armazenamento.

Para evitar sobrecarregar visualmente esta seção com tabelas extensas, disponibilizamos todos os dados no seguinte [link](#).

Mercado	Período	Demanda (ton)
Ceará	1	108.965,0
Acre	1	120.236,0
Rondônia	1	125.689,0
Tocantins	1	125.698,0
Pará	1	259.896,0
Amapá	1	269.895,0
Santa Catarina	1	809.562,0
São Paulo	1	1.058.191,0
Mato Grosso do Sul	1	1.559.639,0
Ceará	2	130.758,0
Acre	2	144.283,0
Rondônia	2	150.826,0
Tocantins	2	150.837,0
Amapá	2	183.874,0
Pará	2	311.875,0
Santa Catarina	2	971.474,0
São Paulo	2	1.269.829,0
Mato Grosso do Sul	2	1.871.566,0
Total Geral	–	9.623.093,0

Tabela 9: Demanda interna por mercado e período.

Mercado Externo	Período	Demand (ton)
China – Xangai	1	2.916.868,0
China – Xangai	2	8.916.868,0
Total Geral	–	11.833.736,0

Tabela 10: Demanda externa por período.

Localidade do Porto	Estado	Capacidade (ton)
Santos, São Paulo	SP	6.412.541
São Francisco do Sul	SC	5.110.912
Vitória, Espírito Santo	ES	2.504.607
Paranaguá	PR	5.079.106

Tabela 11: Portos considerados com suas respectivas capacidades.

Porto	Mercado Externo	Distância (km)	Custo Exp. (R\$/ton)	Custo Transp. (R\$/ton·km)	Taxa Emissão (ton CO ₂ /ton·km)
Santos, São Paulo	China–Xangai	18.651	980	0,01	0,00006
São Francisco do Sul	China–Xangai	18.983	320	0,0002	0,0005
Vitória, Espírito Santo	China–Xangai	17.909	410	0,0003	0,0003
Paranaguá	China–Xangai	18.930	1.230	0,09	0,00004

Tabela 12: Distâncias, custos e taxas de emissão associadas aos portos no transporte para o mercado externo.

Após a análise dos resultados e a formulação de hipóteses sobre o comportamento do fluxo logístico em nossa rede, passamos agora a uma avaliação mais detalhada. Para isso, utilizaremos gráficos comparativos que ilustram o comportamento do fluxo entre as quatro soluções distintas apresentadas anteriormente, permitindo o acompanhamento das decisões de roteamento, uso de silos e escolha de portos. Vale ressaltar que os gráficos a seguir englobam os dois períodos de análise, com exceção do estoque, que só é definido no primeiro período.

A primeira parte da análise consiste em verificar em quais localidades foram mais utilizadas a área de produção; para isso, foi elaborado o seguinte gráfico com base nos dados obtidos:

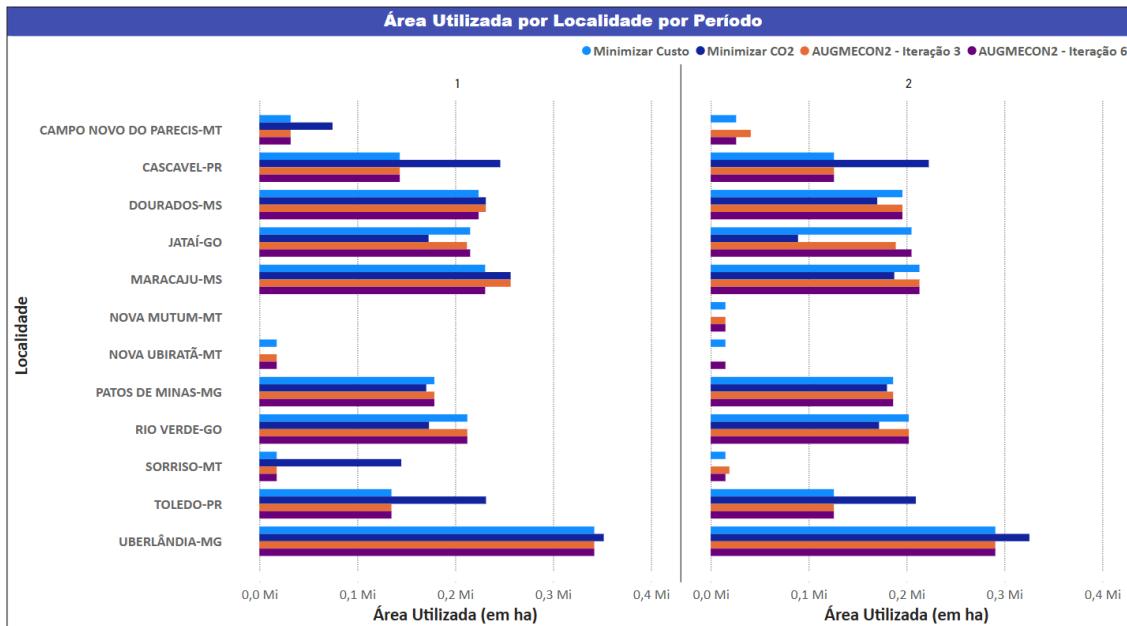


Figura 2: Gráfico comparativo da área utilizada para produção por Localidade.

Como pode ser observado na Figura 2, de forma geral, ambos os problemas de

otimização apresentaram uma tendência a selecionar as mesmas localidades para o cultivo. A principal exceção ocorre no caso da minimização do CO₂, que ampliou a seleção para outras localidades adicionais, conforme também evidenciado na Figura 3. Esse comportamento está alinhado com a análise feita anteriormente para essa solução: a escolha de uma área agrícola maior aumenta a taxa de sequestro de CO₂, contribuindo assim para a redução do balanço total de emissões.

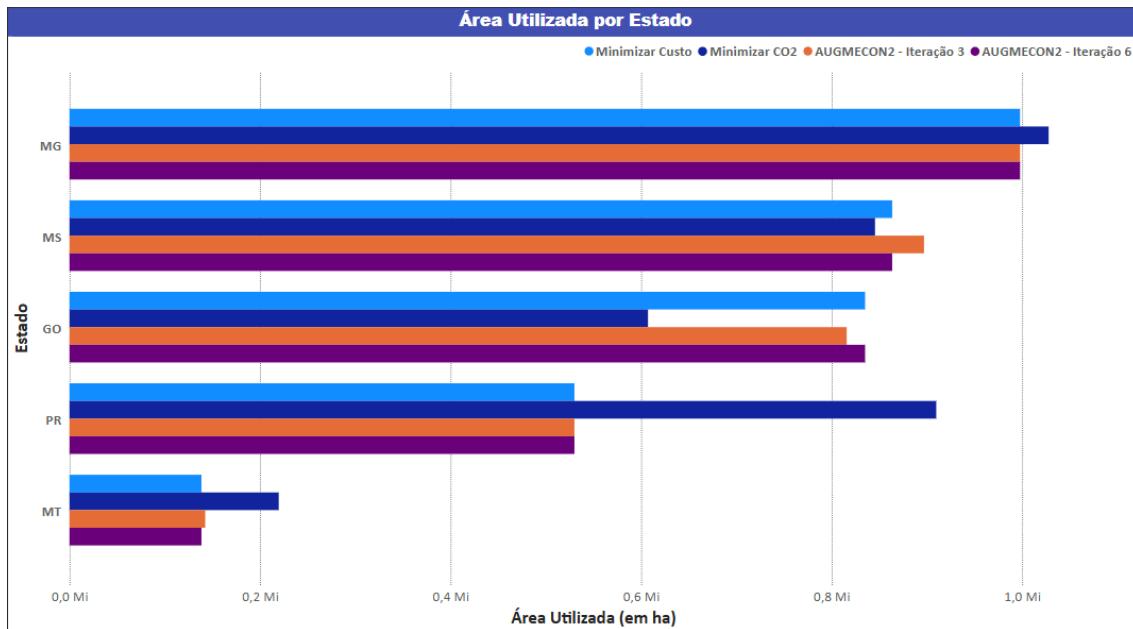


Figura 3: Gráfico comparativo da área utilizada para produção por Estado.

No que diz respeito ao envio de milho aos silos, vale lembrar que, conforme a restrição imposta no modelo, os centros produtores só podem enviar milho para silos localizados no mesmo estado, independentemente de estarem ou não na mesma cidade. Nesse contexto, observa-se que as localidades de envio permaneceram coerentes com aquelas escolhidas para o cultivo. As variações na quantidade de envio são explicadas pelos diferentes coeficientes de produtividade (ton/ha) associados a cada área cultivada, o que impacta diretamente no volume produzido e, consequentemente, no volume transportado aos silos.

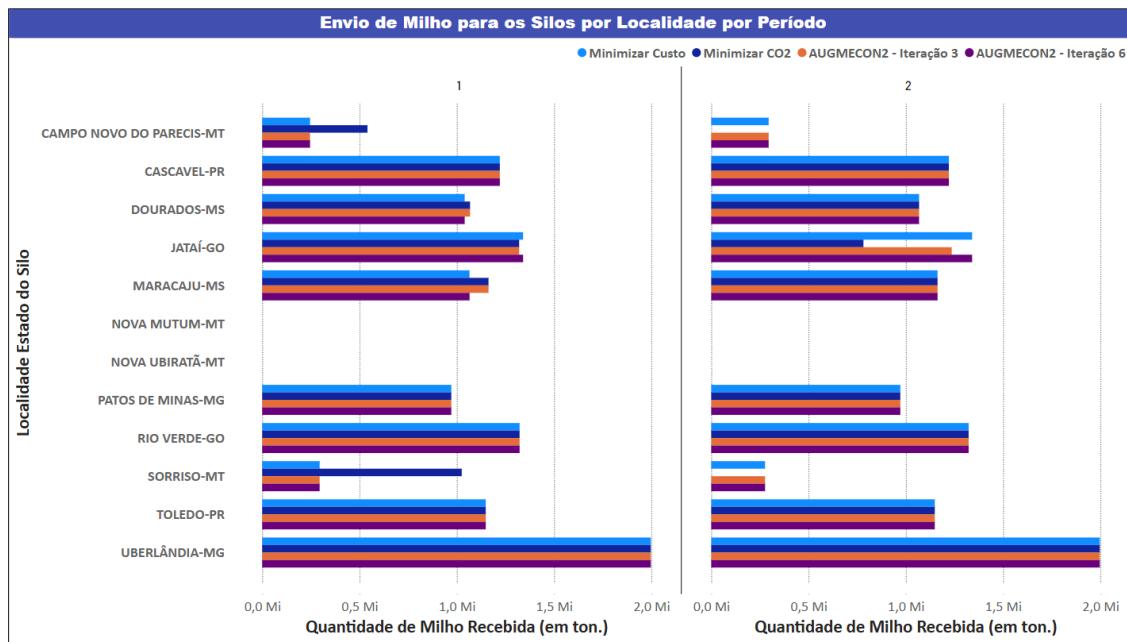


Figura 4: Gráfico comparativo de envio de milho para o Silos por período e solução em ton.).

Conforme mostrado nas Figuras 4 e 5, é possível notar que alguns dos silos que mais receberam carga não realizaram o envio direto aos mercados consumidores, como o caso dos silos em Uberlândia-MG. Além disso, observam-se variações nas quantidades de milho enviadas no cenário de minimização de CO₂, em comparação às demais soluções, sendo que tal diferença pode estar associada à escolha de localidades com rotas mais próximas aos silos de origem, o que favorece a redução da emissão de CO₂.

Diante disso, torna-se necessário comparar o balanço de estoque e o volume de envio para os portos, a fim de verificar se as soluções seguem um padrão consistente de comportamento logístico ou se há divergências entre elas.

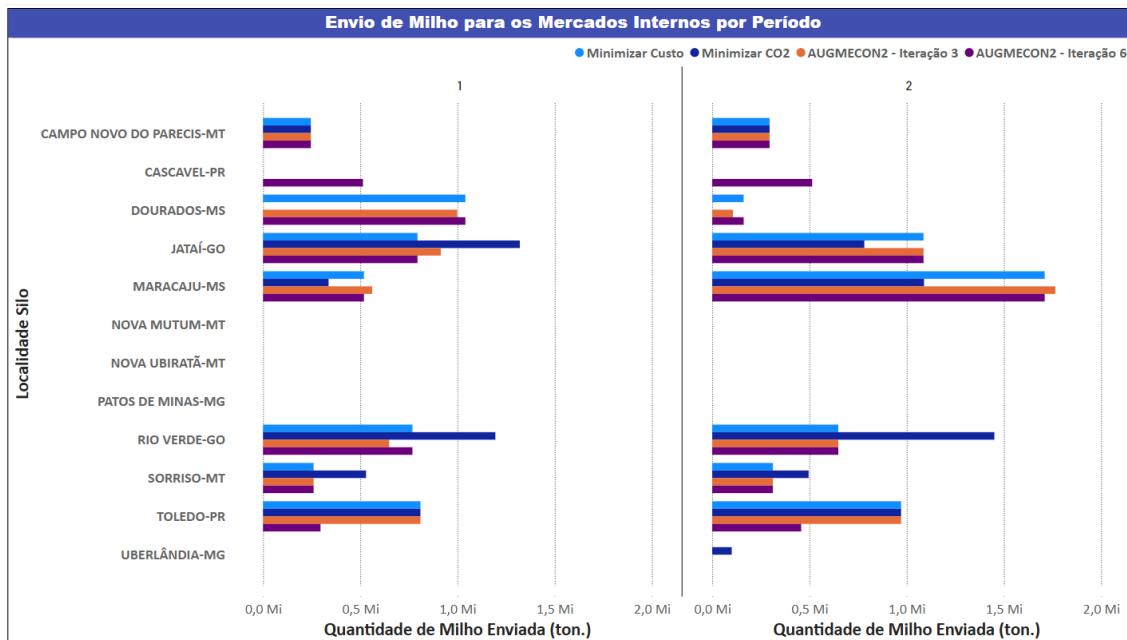


Figura 5: Gráfico comparativo de envio do Silo para o Mercado Interno.

Conforme apresentado na Figura 6, os silos com os maiores volumes de estoque de milho estão localizados em Uberlândia–MG, que também figura entre os silos que mais receberam carga nas diferentes soluções. No período 1, observou-se o armazenamento de aproximadamente 1,2 a 2,0 milhões de toneladas de milho nesse silo, considerando todas as otimizações.

Além disso, a Figura 7 mostra que, de fato, grande parte da carga estocada em Uberlândia e Patos de Minas — com exceção da solução de minimização de CO₂ — foi posteriormente enviada aos portos no segundo período. Em alguns casos, essa quantidade correspondeu a quase metade do volume total estocado no primeiro período.

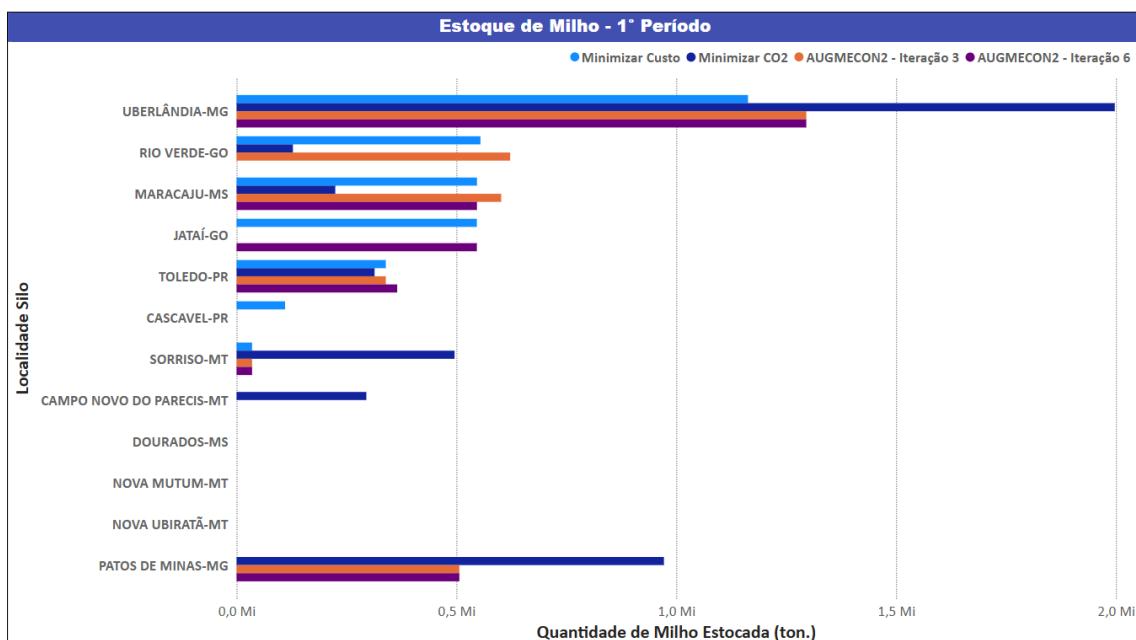


Figura 6: Gráfico comparativo de Estoque no 1^a Período.

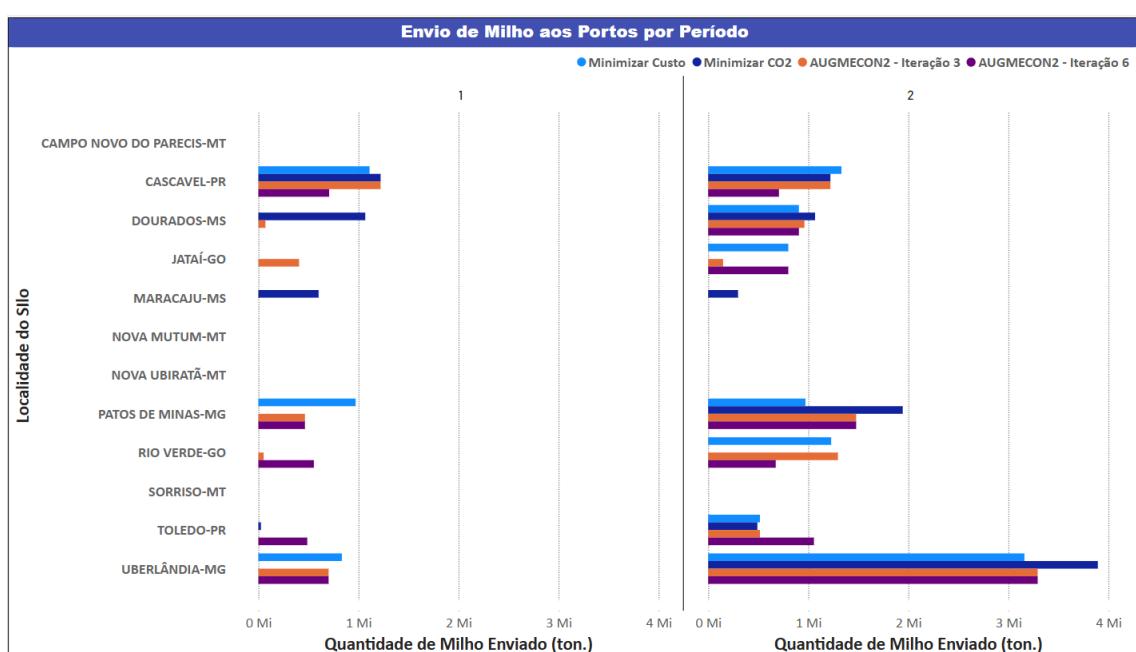


Figura 7: Gráfico comparativo de envio do Silo para o Porto.

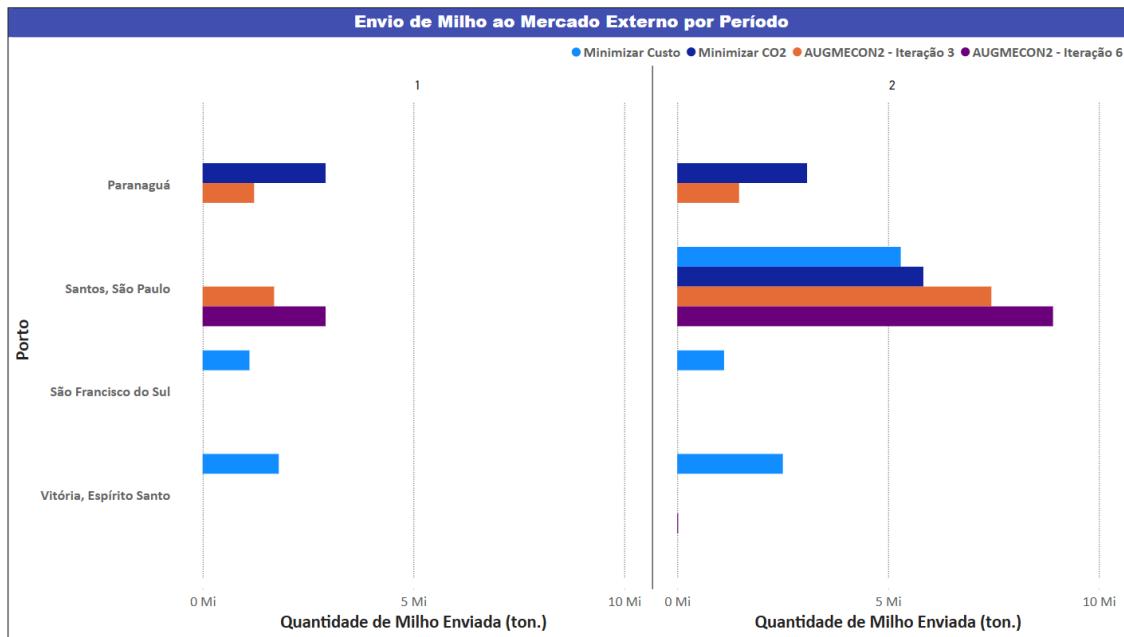


Figura 8: Gráfico comparativo de envio do Porto ao Mercado Externo.

A análise conjunta dos fluxos de exportação (Figura 8), das características logísticas dos portos (Tabela 12) e da demanda externa por período (Tabela 10) permite tirar as seguintes conclusões:

- **Minimização de Custo.** No período 1, a solução de minimização de custo concentrou as exportações em Vitória-ES e São Francisco do Sul-SC, que apresentam o melhor custo-benefício, considerando principalmente a distância. No período 2, com a demanda ampliada, foi necessário acionar também o porto de Santos-SP, pois a capacidade de Vitória e São Francisco do Sul não era suficiente para atender à demanda solicitada. Apesar de Santos ter custo de exportação inferior ao de Paranaguá (Tabela 12), o modelo o incluiu devido à sua maior capacidade instalada. Vale observar que os portos mais utilizados, embora eficientes em custo, apresentam as maiores taxas de emissão de CO₂, que podem ser observadas na Tabela 2.
- **Minimização de CO₂.** Ao priorizar a redução de emissões, observa-se que, no período 1, houve apenas o envio de mercadorias para Paranaguá, que possui a menor taxa de emissão (0,000041 ton CO₂/ton·km). E assim como ocorre na minimização do custo, o porto de Paranaguá não possui capacidade suficiente para atender toda a demanda; logo, parte da carga vai para o porto de Santos. Como se pode notar na Tabela 12, o porto de Paranaguá é o que possui o maior custo de exportação e de transporte. Deste modo, ao priorizar a minimização da emissão, temos que o custo se eleva significativamente, como foi mostrado na Tabela 3.
- **Soluções AUGMECON2.** Nas iterações intermediárias do método AUGMECON2, o modelo equilibra custos e emissões:

- **1^a Solução - AUGMECON2:** distribui as mercadorias entre o porto de Santos e Paraguá, evidenciando um balanceamento entre uma região que emite menos CO₂ e uma que possui um custo moderado e uma capacidade maior
- **2^a Solução - AUGMECON2:** nesta iteração, toda a produção passou apenas pelo porto de Santos, que obteve um aumento significativo no balanço de CO₂ em comparação à 1^a Solução do AUGMECON2, de quase 1,2 Milhão de ton. CO₂ (veja as Tabelas 5, 7, 6, 8), mas obteve um custo de R\$ 4,7 bilhões a menos.

6 Conclusões

A análise detalhada deste trabalho permitiu identificar alguns pontos de atenção e oportunidades de melhoria. Em termos de modelagem, observou-se que o custo de ativação de silos (que chegou a representar apenas 0,01% do custo total em algumas soluções) pode estar subestimado, sugerindo a necessidade de revisitar esse parâmetro para refletir custos mais realistas de infraestrutura, tendo em vista que não há muitos dados disponíveis na internet. Vale ressaltar que os dados referentes à emissão de CO₂ nos portos podem possuir alguma imprecisão, tendo em vista que não há muitas informações desses dados na internet.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que as variações na configuração da rede logística são em grande parte motivadas pela escolha dos portos de exportação. A minimização de custos tende a concentrar os fluxos em portos de menor tarifa, como Vitória-ES e São Francisco do Sul-SC, enquanto a minimização de emissões privilegia Paranaguá-PR, de menor taxa de emissão, ainda que com custo maior. Contudo, fatores adicionais, como limitações de capacidade portuária, localização espacial da produção e dos silos e disponibilidade de modais (rodoviário vs. ferroviário/hidroviário), desempenham papel relevante: ao superar a capacidade de determinados portos, o modelo é forçado a diversificar rotas, mas a escolha das rotas internas mantém-se relativamente estável, movendo a maior parte da variação para o transporte externo.

Por fim, para aprimorar os *tradeoffs* entre custo e sustentabilidade, sugerimos algumas estratégias:

- Expandir o uso de modais (ferrovia e hidrovia) nas rotas de escoamento, reduzindo a dependência do transporte rodoviário;
- Otimizar a alocação de estoques e o posicionamento de silos para criar rotas intermodais mais curtas e eficientes até os portos;
- Contratar operadores portuários com tarifas mais competitivas e tecnologias de baixo carbono (equipamentos elétricos, energia limpa) para reduzir custos e emissões nas operações de embarque;

Deste modo, mostramos que é possível utilizar uma ferramenta matemática - Otimização Multiobjetivo - para entender o comportamento de uma cadeia tão complexa como a cadeia logística do milho no Brasil. Além disso, com base nos

resultados obtidos, fizemos uma análise detalhada de cada uma das soluções e verificamos quais variáveis ou fatores mais influenciam nosso modelo. E com isso, facilitar a tomada de decisão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro PIBIC/CNPq.

Referências

- [1] Canal Rural. *Os reis da espiga: Veja os 15 municípios que mais produzem milho no Brasil*. 2024. URL: <https://www.canalrural.com.br/agricultura/os-reis-da-espiga-veja-os-15-municípios-que-mais-produzem-milho-no-brasil/> (acesso em 22/10/2024).
- [2] Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). *Informações Agropecuárias – Safras de Grãos*. 2024. URL: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> (acesso em 22/10/2024).
- [3] Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). *Informações sobre Armazenagem de Grãos no Brasil*. 2024. URL: <https://www.conab.gov.br/armazenagem> (acesso em 28/10/2024).
- [4] Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). *Boletim Logístico: Portos do Arco Norte respondem por 43,3% das exportações de milho*. Acesso em: 13 abr. 2025. 2024. URL: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5493-boletim-logistico-portos-do-arco-norte-respondem-por-43-3-das-exportacoes-de-milho>.
- [5] Compre Rural. *Brasil amplia dependência da China nas exportações de grãos*. Acesso em: 13 abr. 2025. 2024. URL: <https://www.comprerural.com/brasil-amplia-dependencia-da-china-nas-exportacoes-de-graos/>.
- [6] Angelo Aliano Filho, Cleber Damião Rocco e Reinaldo Morabito. “Bi-objective model for tactical planning in corn supply chain considering CO₂ balance”. Em: *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* 11.1 (2024), p. 2337442. DOI: 10.1080/23302674.2024.2337442. URL: <https://doi.org/10.1080/23302674.2024.2337442>.
- [7] George Mavrotas e Kostas Florios. “AUGMECON2: A novel version of the ε -constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems”. Em: *Laboratory of Industrial and Energy Economics, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens* (2013). URL: <https://www.gams.com/modlib/adddocs/epscmmip.pdf>.
- [8] Ministério da Fazenda. *ICMS: Regras e Alíquotas para Operações Interestaduais e Internas*. 2024. URL: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/icms> (acesso em 25/11/2024).
- [9] *Visualização de Dados – Silos de Armazenagem no Brasil*. 2024. URL: <https://www.conab.gov.br/armazenagem> (acesso em 25/10/2024).
- [10] Wikipédia. *Economia de Santa Catarina*. 2024. URL: https://pt.wikipedia.org/wiki/Economia_de_Santa_Catarina.