

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

FERNANDO PAULI DE BASTIANI

Logística de fertilizantes no Brasil: aplicação de um modelo matemático de programação
inteira mista para localização de misturadoras

São Paulo

2023

FERNANDO PAULI DE BASTIANI

Logística de fertilizantes no Brasil: aplicação de um modelo matemático de programação inteira mista para localização de misturadoras

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

São Paulo

2023

FERNANDO PAULI DE BASTIANI

Logística de fertilizantes no Brasil: aplicação de um modelo matemático de programação inteira mista para localização de misturadoras

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Caixeta-Filho

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de abril de 2023

Fernando Pauli de Bastiani

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Bastiani, Fernando

Logística de fertilizantes no Brasil: aplicação de um modelo matemático de programação inteira mista para localização de misturadoras / F. Bastiani -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

96 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Logística 2.Fertilizantes 3.Programação Matemática I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha família, Silvana, Sebastião, Felipe e Vitor, que me deram todas as condições necessárias para minha educação, o que foi essencial para que eu chegasse até aqui.

À ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz), Escola Politécnica da USP e todos os professores pelos ensinamentos e que fizeram parte da minha formação.

Aos meus companheiros de trabalho do ESALQ-LOG (Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial, que ao longo dos últimos 9 anos me ajudaram a crescer profissionalmente e pessoalmente. Um agradecimento especial para Everton Costa, Rodrigo de Moraes Santos, Abner Matheus João, Fernando Vinícius da Rocha e Thiago Péra, que de alguma forma me auxiliaram no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor José Vicente Caixeta Filho, que foi responsável pela minha primeira experiência acadêmica e profissional, além de ter sido orientador deste trabalho.

À minha companheira Bruna Drago de Araújo, que sempre esteve presente nos momentos bons e ruins durante essa trajetória.

Por fim, agradeço a todos amigos e familiares que de alguma forma foram importantes.

RESUMO

BASTIANI, Fernando Pauli. **Logística de fertilizantes no Brasil: aplicação de um modelo matemático de programação inteira mista para localização de misturadoras.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Em 2018, o Brasil era o quarto maior consumidor de fertilizantes, o que confere importância para este que é um dos principais insumos da agricultura brasileira. A complexidade da cadeia produtiva objetivou este estudo a otimizar a logística de fertilizantes no Brasil, utilizando um modelo matemático para a localização de indústrias misturadoras, levando em consideração as principais características de sua rede de transporte. Além disso, cinco cenários foram analisados para o melhor entendimento da logística de fertilizantes. Através dos resultados foi possível estimar os locais e capacidades ótimas para a mistura de fertilizantes no Brasil. Os resultados ainda mostraram que os custos tributários devem ser considerados também como custos logísticos, sendo que foi observada uma grande modificação no perfil de localização das misturadoras e dos fluxos de transporte de fertilizantes. O trabalho também evidencia um grande potencial de aumento na representatividade do Arco Norte nos fluxos de importação de fertilizantes, ressaltando que investimentos nesses portos trazem benefícios logísticos. Ainda assim, o aumento da capacidade atual e as novas infraestruturas para a intermodalidade do transporte de fertilizantes proporcionaram uma redução de 10% no custo logístico da rede de transporte, mostrando a necessidade de investimentos para a diversificação da matriz de transporte de fertilizantes no Brasil.

Palavras-chave: logística, fertilizantes, misturadoras, otimização

ABSTRACT

BASTIANI, Fernando Pauli. **Logística de fertilizantes no Brasil: aplicação de um modelo matemático de programação inteira mista para localização de misturadoras.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

In 2018 Brazil is the fourth largest consumer of fertilizers, which gives importance to one of the main inputs of Brazilian agriculture. The complexity of the supply chain led to the optimization study for fertilizer logistics in Brazil, using a mathematical model for mixing industries location, taking into account the main characteristics of its transport network. In addition, five scenarios were analyzed for a better understanding of fertilizer logistics. Through the results it was possible to estimate the optimal locations and resources for the mixture of fertilizers in Brazil. The results also show that the tax costs must also be considered as a logistical cost, and a great change was observed in the location profile of the mixers and the fertilizer transport flows. This study also shows a great potential for increasing the representation of “Arco Norte” in fertilizer import flows, emphasizing that investments in these ports brought logistical benefits. Even though, the current capacity increase and the new infrastructure for intermodal fertilizer transport provide a 10% reduction in the logistical cost of the transport network, showing the need for investments to diversify the fertilizer transport matrix in Brazil.

Keywords: logistics, fertilizer, mixing industries, optimization

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABISOLO - Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos

C1 - Cenário 1

C2 - Cenário 2

C3 - Cenário 3

C4 - Cenário 4

C5 - Cenário 5

CI - Custos *inbound*

CO - Custos *outbound*

CP - Custos poturários

CT - Custos totais

DAP - Fosfato diamônico

HLP - *Hub* Location Problems

I - Impostos

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

KCL - Cloreto de potássio

MAP - Fosfato monoamônico

MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

NPK - Nitrogênio, Fósforo e Potássio

PAM - Pesquisa Agrícola Municipal

SFS - Superfosfato simples

SFT - Superfosfato triplo

SIFRECA - Sistema de Informação de Fretes

USITC - United States International Trade Commission

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da cadeia produtiva de fertilizantes	15
Figura 2 – Indústrias de fertilizantes nitrogenados no Brasil	16
Figura 3 – Indústrias de fertilizantes fosfatados no Brasil	17
Figura 4 – Representatividade da importação em relação ao consumo brasileiro por nutriente.	18
Figura 5 – Representatividade no mercado de fertilizantes.....	19
Figura 6 – Produção de grãos x entregas de fertilizantes	20
Figura 7 – Distribuição das entregas de fertilizantes por cultura no Brasil em 2018.....	21
Figura 8 – Consumo de NPK pelos estados brasileiros.....	22
Figura 9 – Evolução da produção e importações de fertilizantes intermediários no Brasil.	23
Figura 10 – Importação de fertilizantes por porto em 2018	24
Figura 11 – Comparativo do tempo de permanência dos navios de fertilizantes nos principais porto.....	27
Figura 12 – Resumo das alíquotas de ICMS	29
Figura 13 – Exemplo da fórmula para cálculo do ICMS.....	29
Figura 14 – Taxonomia dos problemas de localização de <i>hub</i>	33
Figura 15 – Rede logística considerada para este trabalho.....	35
Figura 16 – Proposta para a equalização dos dados de oferta e demanda de fertilizantes.	36
Figura 17 – Municípios considerados como centroide de demanda, mistura e origens de fertilizantes.	37
Figura 18 – Distribuição da demanda NPK por mesorregião em 2018.....	44
Figura 19 – Distribuição da demanda de NPK por mesorregião em 2018 e projeção para 2028.	54
Figura 20 – Variação da demanda de fertilizantes no Brasil para 2028.....	55
Figura 21 – Estratificação dos custos logísticos para cada cenário analisado.....	56
Figura 22 – Fluxos <i>inbound</i> para casa cenário analisado.....	59
Figura 23 – Fluxos <i>outbound</i> para cada cenário analisado.....	60
Figura 24 – Participação das importações de fertilizantes em cada cenário.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamento tributário do ICMS interno pelos estados	31
Tabela 2 – Fertilizantes considerados e concentração por nutriente.....	41
Tabela 3 – Volume de importação de fertilizantes por porto em 2018.....	42
Tabela 4 – Capacidade de produção das fábricas nacionais de fertilizantes por município. ...	43
Tabela 5 – Volumes movimentados de fertilizantes pelos modos ferroviário e hidroviário em 2018.....	44
Tabela 6 – Curvas de fretes consideradas para a importação de fertilizantes.....	47
Tabela 7 – Curvas de fretes consideradas para a distribuição de fertilizantes.....	48
Tabela 8 – Características dos cenários analisados.....	49
Tabela 9 – Informações levantadas sobre a expansão do sistema multimodalidade para fertilizantes.....	50
Tabela 10 – Projeções do aumento da produção agrícola para 2028.....	51
Tabela 11 – Ranking do consumo de fertilizantes NPK por mesorregião em 2018.....	53
Tabela 12 – Custo total ponderado pela demanda de cada cenário.....	57
Tabela 13 – Capacidades de mistura por estado para cada cenário.....	62
Tabela 14 – Capacidades das misturadoras no estado do Mato Grosso em cada cenário.....	63
Tabela 15 – Volumes alocados pelo modelo matemático para cada tipo de origem e cenário.....	64
Tabela 16 – Participação de cada porto nos fluxos <i>inbound</i> gerados pelo modelo matemático em cada cenário.....	67
Tabela 17 – Perfil de abastecimento de fertilizantes do Mato Grosso em cada cenário.....	68
Tabela 18 – Volume alocado pelo modelo matemático para cada modalidade de transporte e cenário.....	69
Tabela 19 – Volumes alocados pelo modelo matemático nos fluxos intermodais em cada cenário.....	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Contexto e justificativa	12
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Organização do trabalho	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1. O setor de fertilizantes	14
2.1.1. Aspectos produtivos e industriais	14
2.1.2. Aspectos econômicos	19
2.1.3. Aspectos logísticos	24
2.1.4. Aspectos tributários	27
2.2. Problemas de localização e modelagem matemática	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1. Rede de transporte e premissas consideradas	35
3.2. Modelo matemático proposto	38
3.3. Parâmetros e fontes de dados considerados.....	41
3.4. Cenários analisados.....	49
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
4.1. A demanda de fertilizantes no Brasil	52
4.2. Custos logísticos da cadeia produtiva de fertilizantes	55
4.3. Fluxos de transporte e localização de misturadoras de fertilizantes	58
4.3.1. Localização ótima de misturadoras	61
4.3.2. Fluxos de transporte	64
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto e justificativa

O crescimento elevado da população mundial como um todo faz com que o consumo de alimentos cresça bastante. Para que a produção de alimentos acompanhe o crescimento populacional é primordial que haja maiores produtividades, sendo a fertilização do solo um fator importante nesse quesito. Segundo dados da ANDA (2019), o mercado de fertilizantes cresceu quase 345% de 1993 a 2019, sendo esse crescimento primordial para os ganhos de produtividade da agricultura, principalmente de grãos.

Esse setor compõe uma cadeia produtiva extremamente complexa, onde inúmeros produtos considerados matérias-primas podem gerar uma diversidade muito grande de combinações de fertilizantes, conhecidas como misturas. Isso acontece pois cada cultura e cada tipo de solo apresenta necessidades distintas de nutrientes para o desenvolvimento da planta. Dentre os principais nutrientes, o fundamento básico de uma fórmula de fertilizantes pode ser expresso em Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK).

Em 2018, o Brasil era o quarto maior consumidor de fertilizantes no mundo, porém não é grande produtor desses insumos. A forte dependência das importações e os problemas logísticos encarecem os preços de fertilizantes para o produtor rural, penalizando a competitividade dos mesmos. Os altos custos portuários (*demurrage*, armazenagem e impostos), a grande dependência do modal rodoviário, as longas distâncias percorridas até o consumidor e um sistema tributário complexo dificultam o planejamento logístico por parte das empresas do setor, principalmente com relação à localização de indústrias misturadoras.

Os problemas de localização são diversos e já são bastante explorados na literatura. Além dos métodos fornecerem a informação de localização, eles são extremamente importantes no planejamento de uma rede logística, também sendo útil para identificar quais devem ser os fluxos ótimos para a redução do custo total de transporte.

1.2. Objetivos

Diante do apresentado no tópico anterior, o principal objetivo desse trabalho será o de otimizar

os fluxos de transporte de fertilizantes no Brasil através de um modelo matemático para a localização de indústrias misturadoras, de forma a explorar o funcionamento da cadeia logística desse insumo¹. Além disso, uma série de objetivos específicos será buscada, sendo eles:

- Identificar os principais fluxos de importação de fertilizantes no Brasil;
- Identificar os principais polos misturadores de fertilizantes no Brasil;
- Mensurar os custos logísticos (portos, transporte e impostos) da cadeia de fertilizantes;
- Identificar oportunidades futuras relacionadas aos fluxos de importação e distribuição de fertilizantes;
- Redesenhar a rede logística de fertilizantes, com foco nos portos importadores e indústrias misturadoras.

1.3. Organização do trabalho

Esse trabalho será estruturado em cinco grandes capítulos. Após a introdução, o capítulo 2 terá como objetivo realizar uma revisão de literatura sobre o assunto, de forma a explorar a problemática do estudo. O capítulo 3 apresenta o processo metodológico utilizado para se chegar nos resultados, bem como toda a identificação das fontes de dados que serão utilizados. No capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos a partir da aplicação do método descrito no capítulo 3. Finalmente, o capítulo 5 apresenta uma conclusão geral sobre o que foi discutido ao longo do trabalho, relacionando os principais resultados às teorias e formulando políticas públicas e privadas sobre o assunto.

¹ O problema de pesquisa deste trabalho, bem como a definição do método e objetivos, tem como inspiração o Projeto “Omã”, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG) (2021), com participação do autor.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O setor de fertilizantes

2.1.1. Aspectos produtivos e industriais

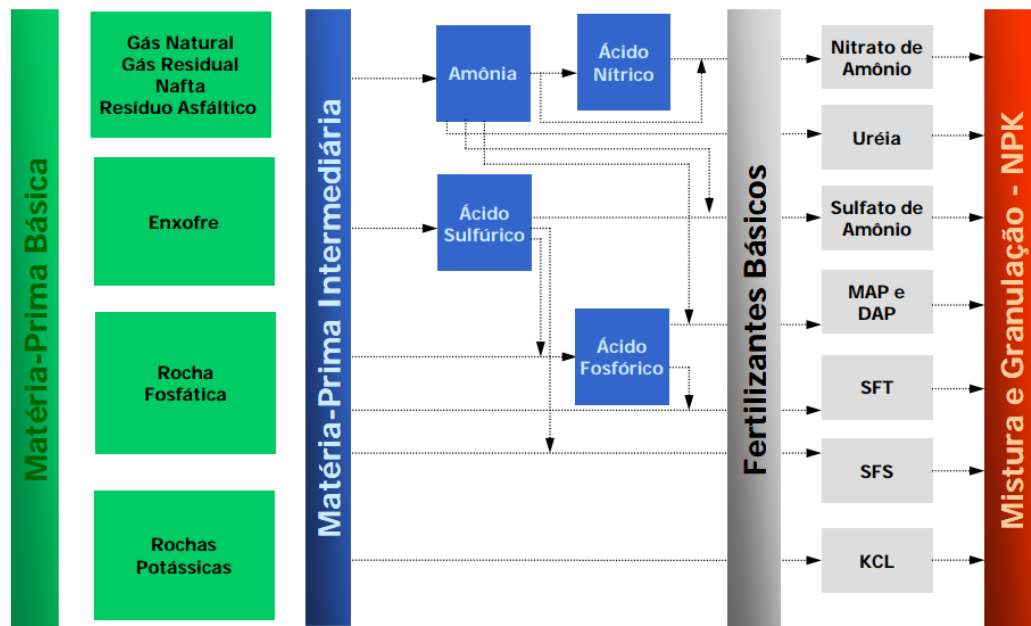
Brasil (1982) define fertilizantes como “substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes das plantas”. A sua principal função é repor ao solo os elementos retirados em cada colheita, com o propósito de manter ou ampliar o potencial produtivo da planta. Portanto, os fertilizantes são essenciais para o aumento da produtividade da agricultura (DIAS E FERNANDES, 2006).

Segundo Dias e Fernandes (2006), uma série de micronutrientes (Boro, Cloro, Cobre, Ferro, Manganês, Sódio e Zinco) e macronutrientes (Carbono, Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Enxofre e Magnésio) compõe os fertilizantes, conforme a quantidade e proporção adequada a cada cultura e solo. As deficiências mais comuns do solo são de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), o que deu o nome da fórmula básica de um fertilizante (NPK). Os demais nutrientes, apesar da importância biológica, não possuem expressão econômica e industrial, pois são utilizados em uma escala muito menor.

Uma formulação 10-10-10, por exemplo, significa que o fertilizante possui 10 pontos percentuais de nitrogênio, fósforo e potássio, sendo os 70% restantes compostos químicos (Hidrogênio ou Carbono) que complementam o mineral. Diante disso, existe uma infinidade de possíveis combinações para a formulação de um fertilizante, o que torna a cadeia produtiva bastante complexa (AZEVEDO, 2015).

A Figura 1 representa um esquema de toda a cadeia produtiva de fertilizantes, desde a extração da matéria-prima básica até a composição das fórmulas que são aplicadas diretamente na agricultura. Basicamente, existem quatro processos industriais importantes até se chegar ao fertilizante final que será entregue ao produtor rural, sendo composto pelas seguintes classes de insumos: matéria-prima básica, matéria-prima intermediária, fertilizantes básicos e misturas NPK.

Figura 1 – Representação da cadeia produtiva de fertilizantes



Fonte: Dias e Fernandes (2006).

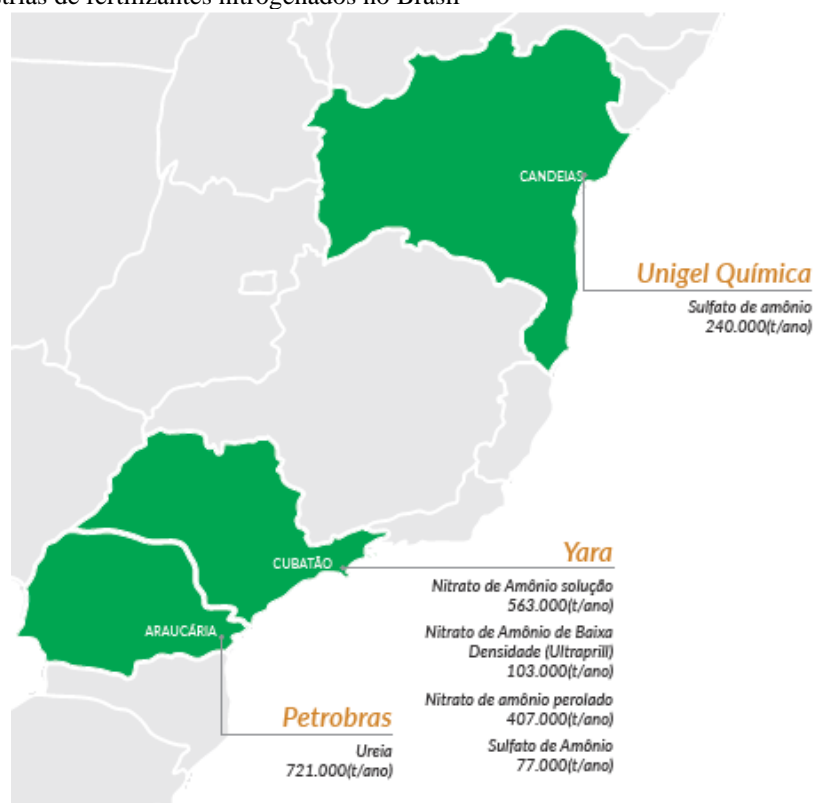
Segundo Dias e Fernandes (2006), o início da cadeia produtiva se dá no processo de extração mineral, que fornece as matérias-primas básicas: gás natural, nafta, resíduos asfálticos, Enxofre e as rochas fosfáticas e potássicas. A partir desses insumos obtêm-se as matérias-primas intermediárias (amônia, ácido sulfúrico, ácido fosfórico e ácido nítrico) e os fertilizantes simples (ureia, sulfato de amônio, fosfato monoamônico - MAP - e diamônico - DAP, superfosfato simples (SFS) e triplo (SFT) e cloreto de potássio (KCL)). As misturas dessas duas últimas classes dão origem aos complexos NPK.

Os fertilizantes nitrogenados possuem na sua composição o nitrogênio (N) como elemento principal, sendo a amônia anidra (NH_3) a matéria-prima básica para os fertilizantes dessa classe. A amônia pode ser obtida através de matérias-primas como o gás natural, nafta e resíduos asfálticos, sendo a primeira a mais utilizada e a melhor fonte de N para a produção de fertilizantes. Além disso, o MAP e DAP também são obtidos através da amônia, sendo resultados da neutralização do ácido fosfórico por esse composto (DIAS E FERNANDES, 2006).

Segundo dados da Global Fert (2019), os principais países produtores de fertilizantes nitrogenados atualmente são a China, Rússia, Estados Unidos e Índia, responsáveis por 55% da produção mundial. O Brasil não é um grande produtor desses fertilizantes, sendo a Petrobras, Yara e Unigel Química as principais indústrias. Na Figura 2 é possível observar a localização

das principais indústrias de fertilizantes nitrogenados no Brasil, bem como suas capacidades de produção.

Figura 2 – Indústrias de fertilizantes nitrogenados no Brasil

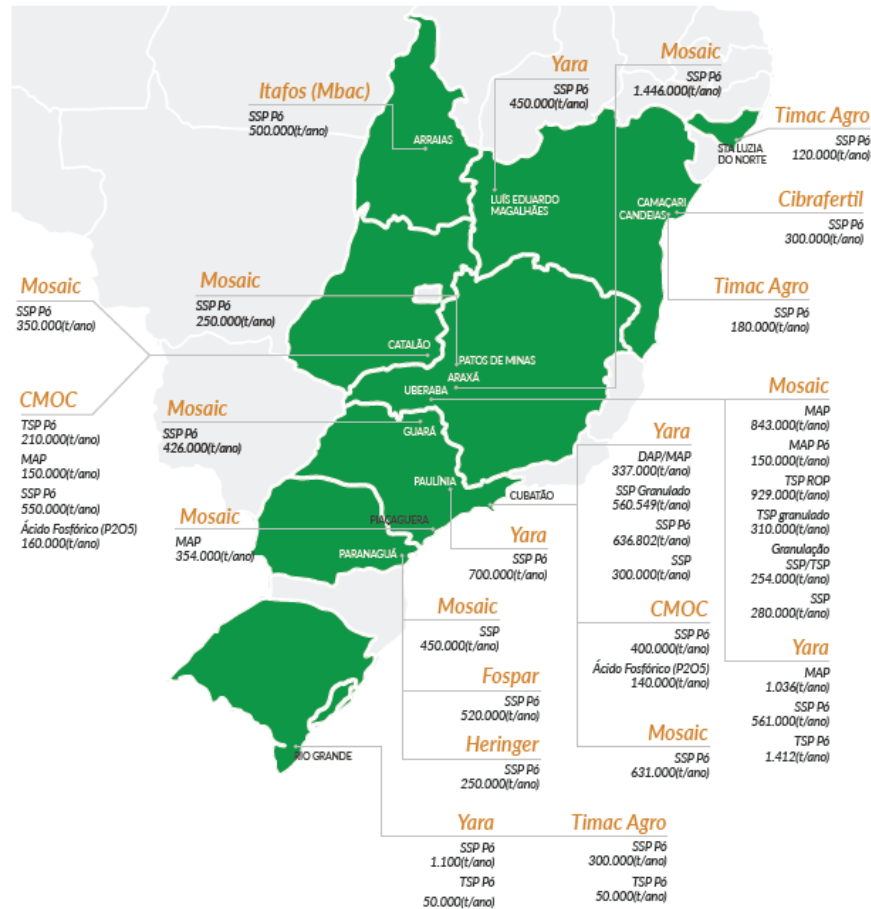


Fonte: ABISOLO (2019).

Já o fósforo (P), segundo Dias e Fernandes (2006), é encontrado na natureza através da exploração de jazidas de rochas fosfáticas, além do Enxofre. De modo simplificado, o Enxofre é utilizado para a produção de ácido sulfúrico, que ao reagir com a rocha fosfática e ácido fosfórico produz os seguintes fertilizantes básicos: MAP, DAP, SFS e SFT.

Os principais produtores de fertilizantes fosfatados, segundo a Global Fert (2019), são a China, Marrocos e Estados Unidos, responsáveis por 82% da produção mundial. Comparado a outros tipos de fertilizantes, o Brasil apresenta uma produção elevada de fertilizantes fosfatados, considerando que o país apresenta algumas minas do minério e que há empresas que as exploram. Na Figura 3 estão ilustradas as principais indústrias de fertilizantes fosfatados presentes no Brasil, bem como suas capacidades de produção.

Figura 3 – Indústrias de fertilizantes fosfatados no Brasil



Fonte: ABISOLO (2019).

Os fertilizantes potássicos (K) podem ser obtidos através da exploração e beneficiamento de sais potássicos. No geral, esses tipos de fertilizantes são os mais simples de serem produzidos, não havendo a necessidade de processos por tratamento com calor ou ácidos fortes. O cloreto de potássio, por possuir uma alta concentração e baixo custo, é o principal fertilizante comercializado no Brasil. A concentração dos fertilizantes potássicos é expressa pelo teor seu óxido K_2O (DIAS E FERNANDES, 2006).

As principais reservas de sais potássicos estão no Canadá, Rússia, Bielorrússia e China, sendo esses países responsáveis por 80% de toda a produção mundial. Há apenas uma mina em operação para a produção de fertilizantes potássicos no Brasil, sendo o principal minério em que o país depende de fornecedores externos. Essa fábrica, localizada em Rosário do Catete (SE) e controlada pela Mosaic Fertilizantes, produziu 429 mil toneladas de cloreto de potássio em 2019, o que representa apenas 4% da demanda nacional (GLOBAL FERT, 2019).

Dentre os três principais micronutrientes que foram apresentados (N, P e K), o Brasil possui um grande déficit na exploração mineral e na produção de fertilizantes. A principal dependência

está nos fertilizantes potássicos, sendo que 95% do consumo precisa ser importado. Já dos nitrogenados, 88% das fontes de amônia vêm de outro país, enquanto dos fosfatados, 73% do volume consumido precisa ser importado (GLOBAL FERT, 2019).

Figura 4 – Representatividade da importação em relação ao consumo brasileiro por nutriente.

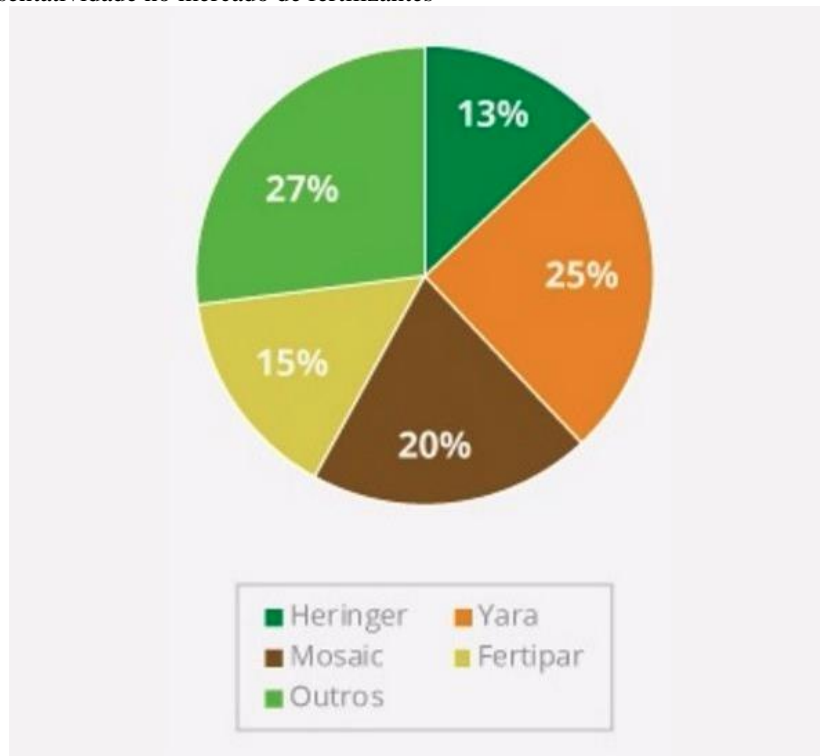


Fonte: Global Fert (2019).

Dias e Fernandes (2006) classificam as empresas que compõem o setor produtivo de fertilizantes em quatro níveis, sendo eles: 1) integradas: produzem desde matérias-primas a fertilizantes compostos; 2) produzem matérias-primas para fertilizantes simples; 3) semi-integradas: produzem fertilizantes simples e compostos com base nas matérias-primas das empresas dos níveis anteriores; 4) produzem e comercializam misturas NPK de fertilizantes.

Considerando as entregas de fertilizantes finais aos produtores, Yara, Mosaic, Fertipar e Heringer representaram juntas 73% do mercado de fertilizantes no ano de 2017 (GOTTEMS, 2017). A Figura 5 ilustra a representatividade de cada empresa no mercado de entregas de fertilizantes no Brasil.

Figura 5 – Representatividade no mercado de fertilizantes



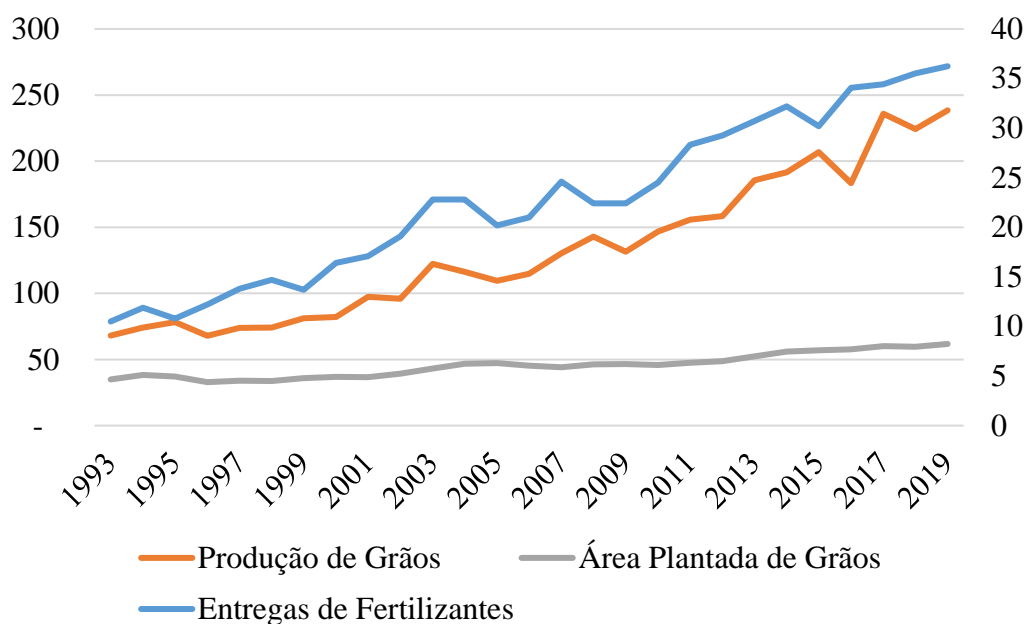
Fonte: Gottens (2017).

2.1.2. Aspectos econômicos

Para Camargo et al. (2017), os fertilizantes foram o motor da evolução da agricultura brasileira a partir da década de 1960. O objetivo na época foi o de recuperar a participação da agricultura na economia do país, visto que até então a estratégia era de apenas expandir terras, sem incremento de produtividade e investimentos em pesquisa. Dessa forma, o Estado desempenhou um papel importante na disseminação do mercado de fertilizantes, promovendo seu uso e atraindo empresas estrangeiras especializadas nesse setor.

O reflexo desse processo começou a ser percebido a partir da década de 1990, acompanhado principalmente do grande aumento na produção de grãos no Brasil, como é possível se observar na Figura 6, que ilustra a evolução histórica da produção e área plantada de grãos, além das entregas de fertilizantes durante os anos de 1993 a 2019.

Figura 6 – Produção de grãos x entregas de fertilizantes



Fontes: ANDA (2019) e IBGE (2019).

Os dados do IBGE (2019) mostram que, enquanto a produção de grãos cresceu 350% entre os anos de 1993 e 2019 no Brasil, a área plantada cresceu apenas 77% ao longo desse período, o que representa um ganho de 98% na produtividade agrícola para essas culturas. Dentre outros fatores, o uso de fertilizantes foi essencial para proporcionar esses ganhos, sendo que os dados da ANDA (2019) apontam para um aumento de 345% nas entregas de fertilizantes no período já mencionado.

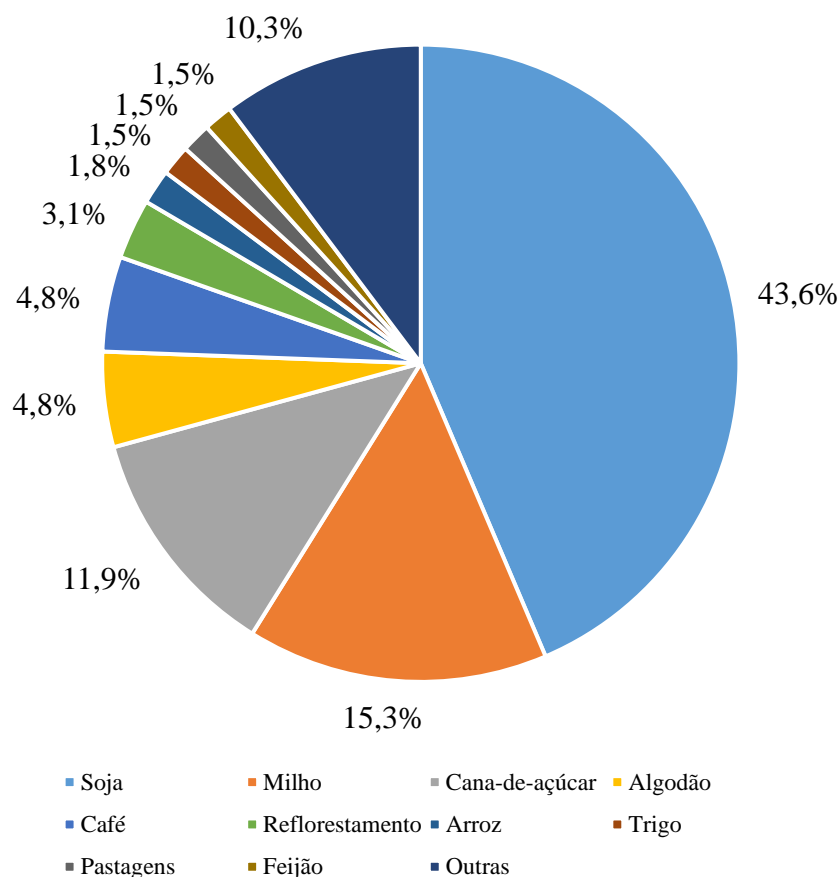
Essa evolução fez com que o agronegócio se tornasse um dos principais pilares econômicos do Brasil, colocando o país como importante polo produtor agropecuário e grande responsável pelo abastecimento de outros países. Segundo dados do CEPEA (2019), em 2019 o agronegócio foi responsável por 21,4% do PIB brasileiro.

O volume entregue de fertilizantes em 2019 ultrapassou 36 milhões de toneladas, o que colocou o país como o quarto maior consumidor de fertilizantes no mundo. Segundo dados da International Fertilizer Association (2018), o Brasil representa cerca de 8,3% do mercado global do consumo de nutrientes, sendo a primeira posição ocupada pela China (24%), seguida da Índia (14,6%) e dos Estados Unidos (10,3%).

Com relação ao consumo interno do mercado brasileiro, Carvalho (2009) aponta que o grande crescimento do mercado de fertilizantes está diretamente ligado ao crescimento da produção de culturas temporárias. Segundo dados da ANDA (2019), a soja é a cultura que mais consome

fertilizantes, representando 43,6% do consumo nacional em 2018. Outras culturas importantes são o milho (15,3%), a cana-de-açúcar (11,9%), algodão e café (4,8% cada). A Figura 7 apresenta a distribuição detalhada do consumo total de fertilizantes por cultura no Brasil.

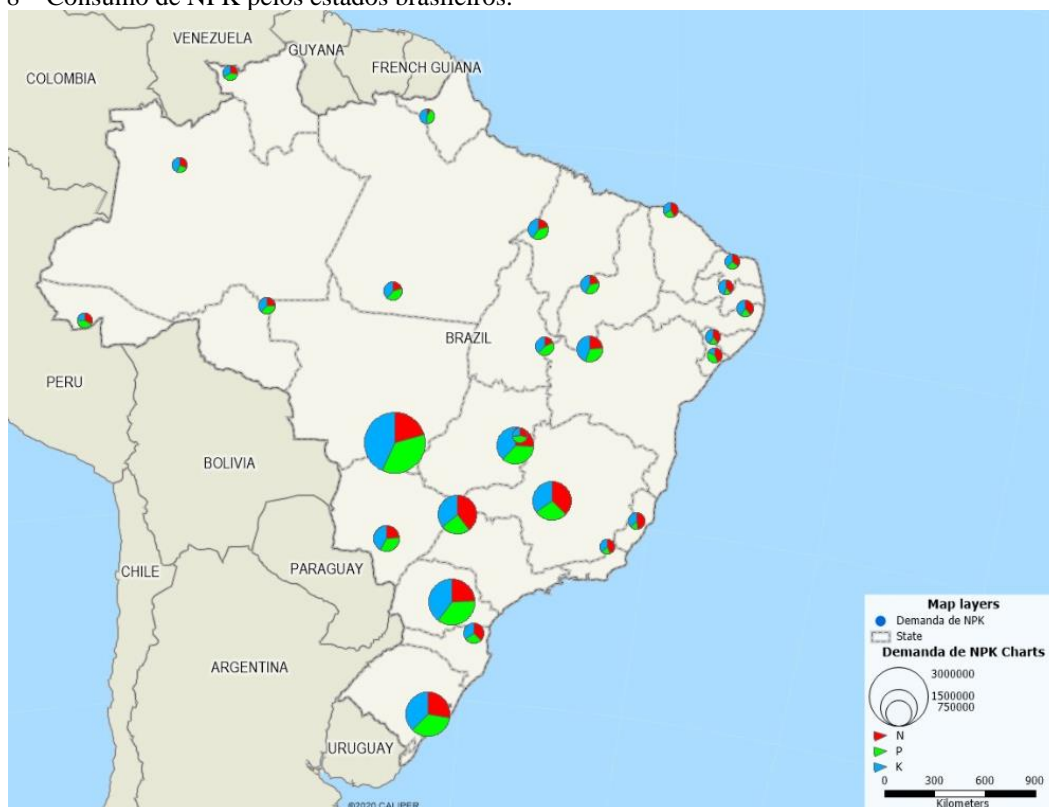
Figura 7 – Distribuição das entregas de fertilizantes por cultura no Brasil em 2018.



Fonte: ANDA (2019).

Dessa forma, as entregas de fertilizantes acabam se concentrando nas principais regiões em que há o cultivo desses produtos. Em 2018, cerca de 21,2% de todo fertilizante entregue no Brasil foi destinado ao estado do Mato Grosso, seguido de Paraná (13,4%), Rio Grande do Sul (11,9%), São Paulo (11,3%) e Minas Gerais (10,1%). Além disso, o perfil de produção de cada região também pode alterar a proporção do consumo por nutriente em NPK, conforme mostra a Figura 8.

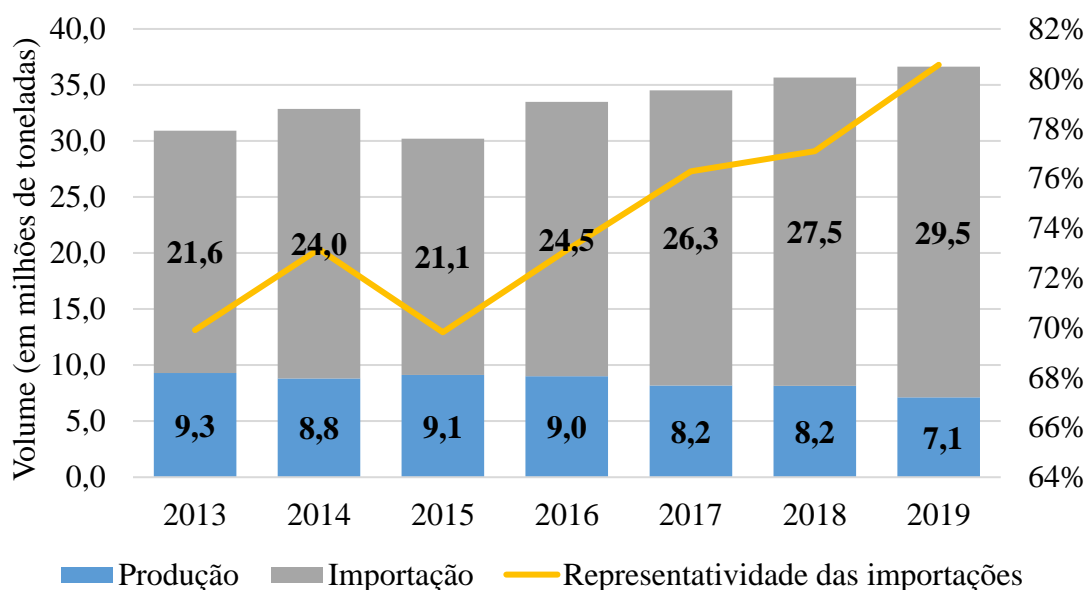
Figura 8 – Consumo de NPK pelos estados brasileiros.



Fonte: ANDA (2019).

Apesar da alta taxa de crescimento da demanda de fertilizantes no Brasil, a produção interna não cresceu nesse mesmo ritmo, resultando em uma diferença muito grande entre oferta e demanda desse insumo. Fato que gerou, ao longo dos anos, uma grande dependência brasileira nas exportações de fertilizantes. Segundo os volumes produzidos e importados acompanhados pela ANDA (2019), essa dependência externa aumentou ainda mais nos últimos anos, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Evolução da produção e importações de fertilizantes intermediários no Brasil.



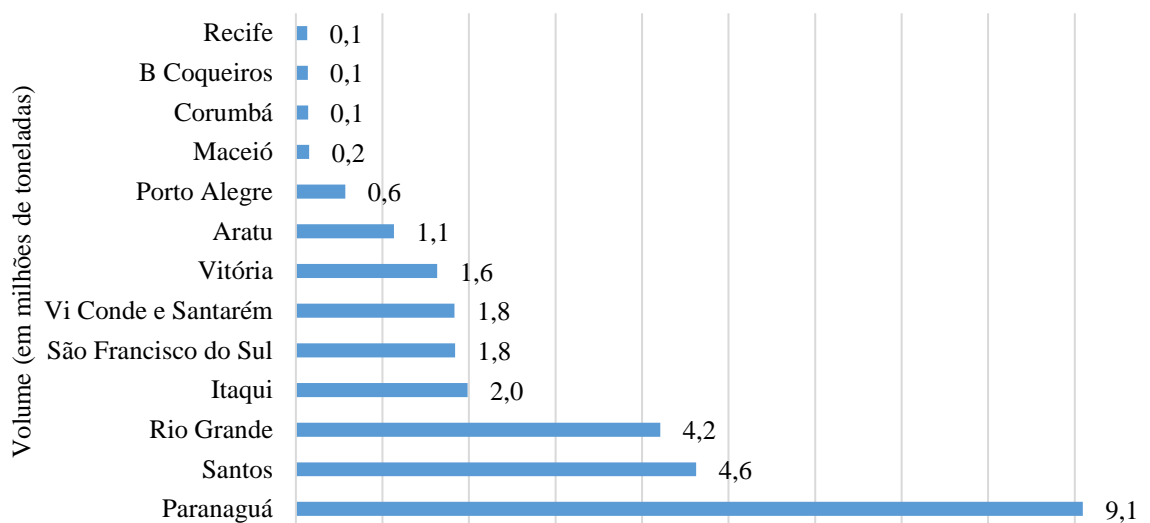
Fonte: ANDA (2019).

Segundo dados da ANDA (2019), a produção interna de fertilizantes intermediários foi de 7,1 milhões de toneladas em 2019, ante 9,3 milhões em 2013, o que representa uma queda de quase 24% na produção nacional. Essa queda recente foi resultado do fechamento de algumas fábricas importantes no Brasil, com destaque para a hibernação das fábricas de nitrogenados da Petrobras (Fafen-BA e Fafen-SE) e do encerramento das atividades da Araucária Nitroregênados S.A., também operada pela empresa. Ainda em 2019, a Mosaic suspendeu as operações nas minas de fosfato em Tapira-MG e Catalão-GO, contribuindo para a redução na produção nacional (GLOBAL FERT, 2019).

Já as importações de fertilizantes atingiram cerca de 29,5 milhões de toneladas em 2019, ante 21,6 milhões em 2013, representando um aumento de mais de 36% nesse período. Segundo dados do MDIC (2019), o principal fornecedor dos insumos para o Brasil é a Rússia, sendo que mais de 7 milhões de toneladas de fertilizantes vieram do país. O Canadá, com quase 3,5 milhões de toneladas, além da China, com mais de 3 milhões de toneladas, também são importantes parceiros comerciais para o abastecimento de fertilizantes.

Com relação aos portos importadores, Paranaguá é o principal destaque, responsável por cerca de 32% das importações do insumo, seguido de Rio Grande e Santos (16% cada). A Figura 10 mostra os volumes importados de fertilizantes em cada porto em 2018.

Figura 10 – Importação de fertilizantes por porto em 2018



Fonte: ANDA (2019).

Segundo relatório da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (2020), o consumo de fertilizantes do Brasil deve aumentar cerca de 45% até 2028. Esse crescimento deve ser impulsionado principalmente pelo aumento da produção de grãos, que deve passar de 250 milhões de toneladas em 2019 para 318 milhões em 2029. A expansão da produção acontecerá com maior intensidade nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, com destaque para o aumento de área plantada de soja e milho (MAPA, 2020).

Não há grandes projetos para a expansão da exploração mineral nacional a curto prazo; dessa forma, espera-se que os níveis de dependência das importações continuem bastante elevados. Portanto, esse avanço exigirá um esforço para maiores investimentos em infraestrutura, pesquisa e financiamento (MAPA, 2020).

2.1.3. Aspectos logísticos

O termo logística, segundo Caixeta-Filho e Pera (2018), envolve todo o planejamento espacial e temporal de ativos para que produtos e serviços cheguem no lugar certo, na hora certa, nas melhores condições e com o mais baixo custo possível. Portanto, o planejamento logístico está preocupado sempre com as restrições econômicas, de espaço e de tempo.

A gestão dos custos de produção agrícola é um dos principais fatores que impacta a competitividade dos produtores rurais no Brasil, sendo que os preços das principais *commodities*

são formados em grande parte no mercado internacional. A principal desvantagem da competitividade brasileira envolve os custos de fertilizantes, já que grande parte desses insumos precisam ser importados de outros países. Dados do IMEA (2022) apontam que os gastos com fertilizantes correspondem a 21% do custo total de produção de soja no estado do Mato Grosso.

Além dos altos custos com os fertilizantes, os produtores brasileiros também enfrentam dificuldades para obtenção de crédito, aumentando ainda mais os custos de financiamento de uma safra. Segundo USITC (2012), as grandes empresas comerciais criaram uma forma de troca com os agricultores com objetivo de contornar esses problemas, na qual elas fornecem fertilizantes aos produtores em troca da sua produção como pagamento após a colheita. Existem diversos modelos de trocas; porém, apesar de necessárias, resultam em altos custos administrativos e que somam ainda mais no custo final do produtor.

Segundo Simões, Caixeta-Filho e Palekar (2018), a alta dependência externa e os problemas logísticos são fatores chave que mantêm os altos custos de fertilizantes no Brasil. Tal estudo mostrou que apenas os custos de transporte acrescentaram 21,1% ao preço de ureia, 15,4% no preço do MAP e 22,2% no preço do KCL. Considerando os custos portuários, *demurrage* (multas pelo atraso no período entre a chegada e a saída do navio na operação portuária) e a taxa da marinha mercantil (AFRMM), esses percentuais chegam a 40,1, 29,3 e 42,2%, respectivamente, o que penaliza por demais os consumidores de fertilizantes.

Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte - CNT (2019), o Brasil possui hoje mais 1,7 milhão de quilômetros de rodovias, sendo 59% classificadas como regulares, ruins ou péssimas, além de apenas 14,2% do total serem pavimentadas. Sendo o modal rodoviário responsável por mais de 61% na matriz de transporte brasileira, as longas distâncias e as más condições das rodovias implicam alto custo de transporte para os principais fertilizantes.

Comparado a outros produtos, os modais ferroviário e hidroviário são muito pouco utilizados para o transporte de fertilizantes. Em 2019, as ferrovias brasileiras movimentaram cerca de 4,6 milhões de toneladas do insumo, enquanto as hidrovias apenas 0,6 milhões de toneladas, o que representa 12,7% e 1,7% do consumo interno de fertilizantes, respectivamente (ANTT, 2020; ANTAQ, 2020).

Com objetivo de reduzir os preços de transporte dos fertilizantes, os altos níveis de importação possibilitaram uma operação conhecida como “frete de retorno”. Segundo Caixeta-Filho e Pera

(2018), o frete de retorno consiste em uma operação na qual o veículo retorna com uma carga secundária compatível com o equipamento de transporte utilizado, ou seja, não há o retorno vazio ao local de carregamento.

O principal exemplo prático dessa operação está relacionado com as movimentações de grãos (soja e milho) para exportação aos principais portos brasileiros, onde o fluxo de fertilizantes representa o frete de retorno. Dessa forma, essa prática de mercado acaba por reduzir os preços de transporte de fertilizante, principalmente nos períodos de alto nível de exportação, quando há maior disponibilidade para o frete de retorno com fertilizante nas regiões portuárias (CAIXETA-FILHO e PERA, 2018).

O impacto do frete de retorno na redução do custo de transporte para fertilizantes é observado principalmente em rotas que conectam centros de mistura de fertilizantes, portos e áreas de produção de grãos. Segundo Lima et al. (2016), as rotas que ligam a região portuária de Santos à produção de grãos no Centro-Oeste constituem o principal corredor que apresenta benefícios econômicos para os fretes de fertilizantes. As regiões de mistura de fertilizantes (Uberaba, Catalão, entre outras) também apresentam uma menor taxa de frete em comparação a outras regiões.

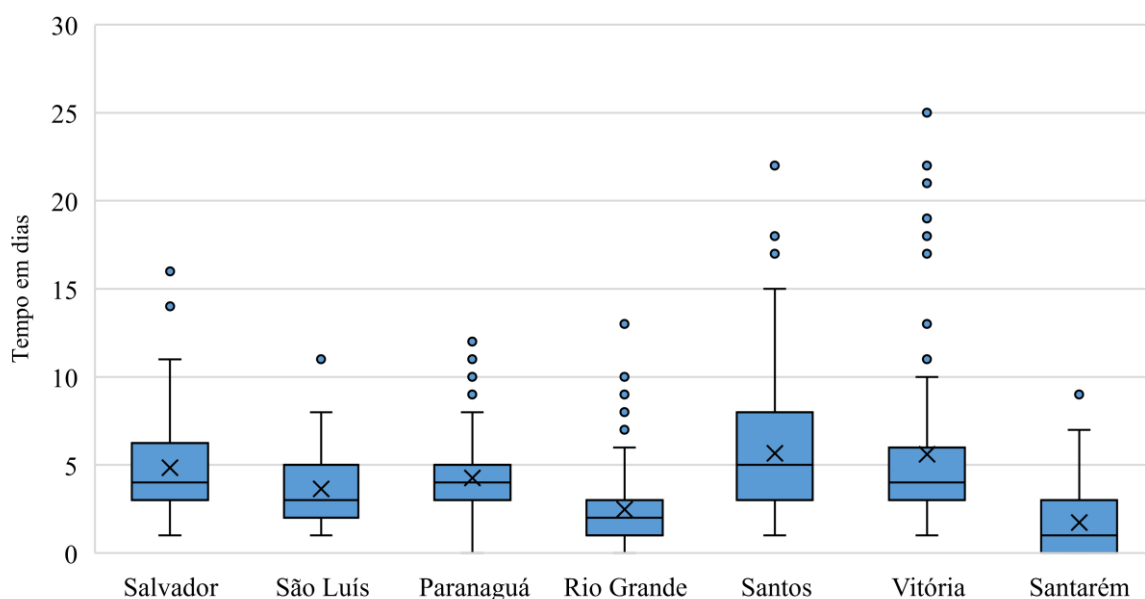
Portanto, analisar as possibilidades de frete de retorno é de extrema importância para o controle de custos de transporte de fertilizantes. Os grandes volumes de grãos exportados pelos portos do Sul, principalmente Santos e Paranaguá, direcionaram as operações de importação de fertilizantes por parte das *tradings*. Um estudo desenvolvido por Reis et al. (2020) constatou que os dois portos são responsáveis por interligar quase 60% da rede de transporte de fertilizantes, desde os países fornecedores até os consumidores.

A concentração das importações de fertilizantes também acaba constituindo gargalos nas operações logísticas, ocasionando em algumas épocas do ano congestionamentos e uso excessivo da capacidade portuária (REIS et al., 2020). Segundo Simões, Caixeta-Filho e Palekar (2018), esses problemas incorrem a cadeia logística custos extras relacionados as despesas portuárias.

Esses atrasos nas operações portuárias podem ser medidos pela permanência dos navios nos portos brasileiros, conforme mostra a Figura 11. Segundo dados da ANTAQ (2020), Santos é o porto que apresenta o maior tempo de permanência dos navios para descarregamento de

fertilizantes, sendo que alguns navios levam até quase um mês para completar a operação de descarregamento da carga. Vitória, Paranaguá e Rio Grande também apresentam alguns problemas sazonais nas operações portuárias; já os portos de São Luís e Santarém se mostram menos congestionados e mais ágeis para as operações com fertilizantes.

Figura 11 – Comparativo do tempo de permanência dos navios de fertilizantes nos principais porto



Fonte: ANTAQ (2020).

Dessa forma, a expansão dos investimentos em infraestrutura portuária para fertilizantes no Arco Norte, portos que englobam as regiões Norte e Nordeste, é de extrema necessidade para a redução dos gargalos logísticos que afetam os portos do Sul. Portos como Belém, Santarém, Manaus e Itaituba são tidos como os principais pontos de importação que trariam mais competitividade para agricultores e misturadores, proporcionando benefícios econômicos altos (SIMÕES; CAIXETA-FILHO; PALEKAR, 2018).

2.1.4. Aspectos tributários

Segundo Marconato (2012), o setor de fertilizantes é isento de IPI (Imposto sobre Produto Industrializado) e, desde 2004, as alíquotas de PIS/COFINS estão zeradas. Dessa forma, o custo tributário mais representativo na cadeia logística é o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS), sendo o Senado Federal responsável pela definição das alíquotas mínimas estaduais e interestaduais.

O ICMS foi instituído no Brasil no ano de 1989, através da criação da lei nº 17.293. Segundo Brasil (1989), o ICMS incide principalmente nas operações relativas à venda e à circulação de mercadorias, bem como na prestação de serviços de transporte interestadual e intermunicipal. Além disso, também foi definido como um imposto de competência estadual, sendo os estados responsáveis por determinar as alíquotas de tributação.

Em 1996, tal lei foi complementada pela lei complementar nº 87 (Lei Kandir), cujo objetivo foi o de atualizar e incluir algumas operações relativas à circulação de mercadorias e sobre a prestação de serviços de transporte. Segundo Brasil (1996), um dos principais objetivos dessa lei foi o de estimular os setores produtivos voltados à exportação, desonerando a cobrança do ICMS dos serviços de exportação e favorecendo assim o saldo da balança comercial brasileira. Além disso, também foi disposta a alíquota de ICMS para as operações de importação, fixada em 4%.

Dessa forma, a alíquota para o cálculo do ICMS é obtida através da combinação origem-destino de uma operação sujeita à tributação. A Figura 12 mostra uma síntese das alíquotas de ICMS conforme a combinação origem-destino e deliberação de cada estado. Com a alíquota definida, o cálculo deve ser realizado com base no valor do produto/serviço expresso na nota fiscal, como pode ser observado no exemplo trazido por Silva (2007) na Figura 13.

Figura 12 – Resumo das alíquotas de ICMS

ORIGEM	DESTINO																											
	AC	AL	AM	AP	BA	CE	DF	ES	GO	MA	MT	MS	MG	PA	PB	PR	PE	PI	RN	RS	RJ	RO	RR	SC	SP	SE	TO	IM
AC	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
AL	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
AM	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
AP	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
BA	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
CE	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
DF	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
ES	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
GO	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
MA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
MT	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
MS	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
MG	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	18	7	7	12	7	7	7	12	12	7	7	12	12	7	7	4
PA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
PB	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
PR	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	18	7	7	7	12	12	7	7	12	12	7	7	4	
PE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
PI	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4
RN	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	4
RS	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7	7	12	7	7	7	18	12	7	7	12	12	7	7	4
RJ	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7	7	12	7	7	7	12	20	7	7	12	12	7	7	4
RO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17,5	12	12	12	12	12	4
RR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	4
SC	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7	7	12	7	7	7	12	12	7	7	17	12	7	7	4
SP	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7	7	12	7	7	7	12	12	7	7	12	18	7	7	4
SE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12	4	
TO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	4	
IM	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Fonte: Inforsystem Tecnologia (2020).

Figura 13 – Exemplo da fórmula para cálculo do ICMS

Cálculo do valor do imposto:

$$\text{ICMS} = \frac{\text{Valor do produto}}{(1-\text{Alíquota})} - \text{Valor do produto} = \frac{10}{(1-0,12)} - 10 = 11,36 - 10 = 1,36$$

Fonte: Silva (2007)

Segundo Silva (2007), outra característica importante do ICMS é a não-cumulatividade, ou seja, existe uma estrutura de débitos e créditos que permite que o pagamento seja realizado apenas sobre o valor agregado das mercadorias, sendo o consumidor final responsável pelo pagamento do imposto no momento da aquisição.

As Secretarias de Fazenda dos Estados ficam responsáveis pela legislação sobre o ICMS, sendo o Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) responsável por agregar todos os benefícios e incentivos fiscais, que podem se alterar de acordo com o produto/serviço. Dessa forma, os estados promovem benefícios no crédito de ICMS com o objetivo de atrair empresas e aumentar o desenvolvimento interno, exercendo grande impacto nas decisões de localização e planejamento logístico (SILVA, 2007).

O CONFAZ (2020), através do Convênio ICMS 100/97, determinou a redução de 60% ou 30% da base de cálculo do ICMS interestadual (Figura 12) para os principais tipos de fertilizantes utilizados no Brasil, conforme detalhado a seguir:

- Redução de 60%: ácido nítrico e ácido sulfúrico, ácido fosfórico, fosfato natural bruto e enxofre
- Redução de 30%: amônia, uréia, sulfato de amônio, nitrato de amônio, nitrocálcio, MAP (mono-amônio fosfato), DAP (di-amônio fosfato), cloreto de potássio, adubos simples e compostos, fertilizantes e DL Metionina e seus análogos

Além disso, o Convênio também autorizou a concessão de isenção ou redução da base de cálculo nas operações internas dos estados. Dessa forma, alguns estados optam por isentar as operações internas e outros pelo diferimento do pagamento do imposto mediante regras específicas, conforme mostra a Tabela 1 (SILVA, 2007).

Por regra da Organização Mundial do Comércio (OMC), os produtos importados não podem ser tributados por ICMS nos estados se também não houver tributação no produto nacional. Dessa forma, Silva (2007) afirma que as regras apresentadas na Tabela 1 também devem ser aplicadas para as operações de importações de fertilizantes, podendo haver isenção ou diferimento das alíquotas dependendo das condições de cada estado.

Tabela 1 – Tratamento tributário do ICMS interno pelos estados

UF	Tratamento Tributário	Condição para manter o tratamento tributário
RS	Diferimento	Entrada pelo Estado do RS Utilização como insumo no Estado
SC	Diferimento	Entrada pelo Estado do SC
PR	Diferimento	Entrada pelo Estado do PR
SP	Isenção	Entrada pelo Estado do SP
MG	Diferimento	Utilização como insumo no Estado
RJ	Isenção	Utilização como insumo no Estado
ES	Diferimento	Entrada pelo Estado do RS Utilização como insumo no Estado
MS	Isenção	Finalidade: Fertilizante
MT	Diferimento	Finalidade: Fertilizante
GO	Isenção	Finalidade: Fertilizante
DF	Isenção	Finalidade: Fertilizante
BA	Diferimento	Entrada pelo Estado do BA Utilização como insumo no Estado
SE	Diferimento	Entrada pelo Estado do RS Utilização como insumo no Estado
AL	Isenção	Utilização como insumo no Estado
CE	Isenção	Utilização como insumo no Estado
PE	Diferimento	Entrada pelo Estado do PE
PB	Isenção	Utilização como insumo no Estado
RN	Isenção	Utilização como insumo no Estado
PI	Isenção	Utilização como insumo no Estado
TO	Diferimento	Utilização como insumo no Estado
MA	Diferimento	Entrada pelo Estado do MA
PA	Diferimento	Depende de autorização do Estado
RR	Isenção	Utilização como insumo no Estado
AM	Diferimento	Utilização como insumo no Estado
AC	Isenção	Utilização como insumo no Estado
RO	Diferimento	Utilização como insumo no Estado
AP	Sem informação	Sem informação

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2. Problemas de localização e modelagem matemática

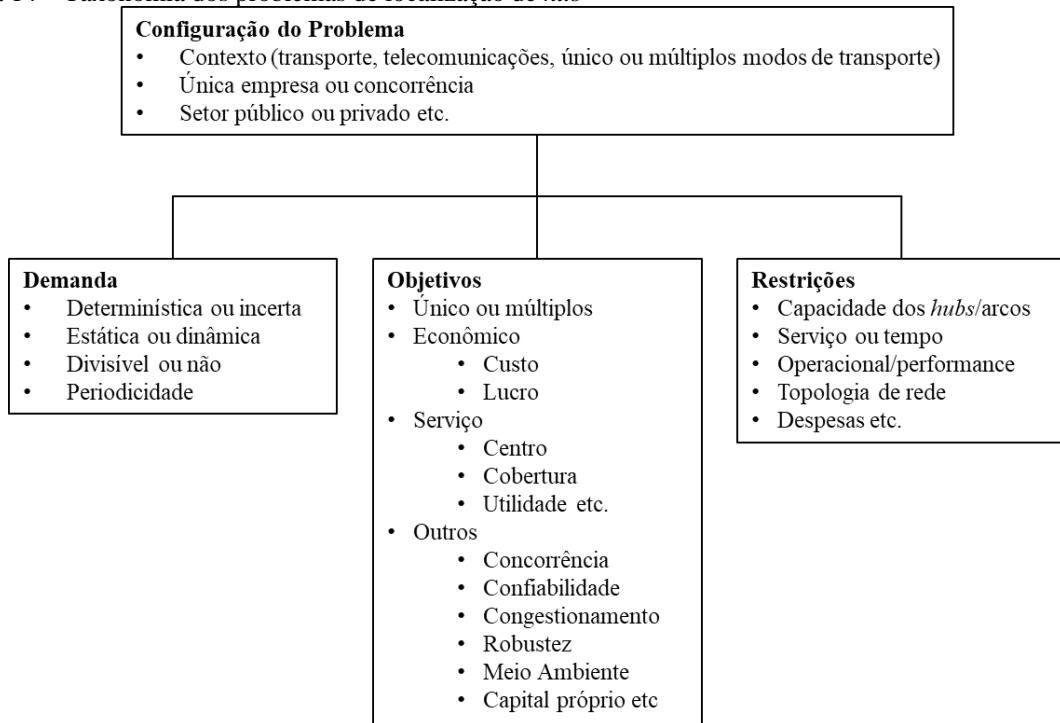
Para Ballou (2006), localizar instalações ao longo da cadeia de suprimentos é um problema muito comum e importante no ambiente empresarial. A decisão dessas instalações pode envolver o número de locais e suas proporções, bem como estão associadas a qualquer ponto de um sistema logístico, como fábricas, armazéns, portos, pontos de varejo, entre outros. Esses tipos de problemas podem ser tratados por uma grande gama de métodos que já vêm sendo foco

de pesquisas.

Daskin (2008) também ressalta que os problemas de localização são um tema fértil para pesquisadores, principalmente para os interessados em modelagem matemática. O desenvolvimento de algoritmos nessa área já ocorreu em casos como a localização de serviços médicos de emergência, escolas, hospitais, armazéns, roteamento de veículos, entre outros. Para a resolução desses tipos de problemas existe uma série de métodos, com destaque para os modelos exatos (otimização), cujo principal objetivo é avaliar todas as alternativas e fornecer o melhor resultado com base nas condições definidas no modelo matemático.

Uma grande extensão dos modelos clássicos de localização que apareceram recentemente na literatura é o *Hub Location Problem* (HLP). Os chamados *Hubs* são compreendidos como instalações responsáveis pela consolidação, conexão e comutação para fluxos entre origens e destinos (FARAHANI et al., 2013). Segundo Alumur et al. (2020), esses problemas foram originalmente motivados por aplicativos de redes aéreas, entrega de carga e telecomunicações.

Com o avanço e exploração dos conceitos dessa problemática, uma série de modelos matemáticos foram sendo desenvolvidos para a localização de *hub*, podendo ser aplicados em uma vasta gama de problemas reais. Para sumarizar os principais modelos, Alumur et al. (2020) propõem uma taxonomia para identificação dos tipos de problemas (Figura 14), que podem variar em torno da configuração do problema, da natureza da demanda, dos objetivos e das restrições do problema.

Figura 14 – Taxonomia dos problemas de localização de *hub*

Fonte: ALUMUR et al. (2020)

Apesar do principal objetivo ser a localização de instalações, os HLPs também incluem decisões do projeto de rede, ou seja, são utilizados para problemas cujo objetivo é determinar o roteamento de fluxos através da rede baseado em custo ou nível de serviço. Nessa linha, os modelos de localização de *hub* incluem nós de origem, de destino e de *hub*, sendo o conhecimento da topologia da rede uma decisão chave para a modelagem do problema real que se deseja resolver (ALUMUR et al., 2020).

Os problemas de localização de *hub* são uma importante área de pesquisa pois uma solução para esses problemas permite uma diminuição no número de ligações de transporte entre nós de origem e destino. Além disso, reduz os custos gerais de transporte, consolidando fluxos de tráfego de várias origens e transferindo para *hubs* com vários destinos (MAHMOODJANLOO et al., 2020).

Segundo Shang et al. (2021), os problemas de localização de *hub* aparecem no centro do planejamento estratégico para muitos sistemas de entregas de carga, bem como incluem o transporte e distribuição multimodal na modelagem dos problemas. Apesar da minimização do custo ser o principal objetivo, alguns mercados competitivos exigem que seja considerado o fator nível de serviço, cujo objetivo muitas vezes é garantir e diminuir o tempo de entrega das mercadorias.

Grande parte desses problemas de localização, principalmente os de múltiplas escolhas, são resolvidos através da programação inteira mista (MIP), o que permite a escolha dos melhores pontos de localização através de uma variável binária (HE-LAMBERT et al., 2019; MAHMOODJANLOO et al., 2020; ALUMUR et al., 2020).

Nesse sentido, Rocha e Caixeta Filho (2018) realizaram um estudo de localização para terminais intermodais para cargas agrícolas com destino a exportação via Ferrogrão. O modelo matemático utilizado nesse trabalho possui uma lógica semelhante ao problema estudado, tendo servido de base para a construção desse trabalho. Dentre os resultados, é possível avaliar a melhor opção para localização com base na minimização dos custos logísticos.

A formulação matemática do problema será construída com base no trabalho desenvolvido por Carvalho (2009), que realizou um estudo de fábricas misturadoras de fertilizantes na região Centro-Oeste do Brasil. O conjunto das restrições do modelo conterà principalmente: oferta das fábricas, oferta dos portos importadores, demanda de fertilizantes, capacidades ferroviárias, equações de mistura de fertilizantes, entre outras. Para isso, o estudo desenvolvido por Alencar (2017) será utilizado como base para a construção do modelo e conjunto de restrições.

Ressaltando a classificação dos problemas de localização apresentados na Figura 14, o problema estudado nesse trabalho possui as seguintes principais características:

- Configuração do problema: Problema de transporte e várias localizações;
- Demanda: Determinística, estática e não divisível;
- Objetivos: Objetivo único (custos logísticos);
- Restrições: Capacidades dos *hubs* e arcos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

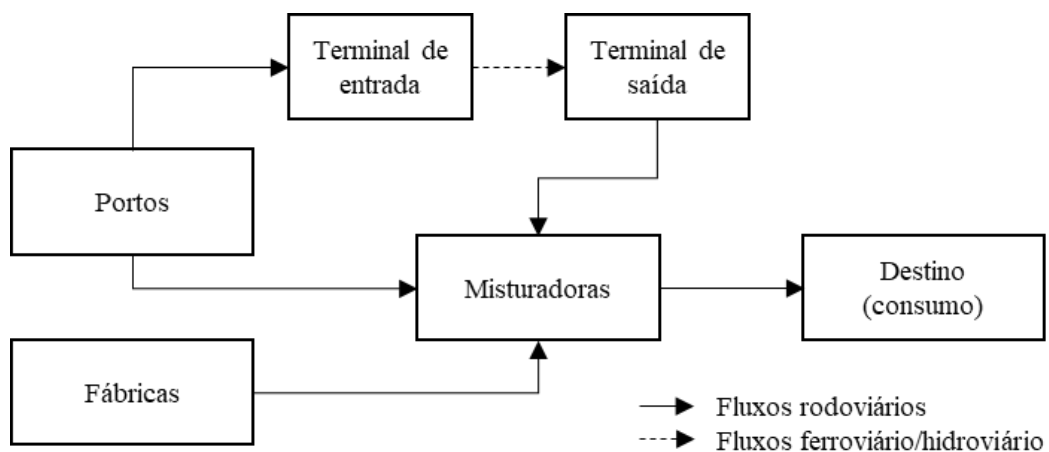
O objetivo desse capítulo será o de apresentar o método utilizado para a obtenção do resultado, desde a estruturação da modelagem matemática utilizada, os parâmetros e premissas consideradas, a organização e as fontes de dados adotadas, até a definição e análise de diferentes cenários para a cadeia produtiva de fertilizantes.

3.1. Rede de transporte e premissas consideradas

O primeiro passo deste trabalho foi definir a rede de transporte a ser utilizada na modelagem matemática da logística de fertilizantes. Tendo o elo da misturadora como um dos pontos importantes do trabalho, a logística de fertilizantes pode ser dividida em dois grupos de fluxos, sendo eles: i) fluxos *inbound*: referentes ao abastecimento das misturadoras e, ii) fluxos *outbound*: referentes à entrega do produto final ao consumidor.

De forma geral, os fertilizantes podem chegar às misturadoras de três modos: i) através do modal rodoviário com origem no porto; ii) através de um sistema multimodal com origem no porto e, iii) através do modal rodoviário com origem nas fábricas nacionais. Esse esquema da cadeia logística de fertilizantes pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Rede logística considerada para este trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

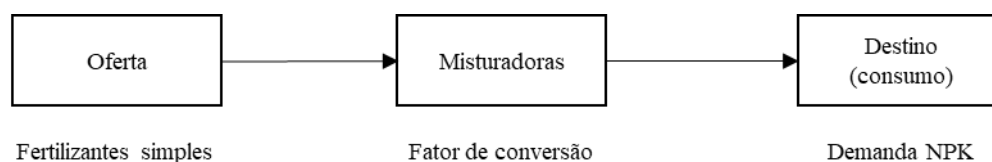
Ainda com relação à rede de transporte, uma premissa importante considerada foi a obrigatoriedade da passagem pela misturadora antes da chegada no destino final. Apesar desses fluxos existirem na prática, a falta de dados oficiais sobre esse elo da cadeia e a necessidade de estimar as capacidades instaladas foram os motivos para tal característica adotada. Diante disso,

cabe destacar também a opção pela utilização da programação inteira mista, onde o próprio modelo irá indicar os locais ótimos para as misturadoras.

É importante destacar também que não foram considerados os fluxos das matérias-primas básicas, que estão presentes principalmente no abastecimento das indústrias nacionais (que inclusive podem ser realizados pelo modo ferroviário de transporte). Portanto, a rede logística proposta para a modelagem considera a logística de abastecimento e distribuição apenas dos fertilizantes simples. Para esses tipos de produtos, não há atualmente utilização da malha ferroviária para abastecer as misturadoras através das fábricas nacionais.

Outra premissa importante diz a respeito à complexidade da cadeia produtiva de fertilizantes, que passa por uma série de transformações ao longo da cadeia logística. Isso faz com que os dados de oferta (produção e importação) e demanda não sejam compatíveis. Diante disso, para um cálculo mais preciso das quantidades transportadas de fertilizantes, os dados de demanda serão tratados em NPK. Portanto, para equalizar os dados de oferta e demanda, foi proposto no modelo um fator de conversão (FC), que basicamente converte cada tipo de fertilizantes em concentração dos três principais nutrientes presentes (Figura 16).

Figura 16 – Proposta para a equalização dos dados de oferta e demanda de fertilizantes.



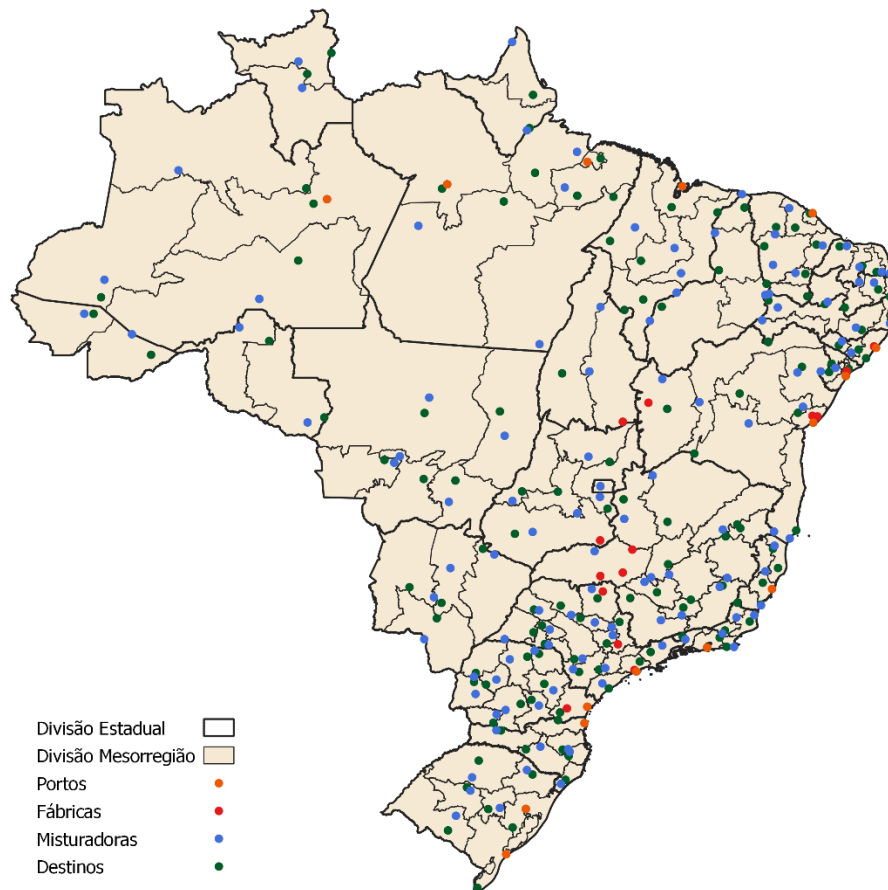
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à estruturação dos dados, destaca-se que este trabalho possui uma abrangência nacional, sendo considerado a divisão do país em 137 mesorregiões apresentadas pelo IBGE (2018). Para facilitar o cálculo dos custos de transporte entre os nós da rede de transporte, foram definidos municípios centroides representantes de cada mesorregião. Para portos e fábricas, foram considerados os próprios municípios de localização, a partir dos dados do MDIC (2018) e ABISOLO (2018), respectivamente. Os terminais de entrada e saída para o transporte ferroviário foram obtidos através da ANTT (2020), enquanto para o modal hidroviário foram utilizados os dados da ANTAQ (2020).

Já os centroides das misturadoras e dos destinos finais foram definidos a partir do volume de

produção agrícola de lavouras temporárias da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) divulgada pelo IBGE (2018). Dessa forma, o maior município produtor de uma mesorregião foi considerado como centroide de destino (consumo), enquanto o segundo maior produtor como centroide da misturadora, como mostra o Apêndice A. Vale destacar que nos casos das mesorregiões que possuem portos importadores de fertilizantes, o município de localização do porto foi utilizado como centroide da misturadora para deixar o modelo mais aderente à realidade. Na Figura 17 é possível observar a divisão do Brasil por mesorregiões, bem como os centroides utilizados para cada nó da rede logística

Figura 17 – Municípios considerados como centroide de demanda, mistura e origens de fertilizantes.



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma última premissa importante diz respeito ao cálculo dos custos logísticos. Como explorado na revisão de literatura, os impostos, especificamente o ICMS, será incorporado na modelagem matemática como um custo logístico. Por ser imposto estadual, cada unidade da federação adota uma regra distinta para a cobrança, principalmente no imposto para a importação. Uma característica importante é a exigência da industrialização no próprio estado para que o produto não seja tributado no momento da importação. Dessa forma, foi necessário considerar como

parâmetro do modelo matemático todas as combinações possíveis, passando pela origem, misturadora e destino final.

Por fim, é importante ressaltar que o ano de 2018 foi utilizado como referência para todos os parâmetros utilizados no modelo matemático. Tal ano foi escolhido em função da disponibilidade de informações, sendo que houve dificuldade em se obter dados mais recentes para alguns parâmetros. Além disso, as mudanças econômicas causadas pela pandemia do COVID-19 provocaram grandes alterações no padrão histórico de dados, o que poderia levar a distorções nos resultados, ao se comparar com o cenário real.

3.2. Modelo matemático proposto

A partir das premissas discutidas no tópico anterior, foi escolhido um modelo de programação inteira mista, cujo objetivo foi o de minimizar os custos logísticos totais da cadeia de transporte de fertilizantes. Tendo em vista os objetivos deste trabalho, optou-se por um modelo matemático monopériodo, onde foi possível analisar os resultados de forma mais estratégica, não considerando restrições e limites de natureza operacional.

Para isso, a seguir estão descritos os detalhes das informações contidas no modelo matemático que será utilizado, sendo definidos os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão.

São conjuntos:

O: Oferta de fertilizantes (portos)

F: Oferta de fertilizantes (fábricas)

M: Misturadoras (centroides)

D: Demanda de fertilizantes (centroides)

P: Tipo de fertilizante

I: Ingrediente (N, P, K)

E: Terminal de transbordo de entrada

S: Terminal de transbordo de saída

São parâmetros:

CR_{OMD} : Custos totais rodoviários do porto O, misturado em M e distribuído para D

CR_{FMD} : Custos totais rodoviários da fábrica M misturado em M e distribuído para D

CM_{OESMD} : Custos totais intermodais saindo do porto O, passando pelos terminais E e S, misturado em M e distribuído em D

A_{OP} : Volume importado no porto O para cada tipo de fertilizantes P

B_{FP} : Capacidade de produção da fábrica F para cada tipo de fertilizante P

C_E : Capacidade do terminal de entrada E

D_{DI} : Demanda de fertilizantes no consumidor D para cada ingrediente I

FC_{PI} : Fator de conversão de fertilizantes do tipo de fertilizante P para o ingrediente I

MIN : Volume mínimo para abrir uma unidade misturadora

São variáveis de decisão:

VR_{OMDP} : Volume rodoviário transportado do porto O, misturado em M e distribuído para D

VRM_{FMDP} : Volume rodoviário transportado da fábrica F, misturado em M e distribuído para D

VM_{OESMDP} : Volume multimodal transportado saindo do porto O, passando pelos terminais E e S, misturado em M e distribuído em D

C : Custo fixo atrelado a abertura de uma misturadora

BM_M : $\begin{cases} 1, & \text{se a misturadora M deve ser aberta} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

A função objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z = & \sum_{O=1}^{17} \sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VR_{OMDP} \times CR_{OMD} + \sum_{F=1}^{17} \sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VRM_{FMDP} \times CR_{FMD} \\ & + \sum_{O=1}^{17} \sum_{E=1}^9 \sum_{S=1}^9 \sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VM_{OESMDP} \times CM_{OESMD} + C \times \sum_{M=1}^{137} BM_M \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} VR_{OMDP} + \sum_{E=1}^9 \sum_{S=1}^9 \sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} VM_{OESMDP} = A_{OP} \quad \forall O, P \quad (2)$$

$$\sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} VRM_{FM DP} \leq B_{FP} \quad \forall M, P \quad (3)$$

$$\sum_{O=1}^{17} \sum_{S=1}^9 \sum_{D=1}^{137} \sum_{M=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VM_{OESMD} \leq C_E \quad \forall E \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{O=1}^{17} \sum_{M=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VR_{OM DP} \times FC_{PI} + \sum_{F=1}^{17} \sum_{M=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VRM_{FM DP} \times FC_{PI} \\ + \sum_{O=1}^{17} \sum_{E=1}^9 \sum_{S=1}^9 \sum_{M=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VM_{OESMDP} \times FC_{PI} = D_{DI} \quad \forall D, I \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{O=1}^{17} \sum_{D=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VR_{OM DP} + \sum_{F=1}^{17} \sum_{D=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VRM_{FM DP} + \sum_{O=1}^{17} \sum_{E=1}^9 \sum_{S=1}^9 \sum_{D=1}^{137} \sum_{P=1}^{13} VM_{OESMDP} \\ \geq MIN \times BM_M \quad \forall M \end{aligned} \quad (6)$$

Com relação às expressões apresentadas anteriormente, a expressão (1) se refere à função objetivo, que implica a multiplicação dos volumes movimentados em cada rota e o custo total considerado nesse fluxo, seja ele rodoviário ou intermodal, conforme descrito nas variáveis de decisão. As expressões (2) e (3) representam as restrições de oferta de fertilizantes, tanto no porto quanto nas fábricas, garantindo que todo volume importado seja movimentado. A expressão (4) se refere à capacidade de movimentação intermodal, garantindo que um fluxo desse tipo não ultrapasse esse limite. A expressão (5) representa a restrição de demanda de fertilizantes, garantindo que a mesma seja atendida. Por fim, a expressão (6) representa a capacidade mínima para que uma misturadora seja aberta.

O modelo matemático em questão foi processado no software *General Algebraic Modeling System - GAMS* (GAMS, 2020), através do solver CPLEX. Além disso, o processamento se deu

um ambiente computacional comum, sendo utilizado um notebook com processador *Inter Core* 5 com 8 GB de memória RAM. Para cada cenário analisado houve um tempo de processamento distinto, que variou entre 2 e 10 horas. O *script* utilizado está detalhado no Apêndice B.

3.3. Parâmetros e fontes de dados considerados

Para a definição dos fertilizantes simples considerados foi utilizada a classificação Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM), que considera 37 tipos de adubos e fertilizantes distintos. A partir dos dados de importação obtidos pelo MDIC (2018), os fertilizantes foram agrupados em 13 tipos com base na sua concentração de NPK (IAC, 2011). Na Tabela 2 é possível observar a lista dos fertilizantes que serão considerados, bem como a concentração de cada nutriente (fator de conversão).

Tabela 2 – Fertilizantes considerados e concentração por nutriente.

Nutriente/Fertilizante	ID	N	P	K
Cloreto de potássio	1	0%	0%	60%
DAP	2	18%	45%	0%
Fórmulas NPK	3	16%	15%	15%
MAP	4	10%	52%	0%
Nitrato de amônio	5	33%	0%	0%
Nitrocalcio	6	20%	0%	0%
Outros	7	13%	5%	11%
Outros fertilizantes com N e P	8	9%	3%	1%
Outros nitrogenados	9	13%	4%	4%
Sulfato de amônio	10	20%	0%	0%
Superfosfato Simples	11	0%	18%	0%
Superfosfato Triplo	12	0%	44%	0%
Ureia	13	45%	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em MDIC (2018) e IAC (2011).

Os dados de importação de fertilizantes foram obtidos através do MDIC (2018), como já mencionado anteriormente. Os dados referentes ao ano de 2018 apontaram para 17 portos importadores de fertilizantes, totalizando pouco mais de 29,3 milhões de toneladas, que foram agrupadas entre os 13 tipos de fertilizantes já apresentados. A Tabela 3 mostra o volume de importação de fertilizantes para cada porto no ano de 2018. É importante ressaltar que para a modelagem matemática foi considerado esse mesmo volume de importação para cada produto, que está descrito no Apêndice C.

Tabela 3 – Volume de importação de fertilizantes por porto em 2018

Porto/Fertilizante	Volume (em t)
Aracaju (SE)	164.724
Barcarena (PA)	183.738
Belém (PA)	758.660
Maceió (AL)	163.035
Manaus (AM)	354.657
Natal (RN)	222
Paranaguá (PR)	9.708.092
Porto Alegre (RS)	613.558
Recife (PE)	155.344
Rio de Janeiro (RJ)	82.206
Rio Grande (RS)	4.738.602
Salvador (BA)	1.215.129
Santana (AP)	-
Santarém (PA)	476.843
Santos (SP)	4.650.766
São Francisco do Sul (SC)	2.194.270
São Luís (MA)	2.038.745
Vitória (ES)	1.835.419

Fonte: Elaborado com base nos dados do MDIC (2018)

Para os pontos de origem de fertilizantes nas fábricas, a fonte de dados utilizada foi o anuário da ABISOLO (2018), que realiza o levantamento das indústrias nacionais de fertilizantes por nutriente. A partir desses dados, as informações foram agregadas conforme o município de localização de cada fábrica, adotando então a soma total da capacidade produtiva para cada tipo de fertilizantes considerado, conforme detalhado no Apêndice D. A Tabela 4 apresenta as capacidades totais de produção de fertilizantes por município.

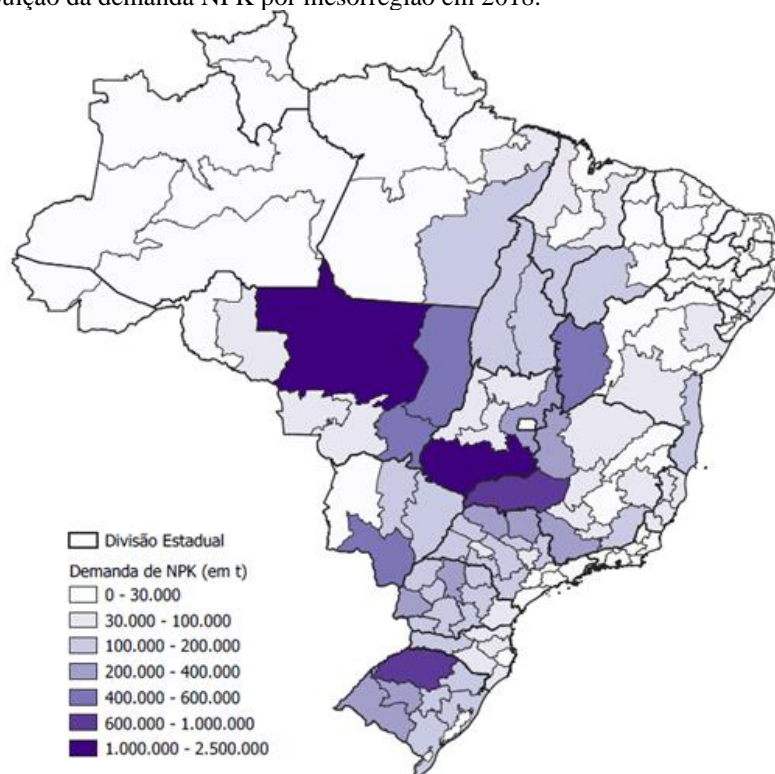
Tabela 4 – Capacidade de produção das fábricas nacionais de fertilizantes por município.

Fábrica/Produto	Capacidade de produção (em t)
Araucária (PR)	721.000
Araxá (MG)	1.446.000
Arraias (TO)	500.000
Camaçari (BA)	300.000
Candeias (BA)	420.000
Catalão (GO)	1.260.000
Cubatão (SP)	4.369.351
Guará (SP)	763.000
Luís Eduardo Magalhães (BA)	450.000
Paranaguá (PR)	1.220.000
Patos de Minas (MG)	250.000
Paulínia (SP)	700.000
Rio Grande (RS)	1.500.000
Rosário do Catete (SE)	500.000
Santa Luzia do Norte (AL)	120.000
Uberaba (MG)	3.075.448

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da ABISOLO (2018).

A demanda de fertilizantes dos centros consumidores também foi calculada com base nos dados da ANDA (2018) e IBGE (2018). Especificamente, foi utilizado o índice de entrega de fertilizantes em NPK por estado, sendo a área plantada das principais culturas em cada microrregião a *proxy* utilizada para o cálculo da demanda regionalizada. Na Figura 18 é possível observar graficamente a distribuição de demanda de fertilizantes no Brasil por microrregiões. No Apêndice E mostra de forma detalhada os números de demanda NPK calculada para cada mesorregião.

Figura 18 – Distribuição da demanda NPK por mesorregião em 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANDA (2018) e IBGE (2018).

Os volumes transportados nas infraestruturas intermodais foram obtidos através das estatísticas da ANTT (2020), para o modo ferroviário; e da ANTAQ (2020), para o modo hidroviário. Em ambos os modos foram considerados os volumes movimentados em cada terminal referentes ao ano de 2018. A Tabela 5 mostra um resumo dessas infraestruturas consideradas, bem como os volumes transportados de fertilizantes para o ano de 2018.

Tabela 5 – Volumes movimentados de fertilizantes pelos modos ferroviário e hidroviário em 2018.

Modalidade de transporte	Terminal de entrada	Terminal de saída	Volume (t)
Ferrovária	Vitória (ES)	Araguari (MG)	936.000
Ferrovária	Santos (SP)	Rondonópolis (MT)	1.500.000
Ferrovária	Rio Grande (RS)	Cruz Alta (RS)	250.000
Hidroviária	Santarém (PA)	Itaituba (PA)	300.000
Ferrovária	Paranaguá (PR)	Maringá (PR)	1.000.000
Ferrovária	São Francisco do Sul (SC)	Maringá (PR)	250.000
Hidroviária	Itacoatiara (AM)	Porto Velho (RO)	500.000

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANTAQ (2018) e ANTT (2018).

Com relação aos custos logísticos totais adotados, representados no modelo matemático por CR, CRF e CM, esses podem ser detalhados a partir da seguinte fórmula:

$$CT = CP + CI + CO + I \quad (7)$$

Onde:

CT: Custo total associado ao fluxo de transporte

CP: Custo portuário

CI: Custo *inbound* (fluxo de abastecimento da misturadora)

CO: Custo *outbound* (fluxo de distribuição para o consumo)

I: Impostos

É importante considerar que o custo portuário é igual a zero para os fluxos com origens nas fábricas. Os custos *inbound* podem significar um único frete rodoviário até a misturadora ou na soma de dois fretes rodoviários e do frete intermodal, no caso dos fluxos ferroviários ou hidroviários. Já o custo *outbound* significa um único frete rodoviário entre os pontos de misturadora e destino final.

Para os custos portuários foi aplicado um questionário a cinco empresas importadoras de fertilizantes no Brasil, com o objetivo de entender o que significam esses custos e as diferenças entre os portos. Nesse sentido, nos custos portuários adotados estão inclusos: a) Capatazia (retirada do fertilizante do navio e movimentação interna no porto até um armazém); b) Armazenagem; c) AFRMM (Taxa da marinha mercantil e impostos); d) *Demurrage* (multa cobrada pelo atraso no descarregamento de um navio). Dessa forma, foi adotado para cada porto o valor médio coletado com cada agente do setor.

Para a obtenção dos valores de fretes rodoviários foi utilizado o Sistema de Informação de Fretes (SIFRECA, 2019). A partir dessas informações foi construído um banco de dados com as médias anuais de todas as rotas de fertilizantes existentes no ano de 2018, totalizando 2.451 informações com origem, destino, distância e valor de frete. Dessa forma, foram construídos dois modelos de regressão simples para a estimativa dos valores de fretes entre os pontos considerados no modelo matemático. Como apresentado por Rocha e Caixeta-Filho (2018), os valores de fretes possuem uma relação bastante forte com a distância, além de apresentar comportamentos logarítmico ou linear, dependendo da faixa de distância de uma rota. As equações (8) e (9) representam as relações logarítmica e linear entre frete e distância, que foram utilizadas para estimar os custos de transporte desse trabalho.

$$Y = e^a \times X^b \quad (8)$$

$$Y = a \times X + b \quad (9)$$

Onde:

Y: Valor do frete estimado de fertilizantes (em R\$/t)

X: Distância rodoviária da rota (em km)

a: Coeficiente angular (ou declividade)

b: Coeficiente linear (ou intercepto)

Além disso, os fretes de fertilizantes tendem a apresentar comportamentos distintos, dependendo do corredor de transporte de uma rota (LIMA et al., 2016). Baseado nessa característica, foi realizada uma regionalização entre as rotas presentes no SIFRECA, de forma a diferenciar as curvas de fretes entre portos e regiões de origem dos produtos. Em suma, obteve-se sete equações (regionalização) de fretes para as rotas de importação de fertilizantes, bem como 11 equações para as rotas de distribuição interna do insumo.

Com relação à utilização da curva de frete expressa nas equações de regressão, foi estabelecida uma “distância de corte”, sendo aplicada a equação logarítmica quando a distância fosse menor em relação à “distância de corte” e a equação linear quando maior. A “distância de corte” foi definida pelo encontro entre as curvas linear e logarítmica. As Tabela 6 e Tabela 7 apresentam um resumo de toda a regionalização considerada, equações de fretes e “distância de corte”, conforme a diferenciação de cada fluxo.

Tabela 6 – Curvas de fretes consideradas para a importação de fertilizantes.

Portos	UF	Regionalização	Distância de Corte (km)	Inclinação -ção Linear	Intercep -to Linear	Inclinação Logarítmi -ca	Intercepto Logarítmi -ca
São Luís	MA	Arco-Norte	668	0,0741	56,92	0,5568	1,05
Belém	PA	Arco-Norte	668	0,0741	56,92	0,5568	1,05
Santarém	PA	Arco-Norte	668	0,0741	56,92	0,5568	1,05
Manaus	AM	Arco-Norte	668	0,0741	56,92	0,5568	1,05
Santana	AP	Arco-Norte	668	0,0741	56,92	0,5568	1,05
Salvador	BA	Nordeste	204	0,0803	62,45	0,4315	2,07
Maceió	AL	Nordeste	204	0,0803	62,45	0,4315	2,07
Recife	PE	Nordeste	204	0,0803	62,45	0,4315	2,07
Aracaju	SE	Nordeste	204	0,0803	62,45	0,4315	2,07
Fortaleza	CE	Nordeste	204	0,0803	62,45	0,4315	2,07
Paranaguá	PR	Paranaguá	464	0,0888	45,89	0,5942	0,82
Rio Grande	RS	Rio Grande	616	0,0966	35,06	0,7399	-0,20
Porto Alegre	RS	Rio Grande	616	0,0966	35,06	0,7399	-0,20
Santos	SP	Santos	1093	0,0727	58,77	0,4047	2,10
São Francisco do Sul	SC	São Francisco do Sul	1510	0,0878	40,61	0,6617	0,31
Rio de Janeiro	RJ	Vitória	945	0,1127	45,52	0,5532	1,23
Vitória	ES	Vitória	945	0,1127	45,52	0,5532	1,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Curvas de fretes consideradas para a distribuição de fertilizantes.

UF Origem	Regionalização	Distância de Corte (km)	Inclinação Linear	Intercepto Linear	Inclinação Logarítmica	Intercepto Logarítmica
DF	GO	697	0,1064	39,69	0,4983	1,47
GO	GO	697	0,1064	39,69	0,4983	1,47
MS	MS	649	0,0985	32,26	0,3732	2,15
MT	MT	717	0,0944	42,43	0,3823	2,19
AL	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
BA	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
CE	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
MA	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
PB	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
PE	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
PI	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
RN	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
SE	Nordeste	1516	0,0773	62,05	0,4054	2,22
AC	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
AM	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
AP	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
PA	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
RO	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
RR	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
TO	Norte	773	0,0714	58,36	0,5611	1,00
ES	ES	939	0,1089	48,35	0,5320	1,37
MG	MG	1067	0,0879	44,08	0,5396	1,16
RJ	ES	939	0,1089	48,35	0,5320	1,37
SP	SP	782	0,0820	54,12	0,4064	2,07
PR	PR	1109	0,0860	49,36	0,5321	1,24
RS	RS	633	0,0967	35,33	0,7434	-0,23
SC	SC	1101	0,1016	28,17	0,7172	-0,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambas as equações obtidas na regressão (8 e 9) serão aplicadas as distâncias rodoviárias para as rotas do correspondente corredor de movimentação. Todas as distâncias foram levantadas a partir do *GoogleMaps* (2020).

Os fretes intermodais (hidroviário e ferroviário) foram calculados a partir do frete rodoviário. Para o ferroviário foi utilizado um desconto de 30% em relação à mesma Origem-Destino do frete rodoviário, enquanto para o hidroviário foi aplicado um desconto de 60%. Essa aplicação de descontos em cima do frete rodoviário é uma prática comum de mercado adotada pelas

concessionárias ferroviárias e hidroviárias brasileiras para a formação de preços (BRANCO E CAIXETA-FILHO, 2011).

O custo com impostos, basicamente, considera toda a legislação tributária do ICMS já apresentada no tópico 2.1.4. Com base nas regras estaduais (Tabela 1), há a necessidade de se conhecer o fluxo completo do fertilizante até a entrega para o consumo final para o cálculo do ICMS. Vale ressaltar que não há um entendimento claro da tributação para o estado do Amapá, sendo assim utilizado a mesma regra que Roraima usa como premissa. Os preços médios utilizados para o cálculo foram de: R\$ 1.060,00 para os fertilizantes simples (antes da mistura) e R\$ 1.500,00 para os fertilizantes já misturados (ANDA, 2018).

Por fim, não foi adotada uma estimativa para o custo fixo atrelado à variável binária da abertura de uma misturadora (C), sendo considerado um valor irrisório (R\$ 1) para a composição do modelo matemático. Essa escolha foi tomada diante dos objetivos de se avaliar de forma indiscriminada os principais locais para a mistura de fertilizantes no Brasil, desconsiderando fatores de viabilidade de implantação para tal.

3.4. Cenários analisados

A partir do modelo matemático discutido neste capítulo serão construídos diversos cenários, nos quais espera-se aproximar das respostas dos objetivos específicos já apresentados nesse trabalho. A análise de cenários será avaliada através de alterações nas equações do modelo matemático proposto ou nos parâmetros de custos de das restrições, conforme resumido na Tabela 8.

Tabela 8 – Características dos cenários analisados

Cenários	Características/Alterações
C1	Cenário base
C2	Isenção tributária total
C3	Capacidade de importação irrestrita
C4	Novas soluções logísticas intermodais/Aumento da capacidade atual
C5	Expansão da demanda de fertilizantes

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o C2, a alteração ocorreu no custo referente ao imposto, que foi zerado para todos os fluxos existentes no modelo. O objetivo deste cenário foi de avaliar o impacto da tributação do ICMS na cadeia logística de fertilizantes.

No C3, o objetivo foi de avaliar a cadeia logística de fertilizantes sem restrições quanto ao volume de importação nos portos brasileiros. Dessa forma, a expressão (2) foi alterada para a expressão (8) descrita a seguir. Além disso, o parâmetro A_{OP} foi redefinido para 100 milhões de toneladas, de forma a garantir uma alta capacidade a todos os portos.

$$\sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} VR_{OMDP} + \sum_{E=1}^{17} \sum_{S=1}^9 \sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} VM_{OESMDP} \leq A_{OP} \quad \forall O, P \quad (8)$$

Com relação ao C4, o principal objetivo foi de simular as alterações da cadeia logística de fertilizantes com a inclusão de novas infraestruturas intermodais projetadas, bem como o aumento da capacidade das infraestruturas atuais. Na Tabela 9 é possível visualizar as principais alterações consideradas, bem como a fonte de informação levantada como referência das novas capacidades.

Tabela 9 – Informações levantadas sobre a expansão do sistema multimodalidade para fertilizantes

Modo	Terminal de entrada	Terminal de saída	Volume (t)	Fonte
Ferroviária	Santos (SP)	Rondonópolis (MT)	7.500.000	Sahncez (2020)
Hidroviária	Santarém (PA)	Itaituba (PA)	1.200.000	RUMO (2022)
Ferroviária	Santos (SP)	Rio Verde (GO)	3.500.000	Figueiredo (2021)
Ferroviária	São Luís (MA)	Palmeirante (TO)	1.500.000	Canal Rural (2018)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o C5, além das informações das novas infraestruturas intermodais mencionadas, o principal objetivo foi de analisar um cenário de expansão da demanda de fertilizantes para 10 anos. Para isso, foram utilizados os dados de projeção da área de produção agrícola do relatório de projeções do agronegócio, divulgado pelo MAPA (2018). Dessa forma, os valores dos parâmetros D_{DI} foram reajustados conforme a porcentagem de aumento da área de produção de agrícola dos 9 principais produtos que estão associados ao consumo de fertilizantes.

Tabela 10 – Projeções do aumento da produção agrícola para 2028.

Produto	Produção em 2018 (em mil t)	Produção em 2028 (em mil t)	Variação
Soja	116.996	155.892	33,25%
Milho	89.208	113.236	26,93%
Cana-de-Açúcar	643.700	812.359	26,20%
Algodão	1.942	2.475	27,45%
Café	3.480	4.260	22,41%
Papel e celulose	20.184	26.439	30,99%
Arroz	11.532	11.952	3,64%
Feijão	3.398	3.098	-8,83%
Trigo	4.872	6.369	30,73%

Fonte: Elaborado com base nos dados do MAPA (2018).

Destaca-se que não foi utilizado um modelo complexo e robusto para as projeções de demanda. Basicamente, o mesmo percentual de variação na produção dos principais produtos agrícolas foi aplicado no consumo atual de fertilizantes calculado na desagregação da demanda NPK para o cenário 1. Além disso, buscou-se considerar os aumentos de demanda de forma regional, a partir dos dados estratificados de produção do MAPA. Quando isso eventualmente não fosse possível, a variação da produção a nível Brasil refletiu igualmente na demanda por fertilizantes das culturas com esse tipo de informação. Diante dessas considerações, possíveis ganhos de produtividade não foram considerados para as projeções de demanda.

Além disso, houve uma alteração da expressão de oferta com o objetivo de garantir o atendimento da nova demanda. Com a nova expressão (9), o objetivo foi de que o modelo decidisse qual porto teria aumento de oferta de fertilizantes para atender o aumento da demanda.

$$\sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} VR_{OMDP} + \sum_{E=1}^{17} \sum_{S=1}^9 \sum_{M=1}^{137} \sum_{D=1}^{137} VM_{OESMDP} \geq A_{OP} \quad \forall O, P \quad (9)$$

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação do modelo matemático descrito no capítulo 3², envolvendo também as análises de cada cenário proposto. De forma geral, os resultados irão contribuir para o entendimento da demanda de fertilizantes no Brasil, dos custos logísticos envolvendo a cadeia produtiva, dos polos misturadores de fertilizantes, dos principais fluxos *inbound* e *outbound* do insumo, do impacto de infraestrutura intermodais, entre outros.

4.1. A demanda de fertilizantes no Brasil

Um resultado importante deste trabalho, que não foi obtido através do modelo matemático, diz respeito à demanda de fertilizantes no Brasil. Como já mencionado, o setor carece de informações oficiais a respeito desse insumo, sendo os dados por estado divulgados pela ANDA, a principal fonte de informação sobre a demanda. Dessa forma, um dos objetivos desse trabalho foi o de desagregar esses dados de demanda por mesorregião, a fim de ter uma maior precisão na modelagem matemática da cadeia de fertilizantes. Além disso, também foi desenvolvida uma projeção desses dados para 2028.

Com relação aos dados divulgados pela ANDA (2018), esses apontam para uma demanda de NPK de cerca de 15,3 milhões de toneladas no ano de 2018. Desse montante, o Mato Grosso é o principal estado consumidor (19,15% do volume total), seguido pelo Rio Grande do Sul (13,45%), Paraná (12,2%), São Paulo (11,66%), Minas Gerais (11,61%), Goiás (9,29%), Mato Grosso do Sul (5,76%) e Bahia (4,82%). Considerando cada um dos três principais nutrientes (NPK), o potássio é o que representa a maior parcela do consumo brasileiro (cerca de 5,85 milhões de toneladas), seguido pelo fósforo (cerca de 5,12 milhões de toneladas) e pelo nitrogênio (cerca de 4,38 milhões de toneladas).

Com os dados desagregados foi possível entender os principais centros de consumo de fertilizantes no Brasil, com destaque para o Norte Mato-grossense, mesorregião que concentra a produção de soja e milho e que representou quase 1,9 milhões de toneladas em 2018. O Sul

² Todos os modelos matemáticos foram processados, porém os resultados obtidos não estão, necessariamente, apresentados em sua totalidade neste documento. Dessa forma, para aqueles que tiverem interesse em obter mais detalhes contatar fernando.bastiani@usp.br

Goiano, Triângulo Mineiro, Sudoeste de Mato Grosso do Sul e Sudeste Mato-Grossense também são importantes centros de consumo com alta produção de soja e milho. Já o Extremo Oeste Baiano, além da alta produção de soja, também se destaca pelas lavouras de algodão. A mesorregião de Ribeirão Preto ganha destaque principalmente pela produção de cana-de-açúcar e café. Na Tabela 11 é possível visualizar o ranking das 10 principais mesorregiões consumidoras de fertilizantes no Brasil.

Tabela 11 – Ranking do consumo de fertilizantes NPK por mesorregião em 2018.

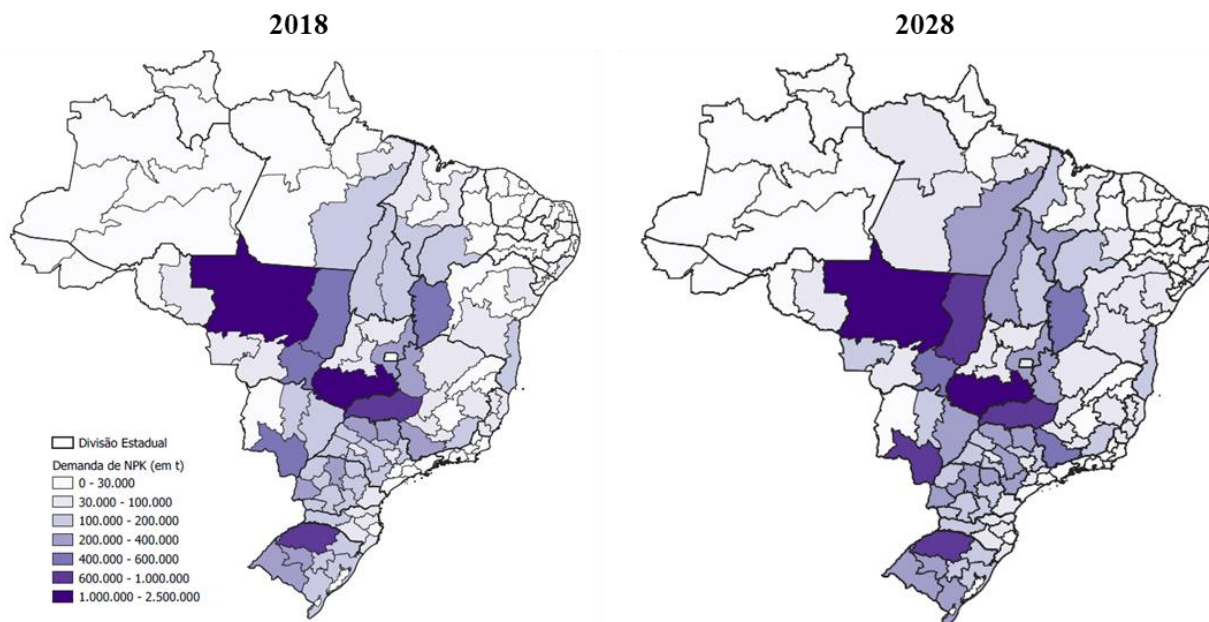
Mesorregião	Demanda NPK (em t)
Norte Mato-grossense (MT)	1.901.835,78
Sul Goiano (GO)	1.091.589,79
Noroeste Rio-grandense (RS)	966.576,96
Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG)	676.394,82
Sudoeste de Mato Grosso do Sul (MS)	537.337,25
Sudeste Mato-grossense (MT)	466.868,33
Extremo Oeste Baiano (BA)	454.222,56
Nordeste Mato-grossense (MT)	448.202,90
Ribeirão Preto (SP)	373.888,38
Sul/Sudoeste de Minas (MG)	367.681,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

As projeções apontaram um crescimento de 18,3% na demanda por fertilizantes no Brasil até 2028, atingindo pouco mais de 18,1 milhões de toneladas de NPK. Dentre os três nutrientes, os resultados indicaram que o fósforo é o que deve apresentar maior crescimento (19,12%), com demanda próxima a 6,1 milhões de toneladas. A demanda por potássio deve chegar a quase 7 milhões de toneladas em 2028, um crescimento de 18,8% se comparado a 2018. Já o nitrogênio é o que apresenta um menor percentual de aumento (16,6%), com demanda projetada de 5,1 milhões de toneladas em 2028.

Na Figura 19 é possível observar a distribuição da demanda NPK por mesorregião calculada para 2018 e a projetada para 2028, o que ilustra os principais centros consumidores de fertilizantes no Brasil descritos anteriormente. De forma geral, não há grandes mudanças no ranking de consumo de fertilizantes apresentado, porém algumas regiões se destacam em relação à expansão do consumo de fertilizantes.

Figura 19 – Distribuição da demanda de NPK por mesorregião em 2018 e projeção para 2028.



Fonte: Elaborado pelo autor.

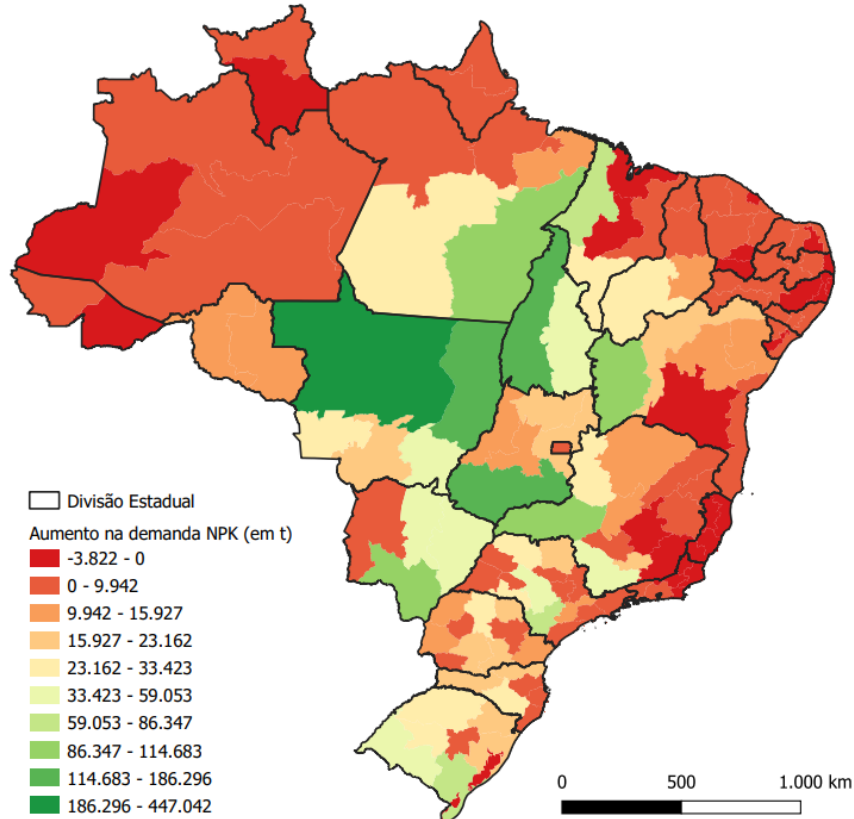
Dessa forma, com as projeções desagregadas por mesorregião, foi possível identificar como o perfil de crescimento da agricultura brasileira irá influenciar o aumento da demanda por fertilizantes. Os resultados regionais do MAPA (2018) destacaram principalmente a expansão da fronteira agrícola brasileira, evidenciada pelo crescimento fora do padrão da região denominada MATOPIBA, que compreende os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Além disso, as projeções mostraram que o Rio Grande do Sul deve continuar liderando a expansão da produção de arroz, a consolidação da produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul e a manutenção do crescimento da produção de grãos no Brasil.

A mesorregião Norte Mato-grossense, além de maior consumidora de fertilizantes, é a que apresentou aumento na demanda projetada para 2028, um volume de 447 mil toneladas de NPK. O Nordeste Mato-grossense, que em 2018 ocupava o oitavo lugar no ranking de consumo, em 2028 passa a ocupar a quinta posição, com o segundo maior aumento de volume (186 mil toneladas). Regiões já consolidadas no ranking que também apresentaram grandes aumentos no consumo de fertilizantes foram: Sul Goiano (quase 140 mil toneladas), Sudoeste do Mato Grosso do Sul (quase 97 mil toneladas) e Extremo Oeste Baiano (quase 96 mil toneladas).

Como citado, a região do MATOPIBA deve representar um grande aumento no consumo de fertilizantes nos próximos 10 anos. O destaque é a mesorregião Ocidental do Tocantins, que apresentou o terceiro maior aumento de demanda (151,5 mil toneladas). Sudeste Paraense, Oeste Maranhense, Oriental do Tocantins, Sudoeste Piauiense, Sul Maranhense e Sudoeste

Paraense são mesorregiões que também apresentaram grande potencial de crescimento para a demanda de fertilizantes em 2028. A Figura 20 mostra de forma visual o perfil do variação da demanda de fertilizantes para 2028 em relação a 2018.

Figura 20 – Variação da demanda de fertilizantes no Brasil para 2028.

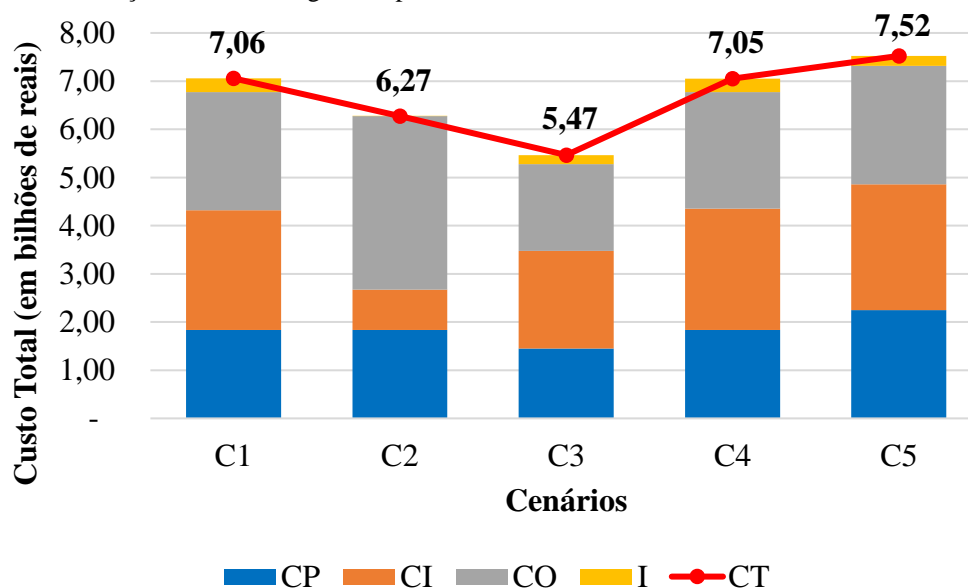


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Custos logísticos da cadeia produtiva de fertilizantes

Um importante parâmetro do modelo matemático diz respeito aos custos logísticos presentes na cadeia produtiva de fertilizantes. A partir dos resultados obtidos em cada cenário, foi possível identificar a participação de cada um dos quatro componentes que representam o custo logístico total considerado na modelagem matemática. De forma resumida, a Figura 21 mostra de forma estratificada a composição dos custos logísticos em cada cenário analisado.

Figura 21 – Estratificação dos custos logísticos para cada cenário analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados ótimos obtidos a partir do modelo matemático mostram que os custos portuários têm uma alta representatividade frente aos custos logísticos totais da rede de transporte considerada. Nos cenários 1, 2 e 4, onde há a restrição igual aos volumes de importação, os custos portuários totalizaram cerca de 1,84 bilhão de reais. Já no C3, quando não há restrições nos volumes importados, os custos portuários caíram para cerca de 1,45 bilhão de reais, o que indica uma mudança na alocação dos fluxos para portos que possuem um menor custo associado. No C5, que considera a expansão da demanda de fertilizantes, há um aumento de 22,2% nos custos portuários, atingindo cerca de 2,25 bilhões de reais. Isso mostra que a dependência brasileira das importações fará com que os custos portuários subam consideravelmente com o aumento da demanda por fertilizantes.

Quando analisada a representatividade dos custos portuários, os cenários 1, 3 e 4 apontaram que tais custos correspondem entre 26 e 26,5% dos custos logísticos totais. No C2, cenário onde os custos com impostos são zerados, houve um aumento na representatividade dos custos portuários (29,3%). Esse aumento está associado a uma diminuição dos custos logísticos totais (6,27 bilhões de reais), onde o resultado ótimo mostra uma melhor alocação dos fluxos quando zerados os impostos. No C5, além do aumento no custo portuário total, também há um aumento de representatividade se comparado aos cenários com restrição de importação, evidenciando ainda mais a dependência brasileira das importações.

Pela ótica dos custos com impostos, foi constatado que não se constitui grande parcela nos

custos logísticos totais, representando cerca de 0,29% no C1, 0,18% no C3, 0,28% no C4 e 0,21% no C5. Isso mostra que uma estratégia utilizada no setor de fertilizantes para reduzir custos logísticos está associada à utilização de rotas que não possuem tributação associada ao ICMS. Ao se comparar os custos logísticos totais do C1 e do C2, por exemplo, observa-se uma redução de 12,5%, saindo de 7,06 bilhões para 6,27 bilhões de reais. Ou seja, a tributação da cadeia logística de fertilizantes possui um grande impacto no desenho da rede de transporte, o que justifica considerar que este tipo de custo é também um custo logístico.

É interessante ressaltar também que a questão tributária modifica bastante a estratificação dos custos de transporte, sendo os custos associados ao transporte *outbound* o principal componente do custo total (57,4%). Se forem comparados aos outros cenários, tal custo representa entre 32,6 e 34,7% dos custos logísticos totais. Quando analisados os custos *inbound*, o comportamento é inverso, ou seja, possuem uma representatividade muito menor (13,3%) em relação aos outros cenários (entre 34,8 a 35,7%). Isso evidencia o grande impacto da tributação na cadeia logística de fertilizantes.

Outra questão importante relacionada aos custos logísticos de fertilizantes diz respeito à concentração de nutriente presente no insumo. No C3, a redução do custo logístico já pontuada também está associada à diminuição do volume de fertilizantes importado para o atendimento da demanda. Para analisar os cenários onde se permite um aumento nos volumes de importação sem restrição, será utilizado um indicador de custo para o atendimento da demanda. Ou seja, o custo logístico total de um cenário será dividido pelo volume da demanda do mesmo, que estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Custo total ponderado pela demanda de cada cenário.

Cenário	CT (em reais)	Demanda (em t)	CT (em R\$/t)
C1	7.055.883.162	15.356.379	459,48
C2	6.271.580.370	15.356.379	408,40
C3	5.465.057.567	15.356.379	355,88
C4	7.051.170.282	15.356.379	459,17
C5	7.523.939.911	18.165.103	414,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados evidenciam uma grande redução de custo total no C3, quando não há restrições para a importação de fertilizantes. Nesse cenário foi observada uma redução de quase 26% do volume total de fertilizantes transportado para o atendimento da demanda NPK. Nesse sentido, destaca-se que a preferência pelo transporte de fertilizantes mais concentrados possui um

grande impacto nos custos logísticos, com redução de 22,5% nos custos totais por demanda.

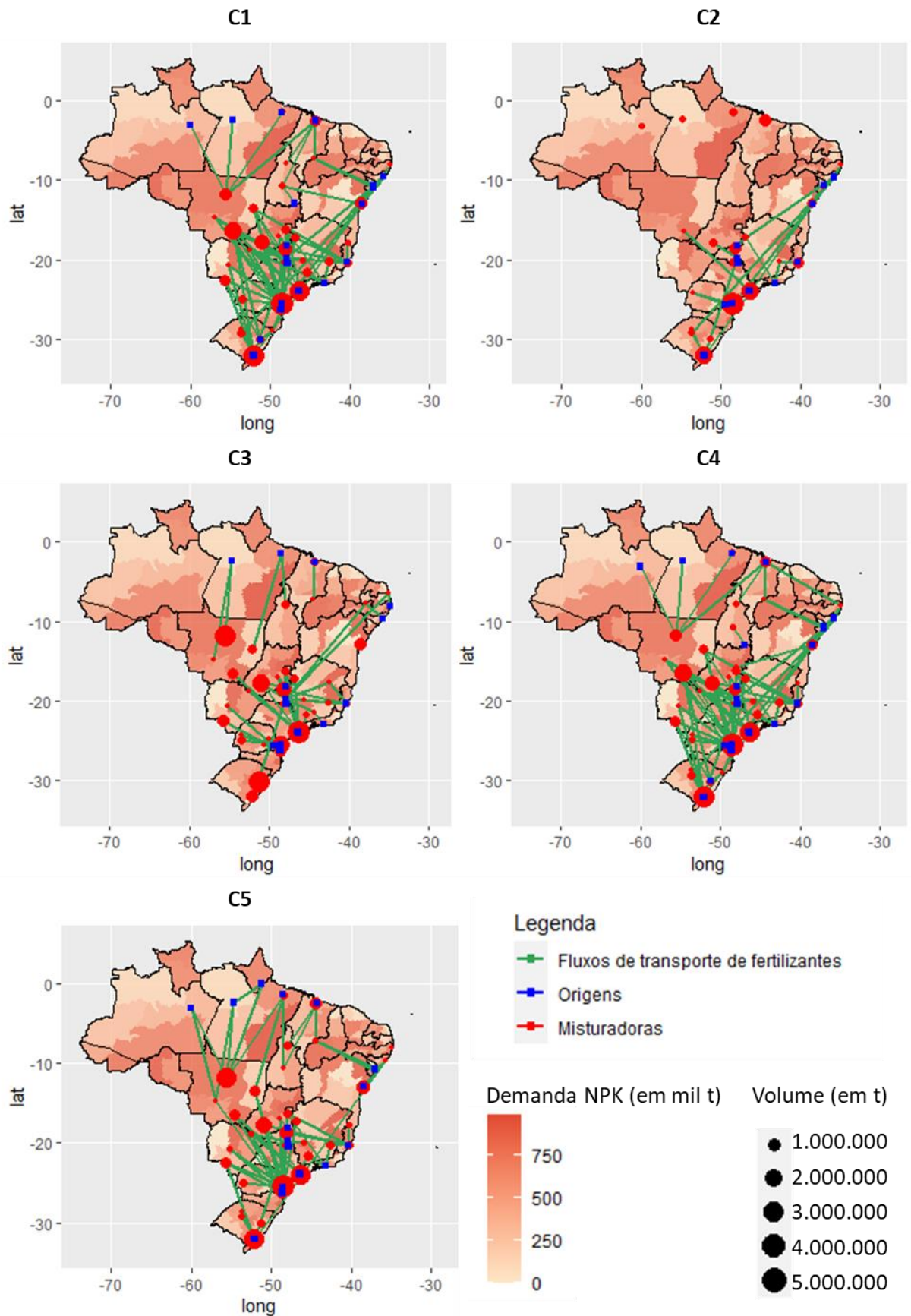
Nos cenários 4 e 5, quando são considerados os aumentos de capacidade e novas infraestruturas para a intermodalidade, é possível observar uma redução nos custos logísticos para o atendimento da demanda. No C4 a redução é bem baixa, cerca de 0,1% em relação ao C1. Já no C5 o custo é reduzido para R\$ 414,20/t, quase 10% a menos em relação ao C1. Essa situação mostra que a expansão da intermodalidade tende a gerar ganhos logísticos apenas no futuro, com o crescimento da demanda por fertilizantes.

4.3. Fluxos de transporte e localização de misturadoras de fertilizantes

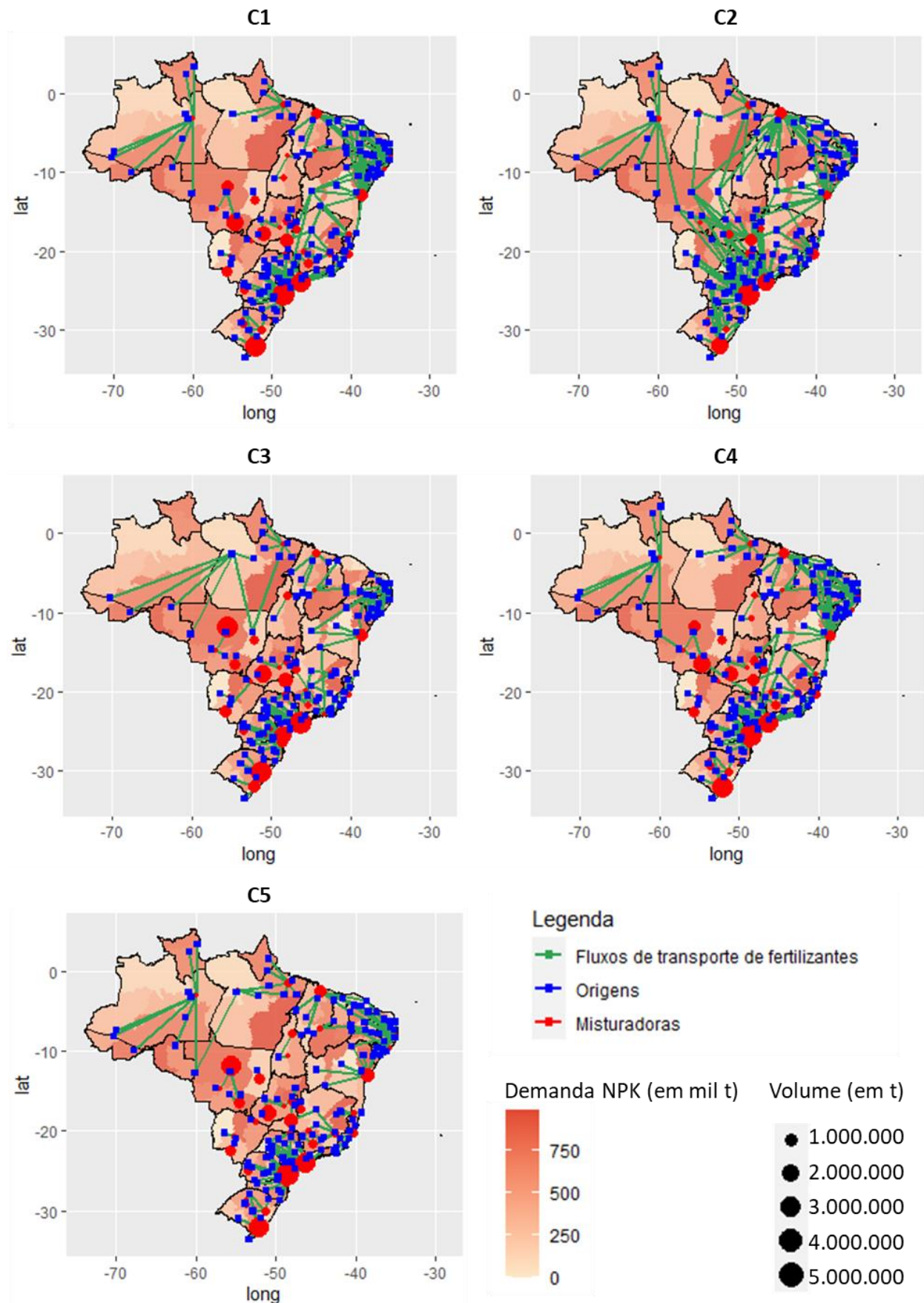
Uma variável de decisão importante que foi resultado do modelo matemático diz respeito à localização de misturadoras. Com a carência de dados oficiais deste elo da cadeia, este tópico apresentará os locais ótimos para a localização de indústrias misturadoras para o cenário analisado, bem como uma estimativa de suas capacidades de produção.

Conforme destacado por Alumur et al. (2020), os modelos de localização também são importantes para a decisão do projeto de uma rede logística, determinando os fluxos ótimos de transporte entre os nós. Nesse sentido, esse tópico também abordará as principais ligações entre origem e misturadora (fluxos *inbounds*) e entre misturadoras e destinos finais (*fluxos outbounds*).

As Figura 22 e Figura 23, apresentadas a seguir, têm como objetivo mostrar de forma gráfica todos os fluxos de transporte *inbound* e *outbound*, respectivamente, bem como a localização das misturadoras obtidas através dos resultados de cada cenário. Cabe ressaltar que quando não há fluxos de transportes saindo ou chegando de um determinado ponto, isso significa um fluxo de abastecimento próprio.

Figura 22 – Fluxos *inbound* para casa cenário analisado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Fluxos *outbound* para cada cenário analisado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1. Localização ótima de misturadoras

Com relação à localização de misturadoras, as regiões portuárias se mostraram ótimos locais em todos os cenários analisados, o que pode ser explicado pela grande proximidade com a origem dos fertilizantes via fluxos de importação. A localização das fábricas nacionais também é determinante para a localização de misturadoras, com destaque para as mesorregiões Sul Goiano e Triângulo Mineiro. Os terminais intermodais de saída também se mostraram ótimos locais para a localização das indústrias.

Uma questão bastante determinante sobre a localização das indústrias misturadoras diz respeito à tributação. Com as regras tributárias impostas, o modelo matemático busca alocar sempre uma misturadora dentro dos estados que não possuem portos importadores de fertilizantes, como são os casos de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Tocantins e Piauí. Com a restrição mínima da capacidade da misturadora de 300 mil toneladas, os estados que apresentam baixo consumo de fertilizantes dificilmente são considerados como locais interessantes para a localização de misturadoras, como são os casos das regiões Norte e Nordeste.

Analisando a isenção da tributação, o C2 é o que apresenta a maior alteração do perfil de localização de misturadoras. Os resultados mostraram que há uma concentração ainda maior nas regiões portuárias, não havendo a necessidade de localização no interior para a não tributação do ICMS. Apenas Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso aparecem como candidatos à localização de misturadoras pela proximidade de indústrias nacionais e, mesmo assim, apresentaram grandes reduções de capacidade se comparado aos outros cenários. Na Tabela 13 é possível observar as capacidades de mistura obtidas pelo modelo de otimização.

Tabela 13 – Capacidades de mistura por estado para cada cenário.

Estado	C1	C2	C3	C4	C5
AL	300.000			300.000	300.000
AM	300.000	354.136		300.000	300.000
BA	1.145.939	1.137.790	786.141	1.120.830	1.507.424
DF				300.000	
ES	570.545	1.547.683	333.540	571.422	483.813
GO	3.180.195	920.980	2.599.831	3.133.428	3.053.514
MA	1.008.293	2.038.745	464.746	995.729	1.294.946
MG	3.837.415	2.811.560	3.276.941	3.764.152	3.890.302
MS	1.511.247		1.420.574	1.510.986	1.770.030
MT	5.161.339	300.000	4.692.930	5.134.981	6.062.355
PA	441.873	1.235.503	600.000	439.961	863.008
PB			300.000		
PE	300.000	300.000		300.000	300.000
PI	300.000			300.000	357.917
PR	6.006.722	10.168.965	3.221.332	6.145.640	5.830.278
RJ			300.000		
RN			300.000		
RS	5.966.173	6.582.524	3.576.354	5.959.644	5.370.793
SC	1.445.192	2.194.270	695.599	1.445.192	1.175.880
SE		300.000			
SP	4.165.334	6.296.916	3.600.232	4.108.365	4.511.321
TO	764.300		457.985	771.139	809.426

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação às regiões portuárias, o porto de Paranaguá se consolida como o principal polo de mistura do país, totalizando quase 10 milhões de toneladas (aumento de 83% em relação ao C1), seguido de Rio Grande (5,2 milhões e aumento de 14%), Santos (5 milhões e aumento de 31%), São Francisco do Sul (2,2 milhões e aumento de 92%) e São Luís (2 milhões e aumento de 102%). Já para as mesorregiões do interior, o Sudeste Mato-grossense era a principal região de mistura, sendo sua capacidade reduzida de quase 2,9 milhões para 300 mil toneladas. O Sul Goiano apresentou redução de 55% na capacidade de mistura (920 mil no C2). O Norte Mato-grossense, Sudoeste de Mato Grosso do Sul, Leste Goiano, Nordeste Mato-grossense e Oeste Paranaense, que no C1 eram regiões importantes de mistura, tiveram suas capacidades zeradas no C2. Quando analisadas as regiões próximas às fábricas, Ribeirão Preto e o Triângulo Mineiro foram as mesorregiões que mais apresentaram aumento de capacidade de mistura diante da isenção tributária, com aumentos de 317% e 38%, respectivamente.

Quando analisado o C4, que incorpora o aumento da capacidade e novas infraestruturas

intermodais, não é possível observar grandes mudanças no aspecto da localização de indústrias misturadoras. Os centros de mistura são bastante semelhantes aos observados no C1, com poucas variações de capacidade. A mudança mais significativa é observada no estado do Tocantins, sendo que no C1 havia uma concentração maior da capacidade de mistura na mesorregião Oriental Tocantins. No C4 é observado uma concentração maior na mesorregião Ocidental Tocantins, justamente pela presença do novo corredor de transporte ferroviário para fertilizantes de São Luís (MA) para Palmeirante (TO).

Já no C5, considerando o crescimento da demanda por fertilizantes, é possível observar grandes mudanças no desenho das indústrias misturadoras, principalmente no Mato Grosso (principal centro consumidor de fertilizantes). Das cinco mesorregiões que compõem o estado, apenas a Centro-Sul Mato-grossense não foi candidata a local de mistura em nenhum dos cenários. Considerando as outras quatro, o Sudeste Mato-grossense era a principal região de mistura no C1, com capacidade de quase 2,9 milhões de toneladas. Os resultados referentes ao C5 mostram uma redução de 65% no volume de mistura dessa região, correspondendo a pouco mais de 1 milhão de toneladas.

Tabela 14 – Capacidades das misturadoras (t) no estado do Mato Grosso em cada cenário.

Mesorregião	C1	C2	C3	C4	C5
Sudeste Mato-grossense	2.894.920	300.000	770.909	2.848.200	1.015.880
Norte Mato-grossense	1.198.973		3.045.681	1.219.335	3.698.767
Nordeste Mato-grossense	767.446		576.339	767.446	1.047.708
Sudoeste Mato-grossense	300.000		300.000	300.000	300.000

Fonte: Elabora pelo autor.

A mesorregião Norte Mato-grossense acaba absorvendo grande parte desse volume com a perda de capacidade no Sudeste Mato-grossense. No C5, essa região passou a ter capacidade próxima a 3,7 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 208% em relação ao C1. Essa mudança é reflexo do aumento da capacidade no fluxo hidroviário de Santarém (PA) até Itaituba (PA), além da possibilidade de expansão das importações de fertilizantes pelos portos do Arco Norte dada pelos resultados do modelo matemático. Outra mesorregião afetada pelo C5 é o Nordeste Mato-grossense, que apresenta um aumento de capacidade de 37% em relação ao C1, saltando de 767 mil para pouco mais de 1 milhão de toneladas. Além dos fatores já citados anteriormente, essa região também terá uma grande expansão da demanda por fertilizantes em 2028.

A expansão da demanda, combinada com a entrada de novas infraestruturas com

multimodalidades, também deve provocar alterações nas capacidades de mistura em outras localidades. O novo corredor ferroviário de Santos (SP) até Rio Verde (GO) deve consolidar ainda mais a mesorregião Sul Goiano como um grande centro de mistura de fertilizantes. No C5, a região apresenta um aumento de 8% na capacidade de mistura, o que representa um volume próximo a 2,2 milhões de toneladas.

As alternativas propostas no C5 também conferem um aumento nas capacidades de mistura para os portos do Arco Norte, de maneira geral. Belém (PA), por exemplo, apresenta um aumento de 31% em relação ao C1, enquanto Santarém (PA) aparece com um novo local de mistura importante. Já o porto de São Luís possui quase 1,3 milhão de toneladas de capacidade de mistura, o que representa um aumento de 28% em relação ao C1.

4.3.2. Fluxos de transporte

Os volumes movimentados em cada fluxo de transporte são variáveis importantes do modelo matemático que ajudam a entender os principais fluxos *inbound* e *outbound* da rede logística fertilizantes. Os fluxos de abastecimento da misturadora serão analisados para entender a dinâmica de originação dos fertilizantes, enquanto os fluxos de abastecimentos no destino para entender a área de influência das misturadoras.

A partir dos resultados obtidos pelo modelo matemático referente aos fluxos *inbound*, é possível inferir os volumes movimentados com origem em portos importadores ou fábricas nacionais. Pelas características impostas ao modelo, os volumes de importação são iguais nos cenários 1, 2 e 4. Já as fábricas possuem variações em todos os cenários como um complemento da oferta de fertilizantes. A Tabela 15 mostra os volumes alocados pelo modelo matemático para os portos e fábricas em cada cenário.

Tabela 15 – Volumes (t) alocados pelo modelo matemático para cada tipo de origem e cenário.

Origem	C1	C2	C3	C4	C5
Fábrica	7.221.673	6.999.986	4.266.846	7.412.140	2.383.542
Porto	29.189.607	29.189.607	22.697.865	29.189.607	35.497.466
TOTAL	36.411.280	36.189.594	26.964.710	36.601.748	37.881.008

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do cenário base (C1) indicaram que os fluxos de importação representam cerca de 80,2% de todo o volume que abastece as misturadoras, sendo os outros 19,8% fluxos originados nas fábricas nacionais. No C3, sem a restrição de capacidade de importação, esses

fluxos passam a representar 84,2% de volume *inbound* total. Neste cenário, em relação ao C1, há uma grande alteração nos fluxos de importação do Rio Grande do Sul, que passa a concentrar o volume em Porto Alegre (RS) e não em Rio Grande (RS). Com isso, os volumes alocados a partir da fábrica de Rio Grande (RS) apresentam uma redução de 93%, caindo de 1,3 milhão para 100 mil toneladas. Por outro lado, o C3 indica um aumento nas importações em Santos (SP) na ordem de 21%, o que também favorece uma maior utilização da capacidade produtiva de Cubatão, saltando de quase 1,1 milhão no C1 para 1,5 milhão de toneladas no C3.

Pela ótica do cenário com isenção tributária (C2), é possível notar uma redução de cerca de 3% nos volumes alocados para as fábricas se comparado ao C1. De forma geral, a isenção tributária, principalmente para as importações de fertilizantes, desfavorece os fluxos das fábricas nacionais, principalmente das que estão localizadas em regiões portuárias. As fábricas localizadas em Paranaguá (PR), por exemplo, tiveram uma redução nos fluxos de 835 mil toneladas para 268 mil toneladas (-68%). Em Cubatão (SP), a redução foi de 36% (de 1,1 milhão para 695 mil toneladas), enquanto Rio Grande (RS) apresentou uma queda menos expressiva, de 1,3 para 1,2 milhão de toneladas (-8%).

Quando analisado o aumento das capacidades e novas infraestruturas intermodais (C4), não há grandes alterações no perfil de abastecimento das misturadoras. Já com a expansão de demanda projetada no C5, os fluxos *inbound* com origens nas fábricas apresentaram uma queda expressiva, passando a representar apenas 6,3% de todos os fluxos de abastecimento das misturadoras. Dessa forma, o Brasil passa a depender ainda mais das importações considerando essas modificações, o que indica uma necessidade de aumento das capacidades nacionais para que haja um benefício logístico para a cadeia de fertilizantes.

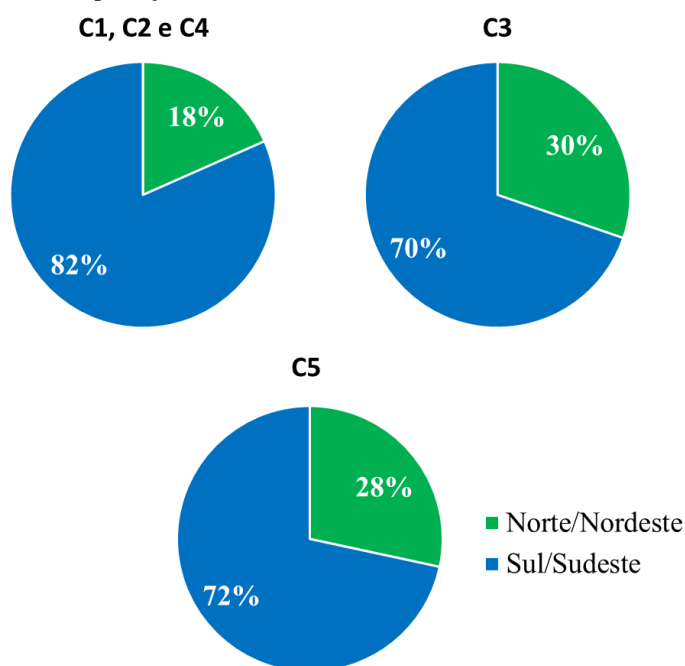
Ainda sobre o cenário 5, as fábricas do interior são as que mais sofrem com aumento da capacidade de transporte da intermodalidade. Catalão (GO), por exemplo, grande produtor de fertilizantes, apresenta uma redução de 64% nos fluxos *inbound* se comparado ao C1. Grande parte dessa redução é compensada pela nova rota ferroviária de Santos (SP) até Rio Verde (GO), que se torna bastante competitiva para o abastecimento do estado de Goiás. Já as fábricas localizadas em Uberaba (MG) apresentam uma redução de 67% nos fluxos de organização de fertilizantes, saindo de 2,2 milhões para quase 1 milhão de toneladas se comparados os cenários 5 e 1.

Com relação aos fluxos de importação de fertilizantes, os cenários 1, 2 e 4, quando não há

alteração dos parâmetros, mostram que há uma concentração de volume nos portos do Sul e Sudeste, com destaque para Paranaguá (PR), Rio Grande (RS), Santos (SP) e São Francisco do Sul (SC), que juntos representam quase 82% de toda importação nacional de fertilizantes. Já os portos do Norte/Nordeste têm participação próxima a 18% nas importações de fertilizantes, sendo São Luís (MA), Salvador (BA) e Belém (PA) os principais portos quanto ao volume de importação.

Uma análise importante diz respeito às mudanças no perfil de importação de fertilizantes. No C3, com capacidade irrestrita de importação, a participação dos portos do Norte/Nordeste aumenta para 30% em relação aos cenários C1, C2 e C4. Enquanto no C5, considerando a expansão da demanda e as novas infraestruturas intermodais, o modelo matemático também tende a expandir os fluxos *inbound* para os portos da região Norte/Nordeste, representando 28% do volume total. Na Figura 24 é possível observar essas mudanças em cada cenário analisado.

Figura 24 – Participação das importações de fertilizantes em cada cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando o C3, os portos da região Norte/Nordeste que mais apresentam crescimento na representatividade das importações são Belém (PA), que passa a ter participação de 5,9% do volume total de fertilizantes importado, ante 2,6% no C1, e Santarém (PA), cuja participação nas importações passa a ser de 14,4%, ante 1,6% no C1. Ou seja, os resultados obtidos no modelo matemático apontam que o Arco Norte, especificamente para esses dois portos, que

possuem custos logísticos competitivos e em que há grande potencial de desenvolvimento dessa região para as importações de fertilizantes. A participação de cada porto nas importações de fertilizantes nos diferentes cenários analisados está detalhada na Tabela 16.

Tabela 16 – Participação de cada porto (t) nos fluxos *inbound* gerados pelo modelo matemático em cada cenário.

Porto	C1	C2	C3	C4	C5
Aracaju (SE)	0,6%	0,6%	0,0%	0,6%	0,5%
Belém (PA)	2,6%	2,6%	5,9%	2,6%	4,4%
Fortaleza (CE)	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Maceió (AL)	0,6%	0,6%	0,2%	0,6%	0,6%
Manaus (AM)	1,2%	1,2%	0,1%	1,2%	1,0%
Paranaguá (PR)	33,3%	33,3%	11,4%	33,3%	27,3%
Porto Alegre (RS)	2,1%	2,1%	12,3%	2,1%	1,7%
Recife (PE)	0,5%	0,5%	1,1%	0,5%	0,8%
Rio de Janeiro (RJ)	0,3%	0,3%	2,5%	0,3%	0,2%
Rio Grande (RS)	16,2%	16,2%	3,1%	16,2%	13,3%
Salvador (BA)	4,2%	4,2%	3,5%	4,2%	4,3%
Santana (AP)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,2%
Santarém (PA)	1,6%	1,6%	16,1%	1,6%	4,7%
Santos (SP)	15,9%	15,9%	24,8%	15,9%	16,4%
São Francisco do Sul (SC)	7,5%	7,5%	8,0%	7,5%	7,4%
São Luís (MA)	7,0%	7,0%	3,4%	7,0%	5,8%
Vitória (ES)	6,3%	6,3%	7,6%	6,3%	5,2%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os portos do Sul e Sudeste, o perfil de importação muda bastante. Os resultados do C3 mostraram uma queda para 11,4% na participação das importações pelo porto de Paranaguá (PR), hoje principal importador de fertilizantes. No C1, o porto representava 33,3% de todo volume importando pelo Brasil. O porto de Rio Grande (RS) é outro para o qual o modelo indica redução na participação das importações, chegando a 3,1% no C3, ante 16,2% no C2. Já as oportunidades para os portos do Sul e Sudeste são evidenciadas através de Santos (SP), Porto Alegre (RS) e Vitória (ES), cujas participações no C3 passam a ser de 24,8%, 12,3% e 7,6%, respectivamente, ante 15,9%, 2,1% e 7% no C1.

Quando analisado o C5, os portos da região Norte/Nordeste têm uma leve queda na participação das importações se comparado ao C3, porém também indicam grande oportunidades de crescimento com a expansão da agricultura e infraestruturas intermodais. O novo fluxo de importação com origem no município de Santana (AP) traz bastante competitividade para o abastecimento das misturadoras, representando 6,2% do volume importado pelo Brasil. Assim

como no C3, Belém (PA), Barcarena (PA) e Santarém (PA) também apresentam aumento na participação no volume importado de fertilizantes, que é reflexo do aumento da capacidade da solução hidroviária até Itaituba (PA).

Considerando o novo corredor logístico ferroviário de São Luís (MA) até Palmeirante (TO), o porto de São Luís (MA) apresenta um aumento da sua participação no volume importado de fertilizantes para 5,8%, ante 3,4% observado no C3. O porto de Salvador (BA) não apresenta grandes alterações no volume de importação nos cenários analisados.

Ainda sobre as oportunidades de expansão dos portos do Arco Norte, os resultados mostraram que o Mato Grosso apresentará mudanças expressivas no abastecimento de fertilizantes tendo em vista a ótica do destino consumidor. No C1, de todo o volume com destino final no estado, 29% tiveram como origem Santos (SP), 25% Paranaguá (PR), 14% fábricas nacionais, 9% Santarém (PA), 7% São Luís (MA), 6% Belém (PA), 4% São Francisco do Sul (SC), 3% Rio Grande (RS) e 1% Manaus (AM). Ou seja, um perfil bastante diversificado que pode visualizado através da Tabela 17.

Tabela 17 – Perfil de abastecimento de fertilizantes do Mato Grosso em cada cenário.

Origem	C1	C2	C3	C4	C5
Fábricas	14%	33%	0%	13%	0%
Belém (PA)	6%	6%	13%	6%	12%
Manaus (AM)	1%	2%	0%	1%	1%
Paranaguá (PR)	25%	42%	0%	26%	5%
Porto Alegre (RS)	0%	0%	0%	0%	0%
Rio Grande (RS)	3%	0%	0%	3%	0%
Santana (AP)	0%	0%	0%	0%	35%
Santarém (PA)	9%	6%	71%	9%	24%
Santos (SP)	29%	6%	16%	29%	15%
São Francisco do Sul (SC)	4%	0%	0%	3%	8%
São Luís (MA)	7%	4%	0%	7%	0%
Vitória (ES)	0%	0%	0%	2%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando todos os cenários, é possível observar grandes alterações nesse perfil de abastecimento. No C3, por exemplo, com a capacidade de importação irrestrita, Santarém (PA) passa a representar 71% do abastecimento do Mato Grosso, seguido de Santos (SP) (16%) e Belém (PA) (13%). De fato, é evidente que o Arco Norte representa um ganho logístico bastante elevado quando se observa a competitividade do Mato Grosso, principal consumidor de

fertilizantes.

No cenário 5, com o equilíbrio um pouco maior dos fatores de oferta, o perfil de abastecimento do Mato Grosso se mantém bastante diverso, porém com uma participação bem maior em relação ao C1. Os portos do Sul e Sudeste, principalmente Santos (SP), Paranaguá (PR) e Rio Grande (RS) apresentam grande redução na participação dos fluxos para o MT. Já os portos do Norte, principalmente Santarém (PA), Santana (AP) e Belém (PA) surgem com grandes potenciais de aumento das importações para o estado no futuro. Dessa forma, o investimento na expansão da capacidade de importação nos portos do Arco Norte será essencial para o aumento da competitividade logística de fertilizantes no estado do Mato Grosso.

Como identificado ao longo desse trabalho, a cadeia logística de fertilizantes possui uma alta dependência da modalidade rodoviária, com baixa taxa de utilização da intermodalidade na rede de transporte. Uma característica importante do setor de fertilizantes é que as infraestruturas intermodais não foram desenhadas para a operação de fertilizantes. Nesse sentido, a necessidade de um fluxo do porto até um terminal de entrada é um fator negativo para a competitividade da logística ferroviária e hidroviária de fertilizantes. Dessa forma, com os resultados obtidos também foi possível avaliar como cada cenário irá impactar a matriz de transporte de fertilizantes no Brasil, conforme detalha a Tabela 18.

Tabela 18 – Volume alocado pelo modelo matemático para cada modalidade de transporte e cenário.

Fluxo	C1	C2	C3	C4	C5
Hidroviário	1%	0%	1%	1%	3%
Ferroviário	8%	2%	6%	9%	11%
Rodoviário	91%	98%	93%	90%	86%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados ótimos obtidos pelo modelo indicaram que 91% dos fluxos de transporte foram alocados para o modal rodoviário, 8% para o modal ferroviário e 1% para o hidroviário no C1. Ou seja, apenas 9% de todos os fluxos de fertilizantes significaram transportes via multimodalidade. Quando comparado ao C2, a isenção tributária na cadeia logística reduz drasticamente a alocação dos fluxos para as rotas intermodais. Os fluxos hidroviários praticamente foram nulos, enquanto os ferroviários representaram apenas 2% do volume total. Dessa forma, os ganhos obtidos pela isenção tributária praticamente inviabilizam o transporte em outras modalidades para os fertilizantes.

Analisando o C4, é possível identificar que a expansão das capacidades e as novas

infraestruturas intermodais são suficientes para elevar a participação da multimodalidade no transporte de fertilizantes, sendo que apenas os fluxos ferroviários apresentam um pequeno aumento na matriz de transporte. Se comparado ao C1, há um incremento de cerca de 500 mil toneladas, considerando as rotas de Santos (SP) até Rio Verde (GO) e São Luís (MA) até Palmeirante (TO).

Já quando considerada a expansão da demanda por fertilizantes, a utilização das rotas ferroviárias e hidroviárias aumentam com maior expressão. Os dados do C5 mostram que a multimodalidade deverá ter participação de 14% no transporte de fertilizantes no Brasil, ante 9% observado no C1. Esse aumento é reflexo de uma maior utilização da ferroviária de Santos (SP) até Rio Verde (GO) e de São Luís (MA) até Palmeirante (TO). Ainda assim, a rota hidroviária de Santarém (PA) até Itaituba (PA) impulsiona a utilização dessa modalidade para os fertilizantes. A participação da intermodalidade só não tem um aumento maior em decorrência da menor utilização da solução ferroviária Santos (SP) à Rondonópolis (MT) neste cenário.

Com relação aos volumes movimentados, a Tabela 19 apresenta as configurações dos fluxos alocados para a intermodalidade para cada cenário analisado. É possível observar que a rota ferroviária de Santos (SP) até Rondonópolis (MT), que no C1 esgotava sua capacidade de transporte, apresenta uma grande redução de volume quando considerada a expansão do consumo de fertilizantes e o aumento da capacidade das infraestruturas (C5). Isso mostra que o corredor passa a se tornar menos competitivo com a possibilidade de aumento de abastecimento do Mato Grosso pelo Arco Norte.

Tabela 19 – Volumes (t) alocados pelo modelo matemático nos fluxos intermodais em cada cenário.

Terminal de Entrada	Terminal de saída	C1	C2	C3	C4	C5
Manaus (AM)	Porto Velho (RO)	54.657	521		54.657	54.657
Paranaguá (PR)	Cascavel (PR)	616.544		438.494	440.204	589.042
Rio Grande (RS)	Cruz Alta (RS)	250.000	250.000		250.000	250.000
Santarém (PA)	Itaituba (PA)	300.000		300.000	476.843	1.200.000
Santos (SP)	Rio Verde (GO)				169.628	1.219.896
Santos (SP)	Rondonópolis (MT)	1.500.000	300.000	770.909	1.475.196	938.464
São Luís (MA)	Palmeirante (TO)				413.588	509.426
Vitória (ES)	Araguari (MG)	396.158		891.233	496.618	425.183
TOTAL		3.117.359	550.521	2.400.636	3.776.733	5.186.669

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, o aumento da capacidade no corredor hidroviário de Santarém (PA) até Itaituba (PA) é utilizado em sua totalidade no C5, mostrando a importância competitiva desta rota como alternativa para o abastecimento do crescimento da demanda de fertilizantes na região Norte e no Mato Grosso.

Outra rota que se apresenta como uma solução competitiva para a cadeia logística de fertilizantes é a ferrovia entre Santos e Rio Verde (GO). No C4, o modelo alocou um volume próximo a 170 mil toneladas, enquanto no C5 houve um aumento para mais de 1,2 milhão de toneladas. Isso significa que este corredor será essencial para o transporte *inbound* de fertilizantes, com o crescimento da demanda no estado do Goiás.

Uma solução logística bastante utilizada para o transporte de grãos e que deve iniciar o transporte de fertilizantes é a rota de São Luís (MA) até Palmeirante (TO). Os resultados do C5 mostraram uma alocação ótima de mais de 500 mil toneladas para esse corredor de transporte, um terço de sua capacidade total considerada no modelo matemático. Esse novo corredor ferroviário se mostra bastante competitivo para o abastecimento de fertilizantes no estado do Tocantins.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das diversas cadeias produtivas presentes no agronegócio brasileiro, certamente a de fertilizantes é uma das mais complexas. A sua grande importância, seus problemas e a carência de dados motivaram o objetivo deste trabalho, que foi de otimizar a logística de fertilizantes no Brasil utilizando um modelo matemático para a localização de indústrias misturadoras. Cinco cenários foram considerados a fim de responder aos principais objetivos específicos.

A dependência brasileira das importações de fertilizantes acarreta ao país um custo bastante elevado, evidenciado neste trabalho pelos custos portuários. No C1, que representa a realidade atual do setor, 1,84 milhão de reais foram representados pelos custos portuários, ou seja, 26% de todos os custos logísticos totais para o suprimento de fertilizantes. Com a expansão da agricultura brasileira, foi constatado no C5 que haverá um aumento ainda maior na dependência dos fertilizantes importados. Dessa forma, o estímulo da produção nacional através de políticas públicas deve ser avaliado para a redução dos custos logísticos e aumento da competitividade brasileira no setor de fertilizantes.

O modelo matemático proposto permitiu a estimativa da localização ótima de indústrias misturadoras no Brasil, bem como o cálculo de suas capacidades. De maneira geral, as misturadoras se concentram nas regiões próximas da origem do fertilizante, especificamente dos portos e das fábricas nacionais. Os estados com alta demanda de fertilizantes também se mostraram um fator determinante para a localização de misturadoras, validando a regra de isenção tributária para a importação quando há industrialização dentro do próprio estado de destino do insumo.

A isenção tributária para as importações de fertilizantes, analisada no C2, promove uma série de alterações nos fluxos de transporte, o que torna importante a consideração dos impostos como um custo logístico nos modelos matemáticos. Dentre as mudanças, há uma redução de 12,5% nos custos logísticos totais da cadeia, além de uma maior concentração das misturadoras nas regiões portuárias e aumento nos fluxos *outbound* entre os estados. Tais mudanças indicam um desperdício logístico e energético, que pode ainda gerar impactos ambientais relevantes. Em contrapartida, inibe a utilização da capacidade nacional de produção de fertilizantes, além de reduzir os fluxos ferroviários e hidroviários. Dessa forma, o tratamento tributário de cada estado deve ser pensado conjuntamente com o Governo Federal, visando atingir um objetivo comum.

A expansão da agricultura brasileira até 2028 indicou uma série de mudanças no desenho da rede logística de fertilizantes. Através da desagregação da demanda de fertilizantes proposta neste trabalho, foi possível identificar as principais mesorregiões que apresentaram crescimento do consumo de fertilizantes no futuro. O Mato Grosso e o MATOPIBA, regiões com maior aumento observado na demanda, devem ser tratados como pontos centrais dos profissionais do setor para o redesenho da logística de fertilizantes no Brasil.

Especificamente no Mato Grosso, principal estado consumidor de fertilizantes, o C5 mostrou uma grande mudança no perfil das capacidades de mistura dentro do estado. Enquanto no C1, que apresentava a mesorregião Sudeste Mato-Grossense como a principal região de mistura, o C5 aponta um deslocamento do centro de mistura para a mesorregião Norte Mato-grossense. Essa mudança também é reflexo de uma aptidão maior dessa nova região para as importações via Arco Norte, que se apresentam mais competitivas.

Avaliando então os fluxos de importação de fertilizantes, os resultados apontam um enorme potencial de crescimento para os portos do Arco Norte, com destaque para Belém (PA), Santana (AP), Santarém (PA) e São Luís (MA). A representatividade das importações pelo Arco Norte passa de 18% no C1, que avalia as condições atuais, para 28% no C5, que avalia a expansão de demanda e novas infraestruturas para a intermodalidade de fertilizantes. Conclui-se então que são necessários investimentos no aumento da capacidade e na modernização nos portos do Arco Norte, com o objetivo de proporcionar ganhos logísticos para a cadeia de transporte de fertilizantes.

Um problema relevante da cadeia logística de fertilizantes diz respeito à sua matriz de transporte, sendo a intermodalidade muito pouco utilizada no setor. O C1 apontou que 91% dos fluxos de fertilizantes obtidos pelo modelo matemático foram alocados para a modalidade rodoviária, enquanto apenas 9% foram divididos entre as ferrovias e hidrovias. Ainda assim, com a simulação do aumento da capacidade atual e de novas rotas, a participação da multimodalidade aumentou para 14% no C5. Dessa forma, os investimentos em infraestruturas para a intermodalidade de fertilizantes, principalmente para facilitar o acesso aos terminais de entrada, se tornam imprescindíveis para o equilíbrio da matriz de transporte e redução dos custos logísticos de fertilizantes.

Uma limitação importante deste trabalho diz respeito à produção nacional de fertilizantes. O modelo proposto visa uma minimização apenas dos custos logísticos, não considerando um

custo industrial inerente a esse elo da cadeia. Dessa forma, sugere-se para trabalhos futuros a estruturação de modelos mais apropriados para entender com mais clareza políticas públicas e privadas para estimular a produção nacional de fertilizantes. Também é interessante um levantamento aprofundado sobre novas jazidas de minério no Brasil, de forma a identificar possíveis novos pontos de origem de fertilizantes.

Ainda neste cenário, o contexto recente envolvendo o conflito entre Rússia e Ucrânia reforça ainda mais a discussão da dependência brasileira das importações de fertilizantes, já que este evento trouxe preocupações quanto ao abastecimento de fertilizantes no Brasil. Nesse sentido, considerar um modelo global, com os fluxos marítimos de importação de fertilizantes, pode ser interessante para avaliar novas rotas internacionais e seus impactos na logística nacional de fertilizantes.

Outra mudança interessante para o modelo matemático seria a incrementação de custos fixos estimados para a implantação de indústrias misturadoras. Dessa forma, seria possível avaliar as condições de custos regionais e seus impactos de custo na cadeia logística de fertilizantes, determinando com mais precisão locais ótimos para a instalação de indústrias misturadoras no Brasil.

Por fim, a extensão do modelo matemático para multiperíodo pode trazer novos instrumentos para a melhoria da cadeia logística de fertilizantes. A incorporação e utilização de parâmetros de produção, importação e demanda mensal pode ser interessante para captar os efeitos sazonais da logística de fertilizantes, de forma a determinar melhores períodos para importar e transportar este insumo. Além disso, as soluções obtidas em modelos multiperíodo indicariam ganhos de escala com a utilização da armazenagem e oportunidades para a melhor integração com outras cadeias de produção, potencializando o frete de retorno.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABISOLO – Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. **Anuário ABISOLO**. 2018. Disponível em: <<https://www.abisolo.com.br/anuario/>>. Acesso em: 20 out 2020.

ABISOLO – Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. **Anuário ABISOLO**. 2019. Disponível em: <<https://www.abisolo.com.br/anuario/>>. Acesso em: 20 out 2020.

ALENCAR, R. **Localização de armazéns: estudo de caso em uma empresa do setor de fertilizantes**. 2017. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

ALUMUR, S. A.; CAMPBELL, J. F.; CONTRERAS, I.; KARA, B. Y.; MARIANOV, V.; O'KELLY, M.E. Perspectives on modeling hub location problems. **European Journal Of Operational Research**, v. 291, n. 1, p. 1-17, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.039>.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário estatístico, 2018**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/>>. Acesso em: 03 out 2020.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário estatístico, 2019**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/>>. Acesso em: 03 out 2020.

Andali S/A e Rumo inauguram terminal de fertilizantes em Rio Verde (GO). **RUMO**. 2022. Disponível em: <<https://rumolog.com/sala-de-imprensa/andali-s-a-e-rumo-inauguram-terminal-de-fertilizantes-em-rio-verde-go/>>. Acesso em: 15 dez 2022.

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Estatístico Aquaviário**. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/Anuario/>>. Acesso em: 03 out 2020.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Anuário Estatístico Ferroviário**. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Anuario_Estatistico.html>. Acesso em: 03 out 2020.

AZEVEDO, G. **Análise do desempenho do mercado nacional de fertilizantes no período**

entre 2005 e 2014. 2015. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616 p. Tradução de: Raul Rubenich.

BRANCO, J. E. H. e CAIXETA FILHO, J. V. Estimativa da demanda de carga captável pela estrada de ferro Norte-Sul. **Journal of Transport Literature**, v. 5, n. 4, p. 17-50, 2011.

BRASIL. Decreto nº 86.955, de 18 de fevereiro de 1982. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. **Lex**: Coleção de Leis do Brasil, São Paulo, v. 2, p. 156, 1982.

BRASIL. Lei complementar nº 87, de 13 de setembro de 1996. Dispõe sobre o imposto dos Estados e do Distrito Federal sobre operações relativas à circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços de transporte interestadual e intermunicipal e de comunicação, e dá outras providências. (LEI KANDIR). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp87.htm>. Acesso em: 15 out 2020.

BRASIL. Lei nº 6.374, de 01 de março de 1989. Dispõe sobre a instituição do ICMS. São Paulo, 1898. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1989/original-lei-6374-01.03.1989.html>>. Acesso em: 15 out 2020.

CAIXETA-FILHO, J. V.; PERA, T. G. Fertilizer logistics in Brazil: challenges and opportunities. **Fertilizer. Focus January/February**, p. 55-59, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322317057_Fertilizer_logistics_in_Brazil_challenges_and_opportunities>. Acesso em: 17 out 2020.

CAMARGO, F.A.O., SILVA, L.S., MERTEN, G.H., CARLOS, F.S., BAVEYE, P.C., TRIPLETT, E.W., 2017. **Brazilian agriculture in perspective: great expectations vs reality**. *Adv. Agron.* 141, 53–114. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.003>.

CARVALHO, L. B. Estudo de localização de fábricas misturadoras de adubo na região Centro-Oeste brasileira utilizando um modelo de programação linear. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB do Agronegócio Brasileiro**. 2019. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 2 out 2020.

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária. Ministério da Economia. **CONVÊNIO ICMS 100/97**. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV100_97>. Acesso em: 15 out 2020.

DASKIN, M. S. What You Should Know About Location Modeling. **Naval Research Logistics**, Vol. 55, No. 4, 2008, pp. 283–294.

DE LIMA, L. M. et al. Fertilizer freight rate disparity in Brazil: A regional approach. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 19, n. 4, p. 109–128, 2016.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. Fertilizantes: uma visão global sintética. **BNDES Setorial**, n. 24, p. 97-138, set 2006.

ESALQ-LOG – Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial. **Projeto Omã**, 2021.

FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR, M.; ARABANI, A. B.; NIKBAKSHI, E. Hub location problems: a review of models, classification, solution techniques, and applications. **Computers & Industrial Engineering**, [S.L.], v. 64, n. 4, p. 1096-1109, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.012>.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Outlook Fiesp 2029**. Disponível em: <<https://outlookdeagro.fiesp.com.br/OutLookDeagro/ptBR/Publicacao/Fertilizante2/Brasil/2028>>. Acesso em: 03 out 2020.

FIGUEIREDO, N. VLI e Copi criam novo corredor logístico para fertilizantes no Arco Norte. **CNN Brasil**. 2021. Acesso em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/vli-e-copi-criam-novo-corredor-logistico-para-fertilizantes-no-arco-norte/>>. Acesso em: 15 dez 2022.

GAMS – General Algebraic Modeling System. Software. 2020. Disponível em: <<https://www.gams.com/>>. Acesso em: 2 out 2020.

GoogleMaps. **Distance Matrix API**. Disponível em: <Visão geral da API Distance Matrix | Distance Matrix API | Google Developers>. Acesso em: 03 out 2020.

GOTTEMS, L. **4 empresas detêm 73% do mercado de Fertilizantes no Brasil**. AGROLINK, 2017. Acesso em: <https://www.agrolink.com.br/noticias/4-empresas-detem-73--do-mercado-de-fertilizantes-no-brasil_395514.html>. Acesso em: 27 out 2020.

Hidrovias do Brasil inicia transporte rodoviário de MT a Miritituba (PA). **Canal Rural**. 2018. Acesso em: <<https://www.canalrural.com.br/noticias/hidrovias-brasil-inicia-transporte-rodoviario-miritituba-72928/>>. Acesso em: 22 out 2020.

IAC – Instituto Agronômico de Campinas. **Boletim Técnico IAC, 208. Fertilizantes: Cálculo de Fórmulas Comerciais**. Campinas, março de 2011. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/publicacoes_online/pdf/boletimtecnicoIAC-208.pdf>. Acesso em: 11 out 2019.

IFA – International Fertilizer Association. IFASTAT. **Consumption 2018**. Disponível em: <<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>>. Acesso em: 06 out 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), 2018**. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 12 set 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), 2019**. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 20 out 2019.

HE-LAMBERT, L.; SHYLO, O.; ENGLISH, B. C.; EASH, N. S.; ZAHN, J. A.; LAMBERT, D. M. Supply chain and logistic optimization of industrial Spent Microbial Biomass distribution as a soil amendment for field crop production. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 146, p. 218-231, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.028>.

IMEA – Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. **Custo de Produção, 2022**. Disponível em: <<https://www.imea.com.br/imea-site/relatorios-mercado-detalhe?c=4&s=696277432068079616>>. Acesso em: 07 nov 2022.

Inforsystem Tecnologia. **Tabela de alíquotas de ICMS internas e interestaduais 2020**.

Disponível em: <<https://www.inforsystem.com/artigos/33-documentos-fiscais/54-tabela-de-aliquotas-de-icms-internas-e-interestaduais-2020>>. Acesso em: 17 out 2020.

LIMA, L. M.; ELIAS, L. P.; CAIXETA-FILHO, J. V.; CAMPOS, J.. Fertilizer freight rate disparity in Brazil: a regional approach. The **International Food and Agribusiness Management Review (Online)**, v. 19, p. 109-128, 2016.

MAHMOODJANLOO, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; BABOLI, A.; JAMIRI, A. A multi-modal competitive hub location pricing problem with customer loyalty and elastic demand. **Computers & Operations Research**, v. 123, p. 105048-105061, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2020.105048>.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio. Brasil 2017/18 a 2027/28**. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio>>. Acesso em: 04 out 2020.

MARCONATO, R. **Análise do custo de transporte de fertilizantes com uso de modelagem digital de terreno**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. doi:10.11606/D.3.2012.tde-04072013-174520. Acesso em: 28 out 2020.

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Comexstat: Exportação e Importação Geral**. 2018. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 02 out 2020.

REIS, J. G. M. et al. Brazilian import transport network of fertilizer (NPK): An analysis using SNA. **Interconnected Supply Chains in an Era of Innovation** - Proceedings of the 8th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS 2020. Anais 2020.

ROCHA, F. V.; CAIXETA FILHO, J. V. Ferrogrão: impactos econômicos e a localização ótima do terminal de transbordo. **Pesquisa Operacional Para O Desenvolvimento**, v. 10, n. 2, p.108-127, 2018.

SANCHEZ, E. Terminal ferroviário diminui preço do transporte de fertilizantes que chegam a

MT. **G1.** 2020. Acesso em: <<https://g1.globo.com/mt/mato-grosso/noticia/2020/02/02/terminal-ferroviario-diminui-preco-do-transporte-de-fertilizantes-que-chegam-a-mt.ghtml>>. Acesso em: 15 dez 2022.

SHANG, X.; YANG, K.; JIA, B.; GAO, Z.; JI, H. Heuristic algorithms for the bi-objective hierarchical multimodal hub location problem in cargo delivery systems. **Applied Mathematical Modelling**, v. 91, p. 412-437, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.057>.

SIFRECA – Sistema de informações de fretes. 2019. Disponível em: <<https://sifreca.esalq.usp.br/>>. Acesso em: 02 out 2020.

SILVA, M. B **Otimização de redes de distribuição física considerando incentivo fiscal baseado no crédito presumido de ICMS.** 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SIMÕES, D. C.; CAIXETA-FILHO, J. V.; PALEKAR, U. S. Fertilizer distribution flows and logistic costs in Brazil: changes and benefits arising from investments in port terminals. **International Food And Agribusiness Management Review**, v. 21, n. 3, p. 407-422, 20 mar. 2018. Wageningen Academic Publishers. <http://dx.doi.org/10.22434/ifamr2017.0037>.

USITC - United States International Trade Commission. **Brazil: Competitive Factors in Brazil Affecting U.S. and Brazilian Agricultural Sales in Selected Third Country Markets**, Investigation No. 332-524, Publication 4310. United States International Trade Commission, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Centroides considerados para os centos de mistura e consumo de fertilizantes.

Mesorregião	Centroide Misturadora	Centroide Destino
Agreste Alagoano	Girau do Ponciano (AL)	Limoeiro de Anadia (AL)
Agreste Paraibano	Casserengue (PB)	Alagoa Grande (PB)
Agreste Pernambucano	Caetés (PE)	São João (PE)
Agreste Potiguar	Santo Antônio (RN)	São José do Campestre (RN)
Agreste Sergipano	Poço Verde (SE)	Simão Dias (SE)
Araçatuba	Guararapes (SP)	Valparaíso (SP)
Araraquara	Araraquara (SP)	Itápolis (SP)
Assis	Palmital (SP)	Cândido Mota (SP)
Baixadas	Cabo Frio (RJ)	Araruama (RJ)
Baixo Amazonas	Santarém (PA)	Belterra (PA)
Bauru	Paranapanema (SP)	Itaí (SP)
Borborema	Pedra Lavrada (PB)	Monteiro (PB)
Campinas	Pirassununga (SP)	Casa Branca (SP)
Campo das Vertentes	Madre de Deus de Minas (MG)	São João del Rei (MG)
Central Espírito-santense	Vitória (ES)	Santa Maria de Jetibá (ES)
Central Mineira	Luz (MG)	Pompéu (MG)
Central Potiguar	Lagoa Nova (RN)	Cerro Corá (RN)
Centro Amazonense	Manaus (AM)	Manacapuru (AM)
Centro Fluminense	Nova Friburgo (RJ)	Bom Jardim (RJ)
Centro Goiano	Bela Vista de Goiás (GO)	Itaberaí (GO)
Centro Maranhense	Tuntum (MA)	Grajaú (MA)
Centro Norte Baiano	Feira de Santana (BA)	Canarana (BA)
Centro Norte de Mato Grosso do Sul	São Gabriel do Oeste (MS)	Sidrolândia (MS)
Centro Ocidental Paranaense	Mamborê (PR)	Ubiratã (PR)
Centro Ocidental Rio-grandense	Júlio de Castilhos (RS)	Tupanciretã (RS)
Centro Oriental Paranaense	Castro (PR)	Tibagi (PR)
Centro Oriental Rio-grandense	Rio Pardo (RS)	Cachoeira do Sul (RS)
Centro Sul Baiano	Mucugê (BA)	Malhada (BA)
Centro-Norte Piauiense	União (PI)	Regeneração (PI)
Centro-Sul Cearense	Iguatu (CE)	Icó (CE)
Centro-Sul Mato-grossense	Nortelândia (MT)	Chapada dos Guimarães (MT)
Centro-Sul Paranaense	Candói (PR)	Guarapuava (PR)
Distrito Federal	Brasília (DF)	Brasília (DF)
Extremo Oeste Baiano	Formosa do Rio Preto (BA)	São Desidério (BA)
Grande Florianópolis	Leoberto Leal (SC)	Alfredo Wagner (SC)
Itapetininga	Itaberá (SP)	Itapeva (SP)
Jaguaribe	Limoeiro do Norte (CE)	Morada Nova (CE)
Jequitinhonha	Capelinha (MG)	Novo Cruzeiro (MG)

(continua)

(continuação)

Mesorregião	Centroide Misturadora	Centroide Destino
Leste Alagoano	Maceió (AL)	Coruripe (AL)
Leste de Mato Grosso do Sul	Chapadão do Sul (MS)	Costa Rica (MS)
Leste Goiano	Luziânia (GO)	Cristalina (GO)
Leste Maranhense	Mirador (MA)	Brejo (MA)
Leste Potiguar	Canguaretama (RN)	Baía Formosa (RN)
Leste Rondoniense	Corumbiara (RO)	Vilhena (RO)
Leste Sergipano	Aracaju (SE)	Japaratuba (SE)
Litoral Norte Espírito-santense	Pinheiros (ES)	Linhares (ES)
Litoral Sul Paulista	Registro (SP)	Iguape (SP)
Macro Metropolitana Paulista	Pilar do Sul (SP)	São Miguel Arcanjo (SP)
Madeira-Guaporé	Porto Velho (RO)	Cujubim (RO)
Marajó	Cachoeira do Arari (PA)	Portel (PA)
Marília	Pompéia (SP)	Tupã (SP)
Mata Paraibana	Santa Rita (PB)	Pedras de Fogo (PB)
Mata Pernambucana	Sirinhaém (PE)	Itambé (PE)
Metropolitana de Belém	Belém (PA)	Castanhal (PA)
Metropolitana de Belo Horizonte	Pitangui (MG)	Casa Grande (MG)
Metropolitana de Curitiba	Paranaguá (PR)	Lapa (PR)
Metropolitana de Fortaleza	Fortaleza (CE)	Caucaia (CE)
Metropolitana de Porto Alegre	Porto Alegre (RS)	Camaquã (RS)
Metropolitana de Recife	Recife (PE)	Ipojuca (PE)
Metropolitana de Salvador	Salvador (BA)	Cabaceiras do Paraguaçu (BA)
Metropolitana de São Paulo	Santos (SP)	Mogi das Cruzes (SP)
Metropolitana do Rio de Janeiro	Rio de Janeiro (RJ)	Cachoeiras de Macacu (RJ)
Nordeste Baiano	Quijingue (BA)	Euclides da Cunha (BA)
Nordeste Mato-grossense	Canarana (MT)	Querência (MT)
Nordeste Paraense	Mocajuba (PA)	Tailândia (PA)
Nordeste Rio-grandense	Muitos Capões (RS)	Vacaria (RS)
Noroeste Cearense	Catunda (CE)	Santa Quitéria (CE)
Noroeste de Minas	Paracatu (MG)	Unaí (MG)
Noroeste Espírito-santense	Colatina (ES)	Boa Esperança (ES)
Noroeste Fluminense	Cambuci (RJ)	Varre-Sai (RJ)
Noroeste Goiano	Piranhas (GO)	Montes Claros de Goiás (GO)
Noroeste Paranaense	Brasilândia do Sul (PR)	Alto Piquiri (PR)
Noroeste Rio-grandense	Cruz Alta (RS)	Palmeira das Missões (RS)
Norte Amazonense	Japurá (AM)	Novo Airão (AM)
Norte Catarinense	São Francisco do Sul (SC)	Mafra (SC)
Norte Cearense	Itapipoca (CE)	Canindé (CE)
Norte Central Paranaense	Maringá (PR)	Londrina (PR)

(continua)

(continuação)

Mesorregião	Centroide Misturadora	Centroide Destino
Norte de Minas	Chapada Gaúcha (MG)	Buritzeiro (MG)
Norte de Roraima	Alto Alegre (RR)	Bonfim (RR)
Norte do Amapá	Oiapoque (AP)	Tartarugalzinho (AP)
Norte Fluminense	São Francisco de Itabapoana (RJ)	Campos dos Goitacazes (RJ)
Norte Goiano	Niquelândia (GO)	São João d'Aliança (GO)
Norte Maranhense	São Luís (MA)	Arari (MA)
Norte Mato-grossense	Sinop (MT)	Sorriso (MT)
Norte Piauiense	Luís Correia (PI)	Cocal (PI)
Norte Pioneiro Paranaense	Sertaneja (PR)	Cornélio Procópio (PR)
Ocidental do Tocantins	Palmeirante (TO)	Lagoa da Confusão (TO)
Oeste Catarinense	São Domingos (SC)	Abelardo Luz (SC)
Oeste de Minas	Bambuú (MG)	Formiga (MG)
Oeste Maranhense	Buriticupu (MA)	Açailândia (MA)
Oeste Paranaense	Cascavel (PR)	Assis Chateaubriand (PR)
Oeste Potiguar	Serra do Mel (RN)	Mossoró (RN)
Oriental do Tocantins	Porto Nacional (TO)	Campos Lindos (TO)
Pantaneais Sul Mato-grossense	Dois Irmãos do Buriti (MS)	Miranda (MS)
Piracicaba	Araras (SP)	Piracicaba (SP)
Presidente Prudente	Teodoro Sampaio (SP)	Rancharia (SP)
Ribeirão Preto	Guaíra (SP)	Morro Agudo (SP)
São Francisco Pernambucano	Dormentes (PE)	Petrolina (PE)
São José do Rio Preto	Novo Horizonte (SP)	José Bonifácio (SP)
Serrana	Curitiba (SC)	Campos Novos (SC)
Sertão Alagoano	Santana do Ipanema (AL)	São José da Tapera (AL)
Sertão Paraibano	Tavares (PB)	Princesa Isabel (PB)
Sertão Pernambucano	Ouricuri (PE)	Araripina (PE)
Sertão Sergipano	Frei Paulo (SE)	Carira (SE)
Sertões Cearenses	Tauá (CE)	Crateús (CE)
Sudeste Mato-grossense	Rondonópolis (MT)	Primavera do Leste (MT)
Sudeste Paraense	Santana do Araguaia (PA)	Paragominas (PA)
Sudeste Paranaense	Irati (PR)	Prudentópolis (PR)
Sudeste Piauiense	Caldeirão Grande do Piauí (PI)	Pio IX (PI)
Sudeste Rio-grandense	Rio Grande (RS)	Santa Vitória do Palmar (RS)
Sudoeste Amazonense	Eirunepé (AM)	Envira (AM)
Sudoeste de Mato Grosso do Sul	Ponta Porã (MS)	Maracaju (MS)
Sudoeste Mato-grossense	Denise (MT)	Tangará da Serra (MT)
Sudoeste Paraense	Itaituba (PA)	Altamira (PA)
Sudoeste Paranaense	Chopininho (PR)	Pato Branco (PR)
Sudoeste Piauiense	Uruçuí (PI)	Baixa Grande do Ribeiro (PI)

(continua)

(continuação)

Mesorregião	Centroide Misturadora	Centroide Destino
Sudoeste Rio-grandense	São Gabriel (RS)	Dom Pedrito (RS)
Sul Amazonense	Humaitá (AM)	Manicoré (AM)
Sul Baiano	Mucuri (BA)	Caravelas (BA)
Sul Catarinense	Turvo (SC)	Forquilha (SC)
Sul Cearense	Salitre (CE)	Mauriti (CE)
Sul de Roraima	Caracaraí (RR)	Mucajaí (RR)
Sul do Amapá	Santana (AP)	Macapá (AP)
Sul Espírito-santense	Maratázes (ES)	Itapemirim (ES)
Sul Fluminense	Barra Mansa (RJ)	Porto Real (RJ)
Sul Goiano	Rio Verde (GO)	Jataí (GO)
Sul Maranhense	Tasso Fragoso (MA)	Balsas (MA)
Sul/Sudoeste de Minas	Três Corações (MG)	Passos (MG)
Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba	Araguari (MG)	Uberaba (MG)
Vale do Acre	Sena Madureira (AC)	Rio Branco (AC)
Vale do Itajaí	Vidal Ramos (SC)	Ituporanga (SC)
Vale do Juruá	Tarauacá (AC)	Feijó (AC)
Vale do Mucuri	Serra dos Aimorés (MG)	Ladainha (MG)
Vale do Paraíba Paulista	Guaratinguetá (SP)	Caçapava (SP)
Vale do Rio Doce	Bom Jesus do Galho (MG)	Água Boa (MG)
Vale São-Franciscano da Bahia	Muquém de São Francisco (BA)	Juazeiro (BA)
Zona da Mata	Rio Casca (MG)	São Pedro dos Ferros (MG)

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – *Script* do modelo matemático utilizado no *Software* GAMS.

\$ONECHO > parametros.txt

```
set = E   rng = set!b1:b1000000   rdim = 1
set = S   rng = set!d1:d1000000   rdim = 1
set = O   rng = set!f1:f1000000   rdim = 1
set = M   rng = set!h1:h1000000   rdim = 1
set = D   rng = set!j1:j1000000   rdim = 1
set = F   rng = set!l1:l1000000   rdim = 1
```

```
set = FRODO rng = par!x1:z1000000   rdim = 3
set = FMULT rng = par!q1:u1000000   rdim = 5
set = FFABR rng = par!ac1:ae1000000 rdim = 3
```

```
par = CONVR rng = par!b1:d1000000   rdim = 2
par = OFERP rng = par!f1:h312       rdim = 2
par = OFERF rng = par!f313:h1000    rdim = 2
par = DEMAC rng = par!j1:l1000000   rdim = 2
par = CAPAC rng = par!n1:o1000000   rdim = 1
par = CMULT rng = par!q1:v1000000   rdim = 5
par = CRODO rng = par!x1:aa1000000 rdim = 3
par = CFABR rng = par!ac1:af1000000 rdim = 3
```

\$OFFECHO

\$CALL GDXXRW cenario1.xlsx @parametros.txt

\$GDXIN cenario1.gdx

SETS

O	Regioes portuarias
M	Misturadoras
D	Regioes consumidoras dos produtos
F	Tipos de fertilizantes utilizados na mistura
I	Ingredientes em NPK / N, P, K /
E	Terminal de transbordo de entrada
S	Terminal de transbordo de saida

FRODO(O,M,D) Combinacoes plausiveis do fluxo rodoviario dos portos
 FMULT(O,E,S,M,D) Combinacoes plausiveis do fluxo multimodal
 FFABR(O,M,D) Combinacoes plausiveis do fluxo rodoviario das fabricas

;

\$LOAD O M D F E S FRODO FMULT FFABR

PARAMETERS

* Oferta, demanda e conversao

CONVR(F,I) Fator de conversao dos tipos de fertilizantes em NPK
 OFERP(O,F) Oferta portuaria
 OFERF(O,F) Oferta das fabricas
 DEMAC(D,I) Demanda de fertilizantes em NPK

* Parametros de capacidade multimodal

CAPAC(E) Capacidade de carregamento do terminal de transbordo

* Parametros de custo por corredor

CRODO(O,M,D) Custo total do corredor rodoviario saindo dos portos
 CMULT(O,E,S,M,D) Custo total do corredor multimodal
 CFABR(O,M,D) Custo total do corredor rodoviario saindo das fabricas

;

\$LOAD CONVR OFERP OFERF DEMAC CAPAC CRODO CMULT CFABR

VARIABLES

Z Funcao objetivo

CR Custo total do corredor rodoviario

CM Custo total do corredor multimodal

VRODO(O,M,D,F) Volume movimentado no corredor rodoviario

VMULT(O,E,S,M,D,F) Volume movimentado no corredor multimodal

B(M) Variavel binaria de selecao da misturados

;

POSITIVE VARIABLES VRODO, VMULT

;

BINARY VARIABLES B

;

EQUATIONS

FOB Equacao de custo total do problema

CTR Equacao de custo rodoviario

CTM Equacao de custo multimodal

*Oferta, demanda e conversao

OFO(O,F) Equacao de ferta de fertilizantes em cada porto

OFF(O,F) Equacao de ferta de fertilizantes em cada fabrica

DEM(D,I) Equacao de demanda das regioes consumidoras

CAP(E) Equacao de capacidade multimodal de transporte

* Capacidade das misturadoras

MIN(M) Equacao de mistura minima das misturadoras

MAX(M) Equacao de mistura maxima das misturadoras

* QTD Equacao que restringe o numero maximo de misturadoras escolhidas

;

* Detalhamento da funcao objetivo

FOB.. $Z = E = CR + CM + 1 * \text{SUM}((M), B(M));$

CTR.. $CR = E = \text{SUM}((O,M,D,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FRODO}(O,M,D) * \text{CRODO}(O,M,D)) +$
 $\text{SUM}((O,M,D,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FFABR}(O,M,D) * \text{CFABR}(O,M,D)) ;$

CTM.. $CM = E = \text{SUM}((O,E,S,M,D,F), \text{VMULT}(O,E,S,M,D,F) \$ \text{FMULT}(O,E,S,M,D) * \text{CMULT}(O,E,S,M,D));$

* Equacao de oferta portuaria

OFO(O,F).. $\text{SUM}((M,D), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FRODO}(O,M,D)) +$
 $\text{SUM}((E,S,M,D), \text{VMULT}(O,E,S,M,D,F) \$ \text{FMULT}(O,E,S,M,D)) = G = \text{OFERP}(O,F);$

OFF(O,F).. $\text{SUM}((M,D), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FFABR}(O,M,D)) = L = \text{OFERF}(O,F);$

*Capacidade

CAP(E).. $\text{SUM}((O,S,M,D,F), \text{VMULT}(O,E,S,M,D,F) \$ \text{FMULT}(O,E,S,M,D)) = L = \text{CAPAC}(E);$

* Equacao de demanda

DEM(D,I).. $\text{SUM}((O,M,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FRODO}(O,M,D) * \text{CONVR}(F,I)) +$
 $\text{SUM}((O,M,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FFABR}(O,M,D) * \text{CONVR}(F,I)) +$
 $\text{SUM}((O,E,S,M,F), \text{VMULT}(O,E,S,M,D,F) \$ \text{FMULT}(O,E,S,M,D) * \text{CONVR}(F,I)) = E =$
 DEMAC(D,I);

* Equacao de capacidades minima e maxima da misturadora

MIN(M).. $\text{SUM}((O,D,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FRODO}(O,M,D)) +$
 $\text{SUM}((O,D,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FFABR}(O,M,D)) +$
 $\text{SUM}((O,E,S,D,F), \text{VMULT}(O,E,S,M,D,F) \$ \text{FMULT}(O,E,S,M,D)) = G = 300000 * B(M);$

MAX(M).. $\text{SUM}((O,D,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FRODO}(O,M,D)) +$
 $\text{SUM}((O,D,F), \text{VRODO}(O,M,D,F) \$ \text{FFABR}(O,M,D)) +$
 $\text{SUM}((O,E,S,D,F), \text{VMULT}(O,E,S,M,D,F) \$ \text{FMULT}(O,E,S,M,D)) = L = 1000000000 * B(M);$

MODEL MISTURA /ALL/;

OPTION RESLIM = 1000000000;

OPTION ITERLIM = 1000000000;

OPTION LIMROW = 0;

OPTION LIMCOL = 0;

OPTION OPTCR = 0.0;

SOLVE MISTURA USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY VRODO.L, VMULT.L, B.L ;

EXECUTE_UNLOAD "resultadosc1.gdx" VRODO.L, VMULT.L, B.L;

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultadosc1.gdx var = VRODO.L rng = vrodo!a1:z100000000 rdim = 4';

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultadosc1.gdx var = VMULT.L rng = vmult!a1:z100000000 rdim = 6';

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultadosc1.gdx var = MISTU.L rng = mistu!a1:z100000000 rdim = 1';

APÊNDICE C – Importação de cada tipo de fertilizante por porto no ano de 2018.

Porto/Fertilizante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Aracaju (SE)	-	-	-	58.996	-	-	7.480	-	-	71.748	-	26.500	-
Barcarena (PA)	65.275	-	11.070	28.040	-	-	5.770	-	-	-	29.200	9.800	34.583
Belém (PA)	392.461	-	21.459	120.768	-	14.700	19.760	5.500	-	37.739	29.756	72.552	43.966
Maceió (AL)	19.750	-	19.724	33.838	3.089	1.408	-	-	20.054	47.846	11.964	5.362	-
Manaus (AM)	88.382	-	-	33.000	-	-	12.234	22.000	-	27.496	102.106	23.449	45.990
Natal (RN)	-	-	5	-	-	-	215	2	-	-	-	-	-
Paranaguá (PR)	3.502.793	151.306	349.997	1.069.428	363.837	7.900	65.051	1.027.307	14.750	1.210.278	101.787	264.682	1.578.978
Porto Alegre (RS)	176.670	20.261	-	87.197	21.980	-	24.946	2.970	28.170	19.603	72.569	50.102	109.090
Recife (PE)	45.478	-	495	21.896	15.075	8	5.978	520	37	49.985	-	-	15.873
Rio de Janeiro (RJ)	67.747	0	237	3.013	3.225	-	5.297	123	321	48	-	-	2.194
Rio Grande (RS)	1.613.734	165.462	202.311	800.379	176	8.300	38.029	175.945	168.840	207.496	190.071	303.195	864.665
Salvador (BA)	552.396	-	40.134	175.204	-	20.074	43.683	61.267	59.791	35.100	48.099	16.268	163.114
Santana (AP)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Santarém (PA)	221.928	-	-	44.884	-	-	-	-	-	94.545	49.945	5.425	60.116
Santos (SP)	1.642.058	4.409	344.454	258.405	619.523	128.026	171.385	370.656	52.518	200.093	8	2.250	856.980
São Francisco do Sul (SC)	588.384	18.701	134.537	86.133	8.864	31.150	27.769	166.815	72.456	100.192	34.755	24.149	900.366

(continua)

(continuação)

Porto/Fertilizante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
São Luís (MA)	704.537	-	40.593	246.196	-	59.300	11.000	76.508	-	100.536	418.181	162.652	219.241
Vitória (ES)	824.043	-	36.633	253.678	-	44.930	28.461	16.301	10.037	117.628	-	18.017	485.692

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do MDIC (2018).

APÊNDICE D – Produção nacional por município e tipo de fertilizante.

Fábrica/Produto	1	4	5	10	11	12	13
Araucária (PR)	-	-	-	-	-	-	721.000
Araxá (MG)	-	-	-	-	1.446.000	-	-
Arraias (TO)	-	-	-	-	500.000	-	-
Camaçari (BA)	-	-	-	-	300.000	-	-
Candeias (BA)	-	-	-	240.000	180.000	-	-
Catalão (GO)	-	150.000	-	-	900.000	210.000	-
Cubatão (SP)	-	691.000	1.073.000	77.000	2.528.351	-	-
Guará (SP)	-	337.000	-	-	426.000	-	-
Luís Eduardo Magalhães (BA)	-	-	-	-	450.000	-	-
Paranaguá (PR)	-	-	-	-	1.220.000	-	-
Patos de Minas (MG)	-	-	-	-	250.000	-	-
Paulínia (SP)	-	-	-	-	700.000	-	-
Rio Grande (RS)	-	-	-	-	1.400.000	100.000	-
Rosário do Catete (SE)	500.000	-	-	-	-	-	-
Santa Luzia do Norte (AL)	-	-	-	-	120.000	-	-
Uberaba (MG)	-	994.036	-	-	841.000	1.240.412	-

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da ABISOLO (2018).

APÊNDICE E – Demanda por nutriente de fertilizante por mesorregião.

Mesorregião/Nutriente (Ano)	N (2018)	P (2018)	K (2018)	N (2028)	P (2028)	K (2028)
Agreste Alagoano (AL)	2.684	1.222	2.340	2.846	1.296	2.481
Agreste Paraibano (PB)	2.855	1.196	3.090	3.175	1.330	3.436
Agreste Pernambucano (PE)	5.848	2.822	5.808	5.632	2.718	5.594
Agreste Potiguar (RN)	497	326	438	386	254	340
Agreste Sergipano (SE)	6.461	4.831	2.230	5.991	4.479	2.068
Araçatuba (SP)	50.659	29.687	45.218	51.967	30.454	46.385
Araraquara (SP)	43.670	25.592	38.980	46.390	27.186	41.408
Assis (SP)	68.331	40.044	60.992	78.965	46.275	70.484
Baixadas (RJ)	665	397	550	643	384	532
Baixo Amazonas (PA)	5.788	9.809	10.507	6.885	11.669	12.499
Bauru (SP)	78.492	45.998	70.062	96.275	56.419	85.935
Borborema (PB)	343	143	371	750	314	812
Campinas (SP)	51.341	30.087	45.827	52.842	30.967	47.167
Campo das Vertentes (MG)	13.799	9.532	11.890	20.674	14.281	17.814
Central Espírito-santense (ES)	17.986	5.759	14.039	17.104	5.476	13.351
Central Mineira (MG)	13.806	9.536	11.896	19.034	13.148	16.401
Central Potiguar (RN)	696	457	613	1.089	715	960
Centro Amazonense (AM)	823	500	1.049	1.014	615	1.292
Centro Fluminense (RJ)	924	551	764	821	490	679
Centro Goiano (GO)	22.486	32.755	30.649	25.863	37.674	35.252
Centro Maranhense (MA)	4.144	8.551	8.794	3.543	7.311	7.519
Centro Norte Baiano (BA)	5.547	7.302	10.177	9.350	12.308	17.154
Centro Norte de Mato Grosso do Sul (MS)	35.321	55.758	61.848	45.040	71.101	78.865
Centro Ocidental Paranaense (PR)	49.743	72.792	76.066	51.820	75.830	79.241
Centro Ocidental Rio-grandense (RS)	65.102	78.399	82.043	72.706	87.556	91.626
Centro Oriental Paranaense (PR)	43.909	64.254	67.144	45.963	67.261	70.286
Centro Oriental Rio-grandense (RS)	46.992	56.590	59.221	49.650	59.791	62.570
Centro Sul Baiano (BA)	17.888	23.546	32.817	17.729	23.338	32.526
Centro-Norte Piauiense (PI)	3.544	7.206	7.729	3.934	7.999	8.580
Centro-Sul Cearense (CE)	139	70	82	127	64	75
Centro-Sul Mato-grossense (MT)	8.622	16.389	18.592	12.454	23.673	26.855
Centro-Sul Paranaense (PR)	40.737	59.612	62.294	45.505	66.590	69.585
Distrito Federal (DF)	8.056	13.274	7.028	9.101	14.996	7.940
Extremo Oeste Baiano (BA)	109.428	144.043	200.752	132.522	174.442	243.120
Grande Florianópolis (SC)	3.550	2.500	2.923	5.531	3.895	4.554
Itapetininga (SP)	60.363	35.374	53.880	91.555	53.653	81.722
Jaguaribe (CE)	297	149	175	351	175	206
Jequitinhonha (MG)	10.956	7.568	9.440	11.579	7.999	9.977

(continua)

(continuação)

Mesorregião/Nutriente (Ano)	N (2018)	P (2018)	K (2018)	N (2028)	P (2028)	K (2028)
Leste Alagoano (AL)	20.028	9.120	17.462	21.102	9.609	18.399
Leste de Mato Grosso do Sul (MS)	34.557	54.552	60.510	46.305	73.098	81.080
Leste Goiano (GO)	56.543	82.364	77.069	61.635	89.782	84.011
Leste Maranhense (MA)	8.621	17.790	18.296	10.417	21.497	22.107
Leste Potiguar (RN)	3.944	2.590	3.476	4.256	2.795	3.751
Leste Rondoniense (RO)	12.948	20.134	17.579	16.661	25.908	22.620
Leste Sergipano (SE)	10.871	8.128	3.753	11.532	8.622	3.981
Litoral Norte Espírito-santense (ES)	24.049	7.700	18.773	22.809	7.303	17.805
Litoral Sul Paulista (SP)	3.012	1.765	2.689	3.297	1.932	2.943
Macro Metropolitana Paulista (SP)	10.255	6.009	9.153	16.271	9.535	14.524
Madeira-Guaporé (RO)	1.772	2.756	2.406	5.843	9.086	7.933
Marajó (PA)	1.257	2.130	2.281	2.930	4.967	5.320
Marília (SP)	16.134	9.455	14.401	18.780	11.006	16.763
Mata Paraibana (PB)	4.536	1.900	4.909	4.328	1.813	4.684
Mata Pernambucana (PE)	10.836	5.230	10.763	10.410	5.024	10.339
Metropolitana de Belém (PA)	800	1.355	1.452	1.315	2.230	2.388
Metropolitana de Belo Horizonte (MG)	6.392	4.415	5.508	6.199	4.282	5.341
Metropolitana de Curitiba (PR)	19.522	28.567	29.852	23.419	34.270	35.812
Metropolitana de Fortaleza (CE)	80	40	47	64	32	37
Metropolitana de Porto Alegre (RS)	35.596	42.867	44.859	41.907	50.467	52.813
Metropolitana de Recife (PE)	2.113	1.020	2.099	1.885	910	1.872
Metropolitana de Salvador (BA)	1.477	1.945	2.711	1.554	2.046	2.851
Metropolitana de São Paulo (SP)	836	490	746	1.417	830	1.265
Metropolitana do Rio de Janeiro (RJ)	1.174	700	970	1.259	751	1.041
Nordeste Baiano (BA)	12.510	16.467	22.950	15.609	20.547	28.636
Nordeste Mato-grossense (MT)	88.629	168.465	191.109	125.468	238.487	270.544
Nordeste Paraense (PA)	8.580	14.541	15.575	10.953	18.564	19.884
Nordeste Rio-grandense (RS)	42.915	51.681	54.083	48.441	58.335	61.047
Noroeste Cearense (CE)	1.054	527	618	1.221	611	717
Noroeste de Minas (MG)	96.453	66.625	83.108	109.548	75.671	94.391
Noroeste Espírito-santense (ES)	20.360	6.519	15.892	18.540	5.936	14.472
Noroeste Fluminense (RJ)	2.044	1.219	1.690	1.969	1.175	1.628
Noroeste Goiano (GO)	8.757	12.757	11.936	12.628	18.395	17.212
Noroeste Paranaense (PR)	39.420	57.685	60.279	42.614	62.359	65.164
Noroeste Rio-grandense (RS)	278.996	335.982	351.599	287.607	346.351	362.450
Norte Amazonense (AM)	45	27	58	232	141	295
Norte Catarinense (SC)	31.398	22.111	25.854	39.469	27.795	32.500
Norte Cearense (CE)	985	492	578	1.006	503	591
Norte Central Paranaense (PR)	82.577	120.839	126.274	88.869	130.047	135.896

(continua)

(continuação)

Mesorregião/Nutriente (Ano)	N (2018)	P (2018)	K (2018)	N (2028)	P (2028)	K (2028)
Norte de Minas (MG)	31.486	21.749	27.130	37.128	25.646	31.991
Norte de Roraima (RR)	672	1.272	798	1.032	1.952	1.225
Norte do Amapá (AP)	90	302	347	104	347	397
Norte Fluminense (RJ)	3.323	1.983	2.748	2.238	1.335	1.851
Norte Goiano (GO)	14.054	20.471	19.155	19.482	28.379	26.554
Norte Maranhense (MA)	2.781	5.740	5.903	2.086	4.305	4.427
Norte Mato-grossense (MT)	376.076	714.837	810.923	464.475	882.866	#####
Norte Piauiense (PI)	2.314	4.705	5.047	2.563	5.212	5.591
Norte Pioneiro Paranaense (PR)	45.717	66.901	69.910	50.111	73.330	76.629
Ocidental do Tocantins (TO)	29.935	64.359	65.015	58.418	125.597	126.876
Oeste Catarinense (SC)	57.946	40.807	47.714	66.870	47.092	55.063
Oeste de Minas (MG)	30.514	21.078	26.292	33.932	23.439	29.237
Oeste Maranhense (MA)	5.853	12.079	12.422	22.504	46.440	47.758
Oeste Paranaense (PR)	81.767	119.653	125.035	84.637	123.854	129.425
Oeste Potiguar (RN)	1.818	1.194	1.602	3.145	2.065	2.771
Oriental do Tocantins (TO)	22.655	48.707	49.203	30.040	64.584	65.242
Pantaneais Sul Mato-grossense (MS)	2.080	3.284	3.643	3.983	6.288	6.975
Piracicaba (SP)	30.936	18.129	27.614	34.947	20.480	31.194
Presidente Prudente (SP)	52.079	30.519	46.485	52.947	31.028	47.261
Ribeirão Preto (SP)	150.845	88.399	134.644	159.368	93.393	142.252
São Francisco Pernambucano (PE)	1.417	684	1.407	2.450	1.182	2.433
São José do Rio Preto (SP)	103.182	60.467	92.100	113.233	66.357	101.072
Serrana (SC)	28.767	20.258	23.687	39.244	27.636	32.314
Sertão Alagoano (AL)	731	333	637	848	386	739
Sertão Paraibano (PB)	1.715	718	1.856	3.140	1.315	3.398
Sertão Pernambucano (PE)	3.983	1.922	3.956	4.589	2.215	4.558
Sertão Sergipano (SE)	6.244	4.668	2.155	6.651	4.973	2.296
Sertões Cearenses (CE)	864	432	507	1.159	579	680
Sudeste Mato-grossense (MT)	92.320	175.480	199.068	100.954	191.891	217.684
Sudeste Paraense (PA)	23.057	39.078	41.858	48.484	82.174	88.018
Sudeste Paranaense (PR)	32.595	47.698	49.843	37.664	55.115	57.594
Sudeste Piauiense (PI)	3.800	7.728	8.289	5.863	11.922	12.788
Sudeste Rio-grandense (RS)	52.442	63.153	66.088	74.879	90.173	94.364
Sudoeste Amazonense (AM)	99	60	126	88	54	113
Sudoeste de Mato Grosso do Sul (MS)	124.108	195.917	217.312	146.485	231.242	256.494
Sudoeste Mato-grossense (MT)	15.964	30.344	34.422	22.548	42.858	48.619
Sudoeste Paraense (PA)	4.281	7.256	7.772	10.153	17.209	18.432
Sudoeste Paranaense (PR)	33.193	48.573	50.758	35.562	52.040	54.381
Sudoeste Piauiense (PI)	26.441	53.768	57.673	32.467	66.022	70.818

(continua)

(continuação)

Mesorregião/Nutriente (Ano)	N (2018)	P (2018)	K (2018)	N (2028)	P (2028)	K (2028)
Sudoeste Rio-grandense (RS)	74.255	89.422	93.578	91.300	109.948	115.059
Sul Amazonense (AM)	245	149	312	309	187	394
Sul Baiano (BA)	24.183	31.832	44.365	24.811	32.659	45.517
Sul Catarinense (SC)	15.693	11.051	12.922	17.409	12.260	14.335
Sul Cearense (CE)	357	179	210	339	170	199
Sul de Roraima (RR)	168	317	199	114	215	135
Sul do Amapá (AP)	580	1.938	2.221	1.401	4.683	5.369
Sul Espírito-santense (ES)	22.043	7.058	17.207	21.405	6.854	16.708
Sul Fluminense (RJ)	326	195	270	358	213	296
Sul Goiano (GO)	285.779	416.286	389.524	322.358	469.569	439.381
Sul Maranhense (MA)	33.207	68.528	70.474	38.817	80.103	82.378
Sul/Sudoeste de Minas (MG)	144.053	99.506	124.123	163.456	112.908	140.841
Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG)	265.003	183.053	228.339	302.649	209.057	260.776
Vale do Acre (AC)	291	325	193	257	286	170
Vale do Itajaí (SC)	16.080	11.324	13.241	17.996	12.673	14.819
Vale do Juruá (AC)	173	192	115	181	202	120
Vale do Mucuri (MG)	2.486	1.717	2.142	3.132	2.164	2.699
Vale do Paraíba Paulista (SP)	2.456	1.439	2.192	3.575	2.095	3.191
Vale do Rio Doce (MG)	23.103	15.959	19.907	23.522	16.248	20.268
Vale São-Franciscano da Bahia (BA)	3.810	5.016	6.990	9.390	12.361	17.227
Zona da Mata (MG)	60.436	41.746	52.074	59.267	40.939	51.067

Fonte: Elaborado pelo autor.