

Universidade Estadual de Maringá
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Produção

**Estudo da Localização de Armazéns Intermodais para
Escoamento da Produção de Soja Para Exportação no
Estado do Paraná**

Bruno Anghinoni

Maringá - Paraná
Brasil

Universidade Estadual de Maringá
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Produção

Estudo da Localização de Armazéns Intermodais para
Escoamento da Produção de Soja Para Exportação no Estado do
Paraná

Bruno Anghinoni

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de
Engenharia de Produção, do Centro de Tecnologia, da
Universidade Estadual de Maringá.
Orientadora: Prof^a. Márcia Samed

**Maringá - Paraná
2015**

RESUMO

A produção de soja possui enorme relevância para o setor agroindustrial brasileiro, que figura como um dos maiores produtores mundiais. Naturalmente, a produção elevada requer uma boa estrutura logística para seu escoamento, em especial para o acesso aos grandes portos marítimos para exportação. Dentro desse cenário, o estado do Paraná possui grande destaque nacional, pois apresenta uma grande produção de soja, uma extensa malha ferroviária e o porto de Paranaguá, que é uma das grandes vias nacionais de exportação do grão. Este trabalho utiliza métodos de Pesquisa Operacional para analisar as melhores localizações para instalação de armazéns intermodais para otimização do escoamento da produção de soja para exportação no porto de Paranaguá. Através da construção de um modelo matemático, um problema de programação inteira mista é descrito, onde o objetivo é a minimização dos custos totais para o transporte de toda a produção de soja do estado do Paraná até o porto citado. Para isso, são considerados modos de transporte puramente rodoviários, puramente ferroviários, e um modo combinado, que utiliza primeiramente o transporte rodoviário até um dos armazéns, e posteriormente transporte ferroviário do armazém para o porto. Os casos são avaliados em termos do *payback* simples, onde o retorno do investimento da instalação de armazéns adicionais é analisado.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional; Logística; Soja.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Justificativa.....	2
1.2	Definição e delimitação do problema.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo geral.....	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.4	Organização do Trabalho.....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	O Problema de Localização de Instalações.....	6
2.1.1	Problemas de Medianas.....	7
2.1.2	Problemas de Cobertura.....	8
2.1.3	Problemas Centrais.....	9
2.1.4	Formulações de Problemas Adicionais.....	10
2.2	Soluções Computacionais.....	11
2.3	Pesquisa Bibliométrica.....	12
3	Metodologia.....	16
4	Desenvolvimento.....	18
4.1	Distribuição da produção de soja no Paraná.....	18
4.2	Concessões Ferroviárias.....	19
4.2.1	Concessão ALLMS.....	20
4.2.2	Concessão FERROESTE.....	21
4.3	Malha Rodoviária.....	21
4.4	Armazéns Intermodais.....	23
4.5	Modelagem.....	25
4.6	Implementação.....	30
4.7	Resultados.....	30
4.7.1	Capacidade Estática.....	30
4.7.2	Capacidade Dinâmica.....	34
5	Conclusões.....	40
	Referências.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia de pesquisa em pesquisa operacional. Fonte: Arenales <i>et al.</i> , 2007 ..	16
Figura 2 – Localização dos núcleos regionais estaduais considerados. Fonte: <i>Google Earth</i> .	19
Figura 3 – Malhas ferroviárias do estado do Paraná. Em amarelo: concessão FERROESTE; em vermelho, concessão ALLMS. Fonte: <i>Google Earth</i>	20
Figura 4 – Mapa rodoviário do Paraná. Fonte: Guia Geográfico Paraná (2015).....	22
Figura 5 – Localização da cidade de Cianorte. Fonte: <i>Google Earth</i>	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos trabalhos selecionados.	13
Tabela 2 – Produção de soja por núcleo regional na safra 2014/15.	18
Tabela 3 – Preços de frete praticado na concessão ALLMS.	21
Tabela 4 – Preços de frete praticado na concessão FERROESTE.	21
Tabela 5 – Preços de frete médios praticados para a soja no modal rodoviário no Paraná.	22
Tabela 6 – Armazéns intermodais já existentes no estado do Paraná.	24
Tabela 7 – Matriz de adjacências para as 21 cidades consideradas. Fonte: do autor.	29
Tabela 8 – Resultados para o cenário estático.	31
Tabela 9 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário estático $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.	32
Tabela 10 – Payback simples para o cenário estático $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.	33
Tabela 11 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário estático $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.	34
Tabela 12 – Payback simples para o cenário estático $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.	34
Tabela 13 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.	35
Tabela 14 – Payback simples para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.	36
Tabela 15 – Fluxo de escoamento da produção no modo misto para o caso $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.	36
Tabela 16 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.	37
Tabela 17 – Payback simples para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.	38
Tabela 18 – Fluxo de escoamento da produção no modo misto para o caso $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ALLMS	América Latina Logística Malha Sul
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COPPEAD	Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro
DERAL	Departamento de Economia Rural
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo
FERROESTE	Estrada de Ferro Paraná Oeste
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
MRP	<i>Manufacturing Resource Planning</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
SIFRECA	Sistema de Informações de Fretes

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é um grão oleaginoso originário na China, e foi introduzida no Brasil no fim do século XIX, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2007). Dentro das grandes culturas de grãos, a produção da soja foi a que mais cresceu relativamente entre 1970 e 2007, tanto no Brasil quanto no mundo. A soja tem sido o quarto grão mais consumido e produzido globalmente (atrás de milho, trigo e arroz), e foi a principal oleaginosa cultivada no mundo na safra de 2012/2013, com 284 milhões de toneladas produzidas (EMBRAPA, 2014a). Seu elevado teor de proteínas (cerca de 40%) a torna a principal matéria prima na fabricação de rações para animais domésticos, além de também possuir grande destaque na produção de óleo vegetal. Em 2012, as exportações de soja lideraram o setor agroindustrial brasileiro, correspondendo a 31% dos US\$ 100 bilhões gerados pelo setor (EMBRAPA, 2014b).

Em 2013, a área destinada ao cultivo de soja no Brasil foi de quase 30 milhões de hectares, com uma produção superior a 90 milhões de toneladas. O estado do Paraná se destaca nesse cenário, possuindo cerca de 9,5 milhões de hectares cultivados e produção de 35,7 milhões de toneladas aproximadamente, ficando atrás apenas do estado do Mato Grosso em ambos os quesitos segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2013).

O estado do Paraná, no entanto, possui uma estrutura logística muito mais adequada ao escoamento da produção do que o estado do Mato Grosso, uma vez que possui uma malha ferroviária considerável e a presença do porto de Paranaguá, localizado no leste do estado. As estimativas para 2015 prevêem cerca de 8 milhões de toneladas de soja exportados através desse porto, figurando como o segundo maior porto nacional em volume de exportações de soja, junto ao porto de Rio Grande e atrás do porto de Santos (CAETANO, 2015; BORGES, 2015). Dessa quantidade exportada, cerca de 72% é proveniente da produção do próprio Paraná (LIMA, 2012).

O estudo da localização para instalação de armazéns intermodais (rodoviário/ferroviário) para o escoamento da produção de soja do Paraná através do porto de Paranaguá é o tema deste trabalho. A análise envolve diversas variáveis, como custos de instalação local, produção anual por macro-região, mapeamento das malhas rodoviárias e

ferroviárias, custos de frete por modal, entre outros. Dessa forma, uma abordagem envolvendo pesquisa operacional será desenvolvida, utilizando conceitos de modelagem e programação linear.

1.1 Justificativa

O diagnóstico sobre a infraestrutura logística nacional (COPPEAD, 2002) indica que problemas relacionados a deficiências na regulação do custo de capital elevado e nas políticas de investimento dos governos levaram o Brasil a uma dependência demasiadamente grande do modal rodoviário. Essa dependência, por sua vez, torna-se um problema ainda maior quando se consideram as dimensões continentais do país, uma vez que o transporte rodoviário possui, em geral, baixa produtividade, pequena eficiência energética, alto índice de emissão de poluentes e baixo nível de segurança (OLIVEIRA e CAIXETA FILHO, 2007). Por exemplo, estima-se que na safra de 2012/2013 o estado do Mato Grosso tenha perdido mais de R\$ 20 milhões apenas com perdas oriundas do transporte rodoviário (BORGES *et al.*, 2013). Dessa forma, uma maior valorização do modal ferroviário poderia constituir um potencial fator para a redução desse tipo de perda, uma vez que ele possui maior capacidade, menor custo de transporte e maior segurança segundo o Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPEAD, 2002).

A integração entre os modais ferroviários e rodoviários se dá através de armazéns intermodais, que recebem a carga por meio rodoviário e a escoam por meio ferroviário. A utilização de armazéns, de modo geral, também oferece vantagens, pois com ela é possível comercializar o grão em momento economicamente mais oportuno – isto é, quando os preços arbitrariamente estiverem mais favoráveis à venda.

O Brasil é o atualmente o segundo maior exportador mundial de soja, onde o estado do Paraná figura como o segundo estado nacional com maior produção do grão. A malha ferroviária existente no estado atualmente é de cerca de 2000 km¹ (Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, 2015a), e o porto de Paranaguá, localizado no leste do estado, corresponde a uma das maiores vias finais de exportação do grão no Brasil (LIMA, 2012). Dessa forma, um estudo das possibilidades de localização para implantação de armazéns intermodais no estado do Paraná para o escoamento da produção da soja se mostra relevante no contexto econômico e logístico estadual.

¹ Valor estimado a partir do mapa existente na página citada na referência.

1.2 Definição e delimitação do problema

O estudo considerará apenas o escoamento da produção de soja no estado do Paraná. O escoamento da produção proveniente de outros estados não será considerado, mesmo sabendo-se que o porto de Paranaguá absorve a produção de outros estados (LIMA, 2012). Além disso, a capacidade dos armazéns será considerada em dois cenários: no primeiro, será estática (isto é, nenhum efeito temporal será considerado), e no segundo será dinâmica.

A produção de soja poderá chegar ao porto de Paranaguá tanto através de rodovias tanto ferrovias. Os armazéns intermodais poderão se localizar sob qualquer ponto em que haja ao menos uma interseção das malhas rodoviárias e ferroviárias. Dessa forma, consideraremos que caminhões podem escoar a produção de soja tanto diretamente ao porto de Paranaguá quanto descarregá-lo em um dos armazéns, para posterior transporte ferroviário. Os trens, por sua vez, seguirão sempre em direção ao porto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Identificar quais as melhores localizações para a instalação de armazéns de soja intermodais no estado do Paraná considerando o fluxo de escoamento da produção do grão para a exportação no porto de Paranaguá.

1.3.2 Objetivos específicos

- Dividir arbitrariamente toda a área do estado do Paraná em macro-regiões e obter a produção anual de soja em cada uma delas;
- Mapear as principais rotas ferroviárias e rodoviárias de escoamento da produção de soja para exportação até o porto de Paranaguá;
- Pesquisar e definir os preços relevantes em todas as etapas do escoamento da produção, tais como fretes, armazenamento e carregamento;
- Construir o modelo de programação linear para o caso estudado;
- Obter soluções ótimas do modelo construído através de técnicas de pesquisa operacional;

- Realizar variações de cenários convenientes e discussões relacionadas.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho é organizado da seguinte forma: primeiramente, o capítulo 2 traz a revisão de bibliografia, descrevendo o contexto atual e principais trabalhos recentes na área, além de fornecer a teoria básica para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo 3 define a metodologia que será utilizada, como o tipo de pesquisa e os métodos de obtenção dos dados relevantes. O capítulo 4 traz o detalhamento do modelo do construído, bem como os resultados obtidos com sua implementação computacional, mostrando as variações de cenários, discussões e casos relevantes. Por fim, o capítulo 5 trata das conclusões realizadas, considerações finais e perspectivas para eventuais trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O surgimento do termo “pesquisa operacional” está ligado à invenção do radar na Inglaterra em 1934, através de estudos militares de interceptação de aviões inimigos. A análise científica do uso operacional de recursos militares de maneira mais sistemática foi formalmente iniciada cerca de 5 anos depois, com o início da Segunda Guerra Mundial. Após o fim da guerra, a pesquisa operacional se desenvolveu rapidamente na Inglaterra e nos Estados Unidos, com a criação sociedades científicas especializadas e a realização de conferências. No fim da década de 60, a pesquisa operacional foi aplicada a uma variedade de problemas de diversos setores industriais, tais como mineração, construção civil, transportes e metalurgia. Atualmente, existem várias sociedades científicas dedicadas à pesquisa operacional no mundo em países como Alemanha, Canadá e Portugal, além dos já citados Estados Unidos e Inglaterra (ARENALES *et al.*, 2007).

As análises provenientes da pesquisa operacional partem da chamada modelagem do problema. Para Caixeta-Filho (2004), modelos são representações idealizadas para situação do mundo real, e são úteis para aquisição de novos conhecimentos e planejamento e previsões de atividades de uma organização. Quando o problema em questão é descrito matematicamente, obtém-se então o denominado modelo matemático.

Em geral, durante a formulação do modelo matemático, várias simplificações razoáveis do sistema precisam ser consideradas; assim, o modelo matemático corresponde na verdade a uma representação simplificada do problema real. Sua validação dependerá, naturalmente, da coerência dos resultados obtidos quando comparados ao contexto original do problema. Segundo Hillier e Liberman (1995), as fases genéricas de um estudo de Pesquisa Operacional podem ser resumidas em:

- Definição do problema de interessante e obtenção dos dados relevantes;
- Formulação do modelo matemático que representa o problema;
- Desenvolvimento de um procedimento computacional para obtenção das soluções do modelo adotado;
- Testes do modelo e refinamentos, se necessário;
- Preparação para aplicação contínua do modelo como requerido pela gestão;
- Implementação.

Para Andrade (2004), por exemplo, a Pesquisa Operacional pode ser descrita como um conjunto de técnicas quantitativas que auxilia a gerência na preparação e na tomada de decisões. De maneira genérica, a modelagem define as variáveis relevantes ao problema, as restrições existentes e as relações matemáticas que descrevem o comportamento do sistema. A análise usa de técnicas matemáticas e computacionais para resolver esse modelo e observar as conclusões sugeridas. Após isso, cabe ao profissional envolvido a interpretação e análises de cenários convenientes, para, por fim, ocorrer um julgamento e uma decisão final.

Exemplos de modelos matemáticos frequentemente existentes na pesquisa operacional são os de otimização matemática, que envolvem problemas programação linear, programação em redes, programação não-linear, teoria de filas, entre outros (ARENALES *et al.*, 2007; HILLIER e LIEBERMAN, 1995). Mais especificamente, na área de Engenharia de Produção podemos citar situações clássicas onde a pesquisa operacional é comumente utilizada: *Manufacturing Resource Planning* (MRP), Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e problemas de localização de instalações, que serão descritos mais detalhadamente na seção seguinte.

2.1 O Problema de Localização de Instalações

O problema de localização de instalações refere-se genericamente à decisão de onde construir unidades de serviços arbitrários – como por exemplo armazéns, fábricas e escolas -, a fim de cumprir diversos objetivos estratégicos de uma organização (PIZZOLATO *et al.*, 2012). Ele é considerado estratégico pois seus efeitos geralmente ocorrem apenas a médio e longo prazo, além de frequentemente demandarem grandes investimentos. Segundo Cunha (2006), uma má escolha de uma localização pode gerar inúmeras consequências negativas para a organização, como baixo uso de recursos e limitação da qualidade dos serviços. Jabbarzadeh *et al.* (2012) afirmam que no meio competitivo atual as decisões relacionadas ao design de cadeias de suprimentos - como a localização das instalações - são naturalmente estratégicas e de difícil mudança, representando assim um fator crítico para a organização.

Vários fatores podem ser simultaneamente relevantes para o planejamento de uma organização, tais como área de cobertura, custos de transporte, tempo de entrega, entre outros (BALLOU, 2009). Dada a grande variedade de parâmetros, existe uma vasta literatura tratando de problemas de localizações de maneira geral; tanto a modelagem matemática quanto as técnicas de soluções computacionais foram – e ainda são – largamente estudadas no cenário atual. Como exemplo, pode-se observar aplicações recentes em áreas como tráfego urbano

(KHAKBAZ *et al.*, 2012), construção civil (GALAN *et al.*, 2013), instalações emergenciais (XI *et al.*, 2013) e sistemas de saúde (BELIËN *et al.*, 2013).

Nesta seção, será descrita a modelagem matemática que servirá de base para o trabalho. Para referências, são recomendadas aqui a extensa revisão de problemas de localização de ReVelle *et al.* (2008) e os trabalhos de Owen e Mark (1998) e Daskin (1995).

2.1.1 Problemas de Medianas

Uma maneira bastante intuitiva de avaliar a eficácia da localização de uma planta é minimizar a distância percorrida pelos agentes que ela visitam. Essa abordagem é comumente relacionada a, por exemplo, escolas e centros de emergências, onde a proximidade é um fator de grande importância.

Para o modelagem matemática de um problema típico de medianas, tem-se:

Variáveis de Entrada:

i : índice do nó gerador da demanda;

j : índice do local de instalação em potencial considerado;

h_i : demanda no i -ésimo nó;

d_{ij} : distância entre os nós;

P : número de plantas a serem alocadas.

Variáveis de decisão:

x_j : variável binária que denota a utilização ($x_j = 1$) ou não ($x_j = 0$) do local de instalação j ;

y_{ij} : variável binária que denota se as demandas localizadas em i são ($y_{ij} = 1$) ou não ($y_{ij} = 0$) atendidas por uma planta localizada em j .

Com essas definições, o denominado “problema de P-mediana” pode ser escrito na seguinte forma:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i \sum_j h_i d_{ij} y_{ij},$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_j x_j &= P, \\ \sum_j y_{ij} &= 1, \quad \forall i, \\ y_{ij} - x_j &\leq 0, \quad \forall i, j, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_j &\in \{0,1\}, & \forall j, \\y_{ij} &\in \{0,1\}, & \forall i,j.\end{aligned}$$

A função objetivo Z corresponde, naturalmente, a minimizar a distância ponderada em as viagens. A segunda restrição requer que P plantas sejam alocadas. A terceira restrição assegura que todas as demandas sejam atendidas por uma (e somente uma) planta, enquanto a quarta restrição permite atendimento apenas por nós onde de fato foram localizadas plantas. As duas últimas restrições tratam meramente da natureza binária das variáveis x_j e y_{ij} .

2.1.2 Problemas de Cobertura

A modelagem dos problemas de P-mediana apresentam uma abordagem bastante ampla e é aplicável a vários casos típicos existentes. No entanto, existem problemas em que a média das distâncias percorridas pode não ser apropriada. Por exemplo, a localização de corpos de bombeiros e ambulâncias normalmente requer uma possibilidade de resposta rápida, de modo que é mais conveniente a avaliação da distância máxima percorrida pelos agentes, ao invés de sua média. Esse tipo de problema é denominado “problema de cobertura”, pois é necessário avaliar se uma demanda poderá ser “coberta” (isto é, atendida) dentro de um tempo máximo especificado.

Segundo a modelagem matemática, devemos minimizar o custo de instalação de uma planta de modo que um nível mínimo de cobertura seja atingido. Para tanto, utilizamos a formulação introduzida na seção anterior, com a adição dos seguintes notações:

Variáveis de entrada:

c_j : custo fixo da instalação de uma planta na localidade j ;

S : tempo máximo aceito para o recebimento do serviço (ou distância);

N_i : conjunto de localidades de plantas j dentro do tempo aceitável.

Dessa forma, o problema de cobertura pode ser descrito por:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_j c_j x_j,$$

sujeito a:

$$\begin{aligned}\sum_{j \in N_i} x_j &\geq 1, & \forall i, \\x_j &\in \{0,1\}, & \forall j.\end{aligned}$$

A função objetivo Z minimiza o custo de alocação das plantas. Se todos os custos c_j forem assumidos idênticos, o problema passa então a meramente corresponder a minimização da quantidade de plantas alocadas.

Em muitos casos práticos, no entanto, a quantidade de recursos disponíveis para a alocação de várias plantas é insuficiente. Nesse caso, o apropriado é avaliar a máxima cobertura que pode ser conseguida através da alocação de um número pré-determinado de plantas. Essa variação do problema se denomina “problema de cobertura máxima”, e requer a introdução de variáveis adicionais:

w_i : variável binária que denota se o i -ésimo nó foi coberto ($z_i = 1$) ou não ($z_i = 0$).

Mantendo a notação já utilizada, o problema de cobertura máxima pode então ser descrito pelo seguinte modelo:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_i h_i w_i,$$

sujeito a:

$$w_i \leq \sum_{j \in N_i} x_j, \quad \forall i,$$

$$\sum_j x_j \leq P,$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j,$$

$$w_i \in \{0,1\}, \quad \forall i.$$

O objetivo é maximizar a quantidade de demanda coberta. A primeira restrição determina quais nós de demanda serão cobertos dentro do tempo de serviço aceitável. Cada nó i pode ser considerado coberto se existe uma planta localizada em algum local j que se encontra a um tempo de deslocamento S do nó i . A segunda restrição limita o número de plantas que podem ser alocadas, e está relacionada a limitação de recursos. As duas últimas restrições denotam a natureza binária das variáveis x_j e w_i .

2.1.3 Problemas Centrais

Uma outra maneira de lidar com problemas de cobertura com limites de recursos é adotar a abordagem descrita nos chamados “problemas P-centros”. Em tais problemas, é requerida a cobertura de todas as demandas, mas procura-se localizar um dado número de

plantas de tal modo que a distância de cobertura seja minimizada. Ao invés de considerar uma cobertura inicial S , esse modelo determina a distância mínima de cobertura associada a alocação de P plantas. O problema P-centros também é conhecido como o problema *minimax*, pois procura-se minimizar a máxima distância entre qualquer local de demanda e sua planta mais próxima.

Para a modelagem matemática, a notação das seções anteriores ainda é utilizada, com a adição de uma variável de decisão:

D : máxima distância entre um nó qualquer de demanda e sua planta mais próxima.

O problema é escrito então por:

$$\text{Minimizar } Z = D$$

sujeito a

$$\begin{aligned} \sum_j x_j &= P, \\ \sum_j y_{ij} &= 1, \quad \forall i, \\ y_{ij} - x_j &\leq 0, \quad \forall i, j, \\ D &\geq \sum_j d_{ij} y_{ij}, \quad \forall i, \\ x_j &\in \{0,1\}, \quad \forall j, \\ y_{ij} &\in \{0,1\}, \quad \forall i, j. \end{aligned}$$

A função objetivo busca minimizar a máxima distância entre qualquer nó de demanda e sua planta mais próxima. A quarta restrição define D , de acordo com a localização dos nós de demanda i e da planta mais próxima j . O restante das restrições é idêntica ao caso P-mediana.

2.1.4 Formulações de Problemas Adicionais

Os problemas de P-medianas, cobertura e P-centros foram descritos até aqui de maneira simples e genérica, para que possam fornecer uma fundamentação básica para a teoria existente para a formulação de problemas de localização. Através de simples alterações, problemas muitos mais complexos podem ser também descritos a partir desses três problemas básicos.

Um exemplo típico mais complexo pode ser formulado através da adição de um custo fixo à função objetivo do modelo P-mediana - que representará nesse caso um custo de instalação da planta -, e da remoção da restrição relacionada ao número de plantas. O resultado

é um problema que determina o número de plantas a serem alocadas e suas localizações de modo que o custo total (viagens + instalações) seja minimizado.

Uma outra alteração possível e bastante comum é a incorporação de capacidades às plantas. Nesse caso, capacidades limites são estabelecidas ao número de demandas que cada planta pode atender. Através de restrições adicionais à formulação do problema, é requerido que a soma das demandas atribuídas a cada planta não exceda sua capacidade.

Além dos modelos descritos, existem ainda na literatura outras vertentes de modelagem matemática para descrição e estudo de problemas de localização, como por exemplo os modelos de Lógica *Fuzzy* (ver por exemplo o trabalho de Ashrafzadeh *et al.*, 2012), modelos de Localização Dinâmica (ARABANI E FARAHANI, 2012) e modelos de Localização Estocástica (OWEN E MARK, 1998). Por fim, a revisão de Farahani *et al.* (2012) apresenta um resumo dos desenvolvimentos recentes em problemas de localização multi-critérios.

2.2 Soluções Computacionais

A abordagem inicial mais natural e direta para a solução de um problema computacional, em geral, é a abordagem determinística. Nesse tipo de abordagem, dado um conjunto de variáveis de entrada, os resultados obtidos na saída serão sempre os mesmos (isto é, os resultados são determinados exclusivamente pelos dados de entrada, não ocorrendo nenhum processo probabilístico). Um exemplo específico de um método determinístico aplicado a um problema de localização pode ser encontrado no trabalho de Abounacer *et al.* (2014).

De maneira geral, no entanto, a possibilidade de um número enorme de variáveis dentro dos modelos de programação da Pesquisa Operacional requer normalmente a implementação de algoritmos não determinísticos para obtenção de soluções viáveis. Os problemas de localização, em particular, também seguem essa tendência. Uma grande variedade de problemas de localização, por exemplo, foram provados não possuir solução ótima alcançável em um tempo computacional razoável (MLADENOVIC *et al.*, 2007). Dessa forma, é comum a recorrência a métodos denominados heurísticos, que são capazes de fornecer rapidamente uma solução (e as vezes até mesmo a solução ótima), mas sem nenhuma prova de sua otimalidade.

A idéia básica de um método heurístico é gerar uma solução possível inicialmente e melhorá-la através de um algoritmo cujo critério de parada seja totalmente arbitrário. Nesse contexto, métodos heurísticos genéricos, geralmente denominados *metaheurísticas*, se desenvolveram de maneira notável nas últimas décadas. Elas fornecem uma maneira geral de

se construir heurísticas para os mais variados problemas de otimização. A seção a seguir cita vários exemplos recentes de trabalhos onde esses métodos foram aplicados.

2.3 Pesquisa Bibliométrica

Uma pesquisa bibliométrica foi realizada com o objetivo de avaliar a literatura atual existente sobre o problema de localização. Para isso, o portal digital *Google Acadêmico* foi utilizado. O termo em inglês “*facilities location*” foi o escolhido para a realização das buscas, onde foram considerados os artigos mais relevantes nos últimos 5 anos, isto é, de 2010 até 2015. Foram selecionados apenas trabalhos referentes a pesquisas aplicadas – revisões e pesquisas puramente teóricas foram ignoradas.

Podemos classificar os problemas de localização de diversas maneiras, como por exemplo:

1. Quanto a característica das instalações:
 - a. Único nível hierárquico;
 - b. Múltiplos níveis hierárquicos;
 - c. Instalações competitivas;
 - d. Setor público;
 - e. Setor privado.
2. Quanto às informações sobre a demanda:
 - a. Demanda estocástica;
 - b. Demanda determinística.
3. Quanto ao horizonte temporal:
 - a. Estático;
 - b. Dinâmico.
4. Quanto à função objetivo:
 - a. Objetivo único;
 - b. Múltiplos objetivos.
5. Quanto ao modelo adotado:
 - a. P-mediana;
 - b. P-centros;
 - c. Cobertura.
6. Quanto ao método de solução:

- a. Heurísticos;
- b. Metaheurísticas;
- c. Determinísticos;
- d. Multicritérios.

A Tabela 1 mostra os 21 trabalhos selecionados e algumas de suas principais características, de acordo com alguns dos critérios de classificação citados. Cabe lembrar que essas classificações são meramente para fins de organização, pois, na realidade, cada problema requer geralmente uma abordagem bastante específica, contemplando tanto alterações nas metodologias básicas quanto o uso conjunto de mais uma técnica.

Tabela 1 – Classificação dos trabalhos selecionados.

TÍTULO	AUTORES	ANO	FUNÇÃO OBJETIVO	MODELO	MÉTODO DE SOLUÇÃO
<i>A location-allocation model for service providers with application to not-for-profit health care organizations</i>	Siddhartha S.Syama; Murray J.Côté	2010	Objetivo único	P-mediana	Metaheurística
<i>A hierarchical approach to modeling hurricane disaster relief goods distribution</i>	Michael J. Widener; Mark W. Horner.	2011	Objetivo único	P-mediana	Heurística
<i>Combined simulated annealing algorithm for the discrete facility location problem</i>	Jin Qin; Ling-lin Ni; Feng Shi.	2012	Objetivo único	P-mediana	Metaheurística
<i>Biofuel refinery location and supply chain planning under traffic congestion</i>	Yun Bai <i>et al.</i>	2012	Objetivo único	P-mediana	Heurística
<i>Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system</i>	Arifa Sultana; Amit Kumar	2012	Objetivo único	P-mediana	Heurística e Metaheurística
<i>Ant colony optimization algorithm for the Euclidean location-allocation problem with unknown number of facilities</i>	Jean-Paul Arnaout	2013	Objetivo único	P-mediana	Metaheurística
<i>A Modified p-Median Model for the Emergency Facilities Location Problem and Its Variable Neighbourhood Search-Based Algorithm</i>	Menghao Xi <i>et al.</i>	2013	Objetivo único	P-mediana	Heurística
<i>Facility location under demand uncertainty: Response to a large-scale</i>	Pavankumar Murali; Fernando	2012	Objetivo único	Cobertura	Heurística

<i>bio-terror attack</i>	Ordóñez; Maged M. Dessouky.				
<i>Designing a supply chain network under the risk of disruptions</i>	Armin Jabbarzadeh <i>et al.</i>	2012	Objetivo único	Não-linear	Heurística e Metaheurística
<i>A combined facility location and network design problem with multi-type of capacitated links</i>	Ragheb Rahmaniani; Abdolsalam Ghaderi.	2013	Objetivo único	P-mediana	Heurística
<i>Optimizing the facility location design of organ transplant centers</i>	Jeroen Beliën <i>et al.</i>	2013	Objetivo único	P-mediana	Heurística
<i>Capacitated location-routing problem with time windows under uncertainty</i>	Mohammad Zarandi <i>et al.</i>	2013	Múltiplos objetivos	P-mediana	Heurística e Metaheurística
<i>Optimising the spati allocation of urban firestations</i>	Alan T. Murray	2013	Objetivo único	Cobertura	Heurística
<i>The large-scale dynamic maximal covering location problem</i>	Mohammad H. F. Zarandi; Soheil Davari; Seyyed A. H. Sisakht.	2013	Objetivo único	Cobertura	Metaheurística
<i>The center location-dependent relocation problem with a probabilistic line barrier</i>	Mehdi Amiri-Aref <i>et al.</i>	2013	Objetivo único	P-centros	Metaheurística
<i>A swarm intelligence based sample average approximation algorithm for the capacitated reliable facility location problem</i>	Nezir Aydin; Alper Murat	2013	Objetivo único	P-mediana	Metaheurística
<i>A Model for Locating Park-and-Ride Facilities on Urban Networks Based on Maximizing Flow Capture: A Case Study of Isfahan, Iran</i>	Amir Khakbaz; Ali S. Nookabadi; S. Nader Shetab- bushehri	2013	Objetivo único	P-mediana	Metaheurística
<i>Optimisation of the construction and demolition waste management facilities location in Cantabria (Spain) under economical and environmental criteria</i>	Berta Galan <i>et al.</i>	2013	Múltiplos objetivos	P-mediana	Heurística
<i>A new mixed integer linear programming model for the multi-level uncapacitated facility location problem</i>	Jozef Kratka; Djordje Dugošija; Aleksandar Savic.	2014	Objetivo único	P-mediana	Heurística
<i>An exact solution approach for multi-objective location-transportation</i>	Rachida Abounacer; Monia Rekik;	2014	Múltiplos objetivos	P-mediana, Cobertura	Determinístico

<i>Problem for disaster response</i>	Jacques Renaud.				
<i>Optimal wholesale facilities location within the fruit and vegetables supply chain with bimodal transportation options: An LP-MIP heuristic approach</i>	Hamideh Etemadnia <i>et al.</i>	2015	Objetivo único	P-mediana	Heurística

Fonte: do autor.

Como é possível observar, o modelo das p-medianas é dominante entre os trabalhos selecionados. Isso se deve ao fato de ele estar naturalmente ligado aos modelos de minimização de custos (ou maximização de lucros), que são os modelos mais frequentemente encontrados. Quanto aos métodos de solução, observa-se uma distribuição homogênea entre algoritmos heurísticos, metaheurísticas e também técnicas híbridas, que utilizam ambos os métodos.

3 METODOLOGIA

Este trabalho possui caráter de pesquisa quantitativa, isto é, os resultados serão interpretados e analisados de acordo com as premissas adotadas. Os dados relevantes serão principalmente retirados de relatórios anuais dos órgãos e empresas relacionados, como a EMBRAPA e o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Os relatórios possuirão a data mais recente possível, para utilização de dados atualizados.

Será considerada apenas a produção de soja para exportação proveniente do estado do Paraná e escoada no porto de Paranaguá; produções provenientes de outros estados ou produção paranaense escoada em outros portos não serão relevadas. A análise e interpretação dos resultados se dará com base nos princípios da Pesquisa Operacional, considerando eventuais variações no modelo construído e diferentes cenários propostos.

Genericamente, este trabalho consiste na aplicação de modelos matemáticos para descrição de um problema real cujo objetivo é encontrar respostas otimizadas, simular oportunidades e sistematizar o processo de tomada de decisões. Segundo Arenales *et al.* (2007), a metodologia de pesquisa na área de pesquisa operacional envolve basicamente os processos ilustrados na Figura 1.

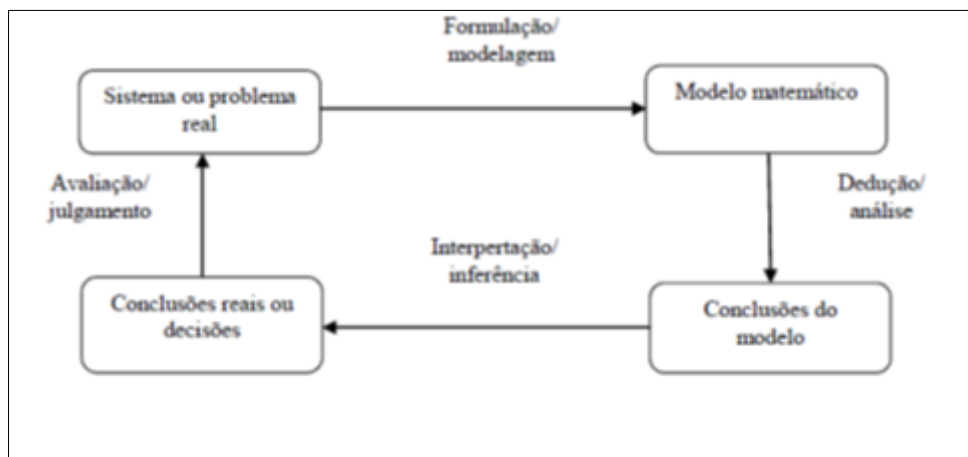


Figura 1 – Metodologia de pesquisa em pesquisa operacional. Fonte: Arenales *et al.*, 2007.

Baseado nessa figura e considerando os objetivos específicos, as seguintes fases serão realizadas durante o trabalho:

- **Fase 1 – Pesquisa bibliográfica:** realizar uma pesquisa bibliográfica e bibliométrica considerando artigos e periódicos dos últimos 5 anos, selecionando os trabalhos mais relevantes;
- **Fase 2 - Obtenção de dados:** identificar e pesquisar todos dados relevantes para o trabalho, como informações geográficas do estado do Paraná, localização das principais malhas ferroviárias e rodoviárias, custo de instalação de armazéns por região, produção de soja por macro-região, custo de fretes em cada modal, entre outros;
- **Fase 3 – Modelagem:** propor um modelo matemático simplificado que seja capaz de descrever o problema escolhido. Testar as soluções e hipóteses preliminares para validação do modelo desenvolvido;
- **Fase 4 – Soluções:** obtenção de soluções ótimas para o modelo desenvolvido. Interpretações das variáveis, construção de diferentes cenários, identificação de oportunidades, discussões em geral.

4 DESENVOLVIMENTO

Nesse capítulo, serão inicialmente descritas todas as informações relevantes para a construção do nosso modelo de otimização, relacionados aos dados das malhas rodoviária e ferroviária e à produção de soja no estado. Posteriormente, o próprio modelo será desenvolvido, segundo as aproximações e considerações que serão adotadas. Por fim, os resultados obtidos com o modelo construído serão mostrados, bem como as análises de cenários e discussões provenientes.

4.1 Distribuição da produção de soja no Paraná

Segundo o Departamento de Economia Rural (DERAL, 2014), a safra de soja de 2014/15 no Paraná totalizou mais de 17 milhões de toneladas, com a produção distribuída em 19 núcleos regionais no estado, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Produção de soja por núcleo regional na safra 2014/15.

Núcleo regional	Produção (t)
Apucarana	402.224
Campo Mourão	2.013.000
Cascavel	1.962.795
Cornélio Procópio	1.135.200
Curitiba	408.254
Francisco Beltrão	839.850
Guarapuava	879.405
Irati	523.413
Ivaiporã	912.240
Jacarezinho	472.500
Laranjeiras do Sul	395.850
Londrina	922.080
Maringá	810.700
Paranavaí	77.735
Pato Branco	990.000

Ponta Grossa	1.894.706
Toledo	1.649.238
Umuarama	557.213
União da Vitória	264.650
TOTAL	17.111.051

Fonte: DERAL (2014).

A localização desses núcleos regionais pelo estado do Paraná é mostrada na Figura 2.



Figura 2 – Localização dos núcleos regionais estaduais considerados. Fonte: *Google Earth*¹.

4.2 Concessões Ferroviárias

A malha ferroviária brasileira é composta por aproximadamente 29 mil quilômetros de ferrovias e teve seu programa de concessão concluído em dezembro de 1998. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é responsável por apenas 1% da malha - o restante está concedido à iniciativa privada, ficando sob responsabilidade da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) fiscalizar e regular as concessionárias.

¹ Disponível gratuitamente na página <<https://www.google.com/earth/>>.

Ao DNIT delega-se as partes de gestão e política, definida pelo Ministério dos Transportes, especialmente nos âmbitos ligados a pesquisas, estudos, elaboração de normas, procedimentos, especificações técnicas, projetos, aos programas de ampliação da capacidade e segurança dos corredores ferroviários, eliminação de interseções, a construção de novas ferrovias, aos programas de expansão e modernização da malha ferroviária e aos projetos especiais de desenvolvimento do setor.

No estado do Paraná, existem duas concessões de ferrovias: a América Latina Logística Malha Sul (ALLMS) e a Estrada de Ferro Paraná Oeste (FERROESTE). As duas se interligam na cidade de Guarapuava. A Figura 3 mostra a malha ferroviária de ambas as concessões: em amarelo a FERROESTE e em vermelho a ALLMS. Além disso, os núcleos regionais produtores de soja (Tabela 2) também são indicados.



Figura 3 – Malhas ferroviárias do estado do Paraná. Em amarelo: concessão FERROESTE; em vermelho: concessão ALLMS. Fonte: *Google Earth*.

4.2.1 Concessão ALLMS

A ALLMS é uma empresa privada e iniciou suas operações em 1997. Dentro do estado do Paraná, sua malha ferroviária possui aproximadamente 2000 km (ANTT, 2015a). Existem interconexões com o porto de Paranaguá e com a ferrovia da FERROESTE, na cidade de

Guarapuava (ver Figura 3). Os preços de frete para a soja praticados nessa concessão são dados pela Tabela 3.

Tabela 3 – Preços de frete praticado na concessão ALLMS.

Parcela Fixa		Parcela Variável				
Valor	Unidade	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Unidade
		0-400 km	401-800 km	801-1600 km	Acima de 1600 km	
16,95	R\$/t	0,10580	0,09526	0,07387	0,05243	R\$/t·km

Fonte: ANTT (2013).

4.2.2 Concessão FERROESTE

A FERROESTE é uma empresa do estado do Paraná que detém a concessão desde 1988. Possui aproximadamente 248 km de malha ferroviária (ANTT, 2015b), partindo da cidade e Cascavel, no oeste do estado, até a cidade de Guarapuava – onde existe uma interconexão com a malha da ALLMS (ver Figura 3). Os preços de frete para soja praticados nessa concessão são dados pela Tabela 4.

Tabela 4 – Preços de frete praticado na concessão FERROESTE.

Parcela Fixa		Parcela Variável				
Valor	Unidade	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Unidade
		0-400 km	401-800 km	801-1600 km	Acima de 1600 km	
9,40	R\$/t	0,0885	0,0797	0,0708	0,0531	R\$/t·km

Fonte: ANTT (2012).

4.3 Malha Rodoviária

Entre administrações federais e estaduais, o estado do Paraná possui atualmente cerca de 2500 km de rodovias, das quais mais de 80% se encontram em estado de conservação de razoável a ótimo (BUENO, 2011). A Figura 4 mostra as principais rodovias existentes no estado do Paraná.



Figura 4 – Mapa rodoviário do Paraná. Fonte: Guia Geográfico Paraná (2015).

Os preços de frete praticados no modal rodoviário foram obtidos do Sistema de Informações de Fretes (SIFRECA), que faz parte da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ). O preço unitário do frete varia de acordo com a distância percorrida, assim como no modal ferroviário. Além disso, esses valores são atualizados semanalmente, pois sofrem grande influência da sazonalidade das safras. Os valores dados na Tabela 5 referem-se à médias obtidas no dia 2/11/2015.

Tabela 5 – Preços de frete médios praticados para a soja no modal rodoviário no Paraná.

Distância (km)	Valor (R\$/t·km)
0-200 km	0,30
201-400 km	0,18
Acima de 401 km	0,15

Fonte: SIFRECA (2015).

4.4 Armazéns Intermodais

As localizações candidatas à instalação dos armazéns intermodais devem, naturalmente, estar ligadas às malhas ferroviárias e rodoviárias simultaneamente. Além disso, também devem potencialmente se localizarem próximas às maiores regiões produtoras de soja. Dessa forma, as 19 cidades que representam os maiores núcleos produtores de soja do estado (Tabela 2) são as possibilidades relevantes mais imediatas. No entanto, 8 dessas 19 cidades não estão atualmente conectadas à malha ferroviária (Figura 3), de modo que devem ser imediatamente descartadas como candidatas: Campo Mourão, Francisco Beltrão, Ivaiporã, Laranjeiras do Sul, Pato Branco, Paranavaí, Toledo e Umuarama. A produção de soja dessas cidades possuirá duas opções para escoamento: transporte rodoviário diretamente ao porto de Paranaguá ou transporte rodoviário intermediário a um dos armazéns intermodais, e posterior transporte ferroviário ao porto.

Além das 11 cidades que permanecem como candidatas, foi introduzida também a cidade de Cianorte. Apesar de ela não possuir produção de soja própria listada na Tabela 2, ela possui uma localização bastante estratégica, pois se encontra no extremo noroeste da malha ALLMS e também está próxima de três núcleos regionais produtores: Campo Mourão, Paranavaí e Umuarama, como pode ser visto na Figura 5.

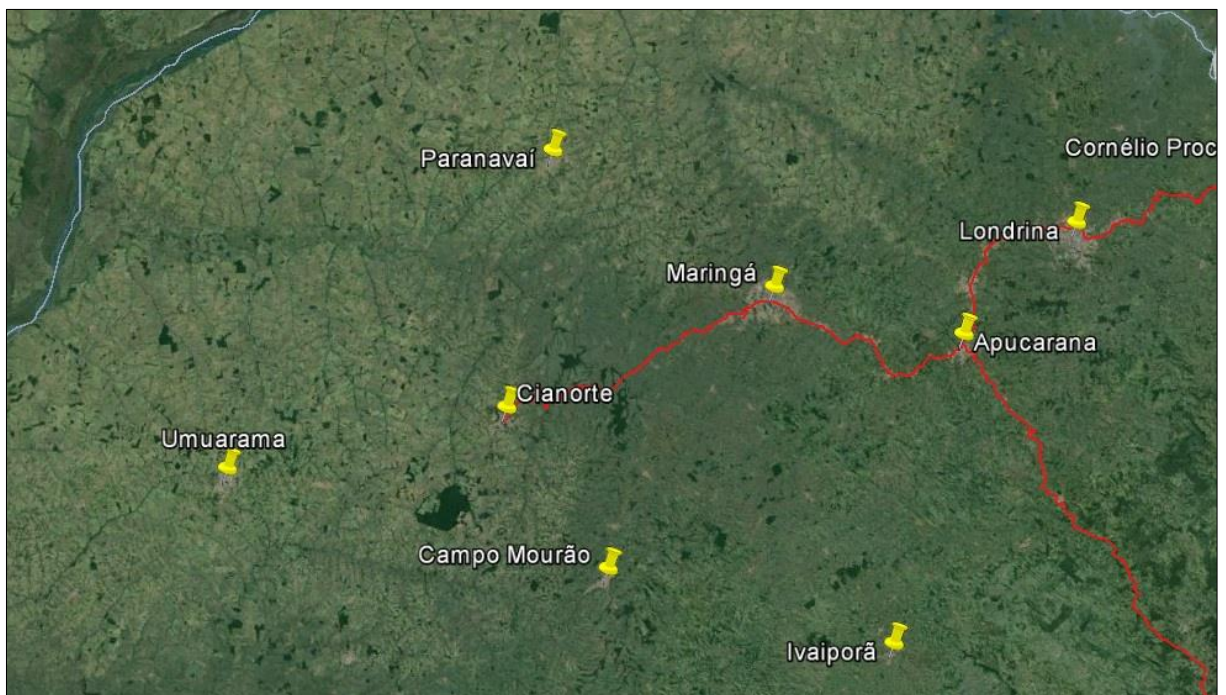


Figura 5 – Localização da cidade de Cianorte. Fonte: *Google Earth*.

Para prever a melhor localização de armazéns intermodais, também consideramos a presença de armazéns já existentes no estado do Paraná. A Tabela 6 mostra as cidades candidatas que já possuem armazéns e também suas capacidades instaladas até o ano de 2011. Deve notar-se que apenas as cidades de fato conectadas à malha ferroviária (isto é, cidades candidatas) foram consideradas - a existência de armazéns em cidades sem conexão com a malha ferroviária foi deliberadamente ignorada, pois, naturalmente, não podem corresponder a armazéns intermodais.

Tabela 6 – Armazéns intermodais já existentes no estado do Paraná.

Cidade	Capacidade Instalada Existente (t)
Ponta Grossa	1.804.390
Maringá	1.278.423
Guarapuava	1.089.789
Cascavel	944.225
Londrina	883.509
Apucarana	406.492
TOTAL	6.406.828

Fonte: adaptado de Bueno (2011). A produção da cidade de Cambé foi adicionada à produção da cidade de Londrina, uma vez que estão separadas por apenas cerca de 10 km.

A colheita da soja se dá tipicamente a partir da metade do mês de Janeiro, terminando no fim do mês de Abril (BUENO, 2011). Assim, existe um intervalo de aproximadamente 100 dias para o escoamento da produção no porto de Paranaguá. Como a capacidade de armazenagem total já existente (Tabela 6) é cerca de 3 vezes menor que a produção total (Tabela 2), é razoável admitir-se inicialmente que a quantidade de armazéns instalados parece suficiente. No entanto, para efeitos de capacidade dinâmica, existem inúmeros outros fatores bastante complexos a serem considerados, tais como o fato de a malha ferroviária obviamente transportar outros produtos, os tempos de trajeto e de carga e descarga, filas operacionais, turnos dos funcionários, número de trens e vagões disponíveis, manutenções nas malhas, entre outros. Dessa forma, dois cenários serão considerados: o primeiro deles com a capacidade estática dos armazéns (isto é, ignorando qualquer efeito temporal), e o segundo deles considerando uma capacidade dinâmica dos armazéns, onde o tempo gasto efetivamente com o escoamento da

produção de soja será estimado em 10%, ou seja, 10 dos 100 dias da colheita da soja serão estimados como efetivamente utilizados no transporte da produção.

Por fim, considerou-se que toda a produção do estado do Paraná será destinada à exportação, mesmo sabendo que o mercado interno deve, naturalmente, absorver uma parcela dela. Os armazéns presentes no porto de Paranaguá foram desconsiderados na Tabela 6, pois estamos interessados apenas na estrutura logística de escoamento da soja até o porto, e não no processo de exportação posterior.

4.5 Modelagem

Feitas as considerações preliminares descritas nas última seções, é possível iniciar o desenvolvimento do modelo matemático a ser utilizado. Este modelo será baseado naquele presente no trabalho de Oliveira & Caixeta Filho (2007), e a notação escolhida também será semelhante.

O objetivo do modelo é determinar as melhores localizações para a instalação de armazéns intermodais para o escoamento de toda a produção de soja do estado do Paraná no porto de Paranaguá. A função objetivo descreve os custos de transporte para o escoamento dessa produção, considerando as possibilidades de deslocamento rodoviárias, ferroviárias ou mistas (rodoviárias + ferroviárias). Os custo de instalação dos armazéns intermodais, em função de suas capacidades, também será considerado – no entanto, nenhum custo operacional será tomado. Matematicamente, tem-se:

$$MIN OBJ = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p c_{i,j} x_{i,j} + \sum_{j=1}^p d_j y_j + \sum_{i=1}^m e_i z_i + \sum_{j=1}^p H_j, \quad (1)$$

onde

OBJ é a função objetivo, e representa os custos totais considerados;

p é o número máximo de armazéns intermodais que poderão ser instalados;

m é o número de cidades a ser considerado;

$c_{i,j}$ é o custo de transporte rodoviário por tonelada entre a cidade i e o armazém instalado na cidade j ;

$x_{i,j}$ é a quantidade em toneladas transportada da cidade i até o armazém instalado na cidade j , por rodovia;

d_j é o custo de transporte ferroviário por tonelada entre o armazém j e o porto de Paranaguá;

y_j é a quantidade em toneladas transportada do armazém j até o porto de Paranaguá, por ferrovia;

e_i é o custo de transporte rodoviário por tonelada entre a cidade i e o porto de Paranaguá;

z_i é a quantidade em toneladas transportada diretamente da cidade i ao porto de Paranaguá, via rodovia;

H_j é o custo de instalação do armazém na cidade j .

As restrições a que estão sujeitas o modelo são:

$$\sum_{j=1}^p x_{i,j} + z_i = S_i, \quad \forall i, \quad (2)$$

onde S_i representa a produção total da cidade i . Essa restrição assegura que toda a produção da região i seja escoada, seja diretamente ao porto por malha rodoviária ou de maneira intermediária através do transporte rodoviário a um armazém existente, e posterior transporte ferroviário. A terceira e última possibilidade de transporte, que seria diretamente ferroviária (caso a cidade possua um armazém), é coberta pela segunda restrição:

$$\sum_{j=1}^p x_{i,j} = y_j, \quad \forall j, \quad (3)$$

que assegura que toda a produção de soja que chegue a um armazém deverá ser escoada via ferrovia.

A terceira restrição refere-se a capacidade dos armazéns:

$$\sum_{j=1}^p x_{i,j} \leq CAP_j + (CAP_{INST} \times B_j), \quad \forall j, \quad (4)$$

onde CAP_j denota a capacidade (em toneladas) dos armazéns já instalados na cidade j (caso existam), CAP_{INST} denota a capacidade (também em toneladas) dos armazéns que podem ser instalados nessa cidade (considerou-se que mais de um armazém pode ser instalado em cada cidade) e B_j corresponde a uma variável inteira que definirá se algum armazém foi de fato instalado na região j e, em caso afirmativo, sua quantidade. Dessa forma, $B_j > 0$ caso ocorra alguma instalação, e $B_j = 0$ caso não ocorra nenhuma instalação. Naturalmente, as cidades não conectadas à malha ferroviária possuirão obrigatoriamente $B_j = 0$.

A variável B_j está relacionada a quantidade total máxima de armazéns p através da quarta restrição:

$$\sum_{j=1}^p B_j \leq p, \quad (5)$$

que meramente define que o somatório dos valores de B_j não deve exceder o número total de armazéns previstos p . Por fim, a quinta restrição refere-se ao escoamento de toda a produção no porto de Paranaguá:

$$\sum_{i=1}^m S_i = \sum_{j=1}^p y_j + \sum_{i=1}^m z_i. \quad (6)$$

O custo H_j de instalação de armazéns na cidade j é dado por

$$H_j = [(125 \times CAP_{INST}) + 8500000]B_j. \quad (7)$$

Essa relação linear foi obtida através de contato direto com especialista da área¹. Por simplicidade, assumiu-se que CAP_{INST} terá o mesmo valor para todos os armazéns.

Os demais custos $c_{i,j}$, d_j e e_i foram descritos inicialmente nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.3. No entanto, é muito difícil compor o custo do frete ferroviário de uma rota que utiliza as duas concessões ferroviárias, uma vez que seus valores de frete são diferentes (Tabelas 3 e 4); assim, considerou-se, por fins de simplicidade, que os custos de frete ferroviários são aqueles praticados pela concessão ALLMS (Tabela 3), uma vez que ela possui cerca de 2000 km de malha ferroviária no estado do Paraná, enquanto a concessão FERROESTE possui apenas cerca de 250 km, como já dito.

Considerando então a existência já descrita de valores diferentes para cada faixa de deslocamento efetuado, obtém-se então as expressões para $c_{i,j}$, d_j e e_i em função das distâncias envolvidas:

$$c_{i,j} = \begin{cases} 0.30 \times dist_{i,j}, & dist_{i,j} \leq 200, \\ 0.30 \times 200 + 0.18 \times (dist_{i,j} - 200), & 200 < dist_{i,j} \leq 400, \\ 0.30 \times 200 + 0.18 \times 400 + 0.15 \times (dist_{i,j} - 400), & dist_{i,j} > 400. \end{cases} \quad (8)$$

$d_j =$

$$\begin{cases} 16,95 + 0.10580 \times dist_{porto_j}, & dist_{porto_j} \leq 400, \\ 16,95 + 0.10580 \times 400 + 0.09526 \times (dist_{porto_j} - 400), & 400 < dist_{porto_j} \leq 800, \\ 16,95 + 0.10580 \times 400 + 0.09526 \times 400 + 0.07387 \times (dist_{porto_j} - 800), & 800 < dist_{porto_j} \leq 1600. \end{cases} \quad (9)$$

¹ Informação obtida através de conversa com engenheiro civil que atua na área de infraestrutura logística.

$$e_i = \begin{cases} 0.30 \times dist_porto_i, & dist_porto_i \leq 200, \\ 0.30 \times 200 + 0.18 \times (dist_porto_i - 200), & 200 < dist_porto_i \leq 400, \\ 0.30 \times 200 + 0.18 \times 400 + 0.15 \times (dist_porto_i - 400), & dist_porto_i > 400. \end{cases} \quad (10)$$

Os termos $dist_{i,j}$ denotam a distância entre as cidades i e j , enquanto os termos $dist_porto_i$ (ou $dist_porto_j$) denotam as distâncias da cidade i (ou j) até o porto de Paranaguá. Todas essas distâncias se encontram na matriz de adjacências, que é dada pela Tabela 7.

Cidades	Apucarana	Campo Mourão	Cascavel	Cianorte	Cornélio Procópio	Curitiba	Francisco Beltrão	Guarapuava	Irati	Ivaiporã	Jacarezinho	Laranjeiras do Sul	Londrina	Maringá	Paranaguá	Paranavaí	Pato Branco	Ponta Grossa	Toledo	Umuarama	União da Vitória
Apucarana	0	105	255	118	94	303	323	206	223	77	159	226	42	49	368	114	319	215	262	190	300
Campo Mourão	105	0	148	48	151	350	236	175	235	79	259	149	147	82	421	107	243	252	241	102	272
Cascavel	255	148	0	165	344	425	130	205	287	199	405	116	295	227	503	232	161	334	37	136	227
Cianorte	118	48	165	0	208	389	269	223	280	117	275	191	153	75	461	66	280	294	159	74	322
Cornélio Procópio	94	201	344	208	0	285	402	263	250	155	68	303	55	135	335	186	397	218	355	278	340
Curitiba	303	350	425	389	284	0	386	221	130	269	259	314	301	348	77	414	352	93	457	449	203
Francisco Beltrão	323	236	130	269	402	386	0	174	250	248	447	97	362	313	458	336	41	311	166	262	198
Guarapuava	206	175	205	223	263	221	174	0	85	128	289	93	232	221	298	273	151	135	239	261	102
Irati	223	235	287	280	250	130	250	85	0	164	263	176	244	260	213	322	216	63	324	332	95
Ivaiporã	77	79	199	117	155	269	248	128	164	0	207	149	114	98	342	155	242	175	220	182	224
Jacarezinho	159	259	405	274	68	259	447	289	263	207	0	349	122	201	299	256	434	214	419	347	357
Laranjeiras do Sul	226	149	116	191	303	314	97	93	176	149	349	0	263	224	390	256	95	230	152	206	159
Londrina	42	147	295	153	55	301	362	232	244	114	122	263	0	80	363	132	358	224	306	226	323
Maringá	49	82	227	75	135	348	313	221	260	98	201	224	80	0	415	66	320	257	232	147	320
Paranaguá	368	421	503	461	335	77	458	298	213	342	299	390	363	415	0	484	422	170	533	523	268
Paranavaí	114	107	232	66	186	414	336	273	322	155	256	256	132	66	484	0	350	322	221	113	373
Pato Branco	319	243	161	280	397	352	41	151	216	242	434	95	358	320	422	350	0	284	199	284	158
Ponta Grossa	215	252	334	294	218	93	311	135	63	175	214	230	224	257	170	322	284	0	365	355	156
Toledo	262	241	37	159	355	457	166	239	324	220	419	152	306	232	533	221	199	365	0	115	314
Umuarama	190	102	136	74	278	449	262	261	332	182	347	206	226	147	523	113	284	355	115	0	356
União da Vitória	300	272	277	322	340	203	198	102	95	224	357	159	323	320	268	373	158	156	314	314	0

Tabela 7 – Matriz de adjacências para as 21 cidades consideradas. Fonte: do autor.

Para a obtenção dessas distâncias, foram consideradas as distâncias cartesianas entre os centros das cidades em questão, de acordo com o software gratuito *Google Earth*; dessa forma, as distâncias são todas subestimadas, uma vez que não consideram as variações de relevo existentes nem as trajetórias curvas presentes nas malhas.

4.6 Implementação

Para implementação do modelo de programação inteira mista descrito na seção anterior utilizamos o software GAMS (*General Algebraic Modeling System*, disponível em <<http://www.gams.com/>>). Ele é amplamente utilizado para otimização matemática de problemas lineares, não-lineares e mistos. As soluções são obtidas com as rotinas existentes no próprio software – o usuário precisa apenas introduzir o seu modelo no programa, de acordo com a sintaxe própria do mesmo.

4.7 Resultados

Como dito na seção 4.4, serão avaliados aqui dois cenários: o primeiro considerando capacidade estática de armazenamento, e o segundo considerando capacidade dinâmica. Para ambos os casos, serão comparadas opções em que a capacidade CAP_{INST} assume os valores de 60 mil toneladas ou 100 mil toneladas (que correspondem a armazéns de grande porte¹), enquanto o número de armazéns a serem instalados p varia entre 1 e 5. Além disso, como a construção de armazéns requer um grande investimento, não é esperado que sua inclusão na estrutura logística forneça diminuição nos custos imediatamente; assim, o *payback* simples será calculado para cada caso avaliado, permitindo uma análise mais sensível da viabilidade do investimento. A utilização do *payback* implica em considerar que as produções das safras dos anos posteriores serão as mesmas que aquela já descrita nesse trabalho.

4.7.1 Capacidade Estática

No caso estático, nenhum fator temporal é considerado. As capacidades dos armazéns existentes, bem como dos armazéns eventualmente instalados, são avaliadas quanto à sua

¹ Informação obtida através de contato com engenheiro civil que atua na área de infraestrutura logística, a exemplo dos custos de instalação dos armazéns. Na verdade, essas capacidades correspondem à instalação de conjuntos de silos (armazéns), uma vez que o maior silo individual do mundo se encontra no Brasil, e possui capacidade de 35 mil toneladas (ver <<http://www.kepler.com.br/blog/index.php/o-maior-silo-do-mundo-com-capacidade-para-35-mil-toneladas/>>, por exemplo).

efetividade no escoamento da produção da soja para exportação no porto de Paranaguá desconsiderando o período da colheita.

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos computacionalmente.

Tabela 8 – Resultados para o cenário estático.

p	CAP_{INST} (mil toneladas)	Localização dos Armazéns Instalados
1	60	1 em Cascavel
2	60	2 em Cascavel
3	60	3 em Cascavel
4	60	4 em Cascavel
5	60	5 em Cascavel
1	100	1 em Cascavel
2	100	2 em Cascavel
3	100	3 em Cascavel
4	100	4 em Cascavel
5	100	5 em Cascavel

Fonte: do autor.

Para todas as opções, o resultado para o cenário estático foi sempre o mesmo: a instalação de todos os armazéns na cidade de Cascavel. Isso se mostra coerente, pois a cidade de Cascavel absorve também a produção da cidade de Toledo (que se encontra a apenas 37 km de distância), e as duas somadas possuem uma produção de cerca de 3,8 milhões de toneladas por ano, que representa cerca de 22% da produção de todo o estado. Além disso, elas se encontram a cerca de 500 km do porto de Paranaguá, justificando assim uma grande necessidade de transporte ferroviário para minimização de custos. É possível ver, na Tabela 6, que a capacidade já existente na cidade de Cascavel é de aproximadamente 1 milhão de toneladas – assim, mesmo no caso em que existem 5 armazéns instalados com capacidade de 100 mil toneladas cada, a capacidade estática não é suficiente para suprir a produção dessa região.

A instalação de armazéns representa, naturalmente, um investimento de médio a longo prazo, devido ao seu alto custo de instalação. É esperado que os custos de frete rodoviário direto diminuam com a presença de novos armazéns, enquanto os custos de frete ferroviário devem aumentar; no entanto, devido ao transporte ferroviário ser, em geral, mais barato, deve ocorrer

uma diminuição nos custos totais de transporte, se ignorarmos momentaneamente o custo de instalação dos armazéns. Dessa forma, é possível avaliar também o tempo que levaria para as reduções geradas nos custos de transporte devido à instalação dos armazéns compensarem o custo de instalação dos mesmos (*payback*). Para tanto, é calculada a variação dos custos de transporte rodoviários direto *CRD* e custo ferroviário *CF* para cada caso estudado, em relação ao caso onde não existe nenhum armazém instalado (isto é, $p = 0$). Esses custos são definidos por

$$CRD = \sum_{j=1}^p d_j y_j, \quad (11)$$

$$CF = \sum_{i=1}^m e_i z_i. \quad (12)$$

Além disso, para esse estudo do *payback*, a quarta restrição (Equação 5) deve tomar a forma

$$\sum_{j=1}^p B_j = p, \quad (13)$$

pois assumiu-se que p armazéns serão, de fato, instalados.

4.7.1.1 Caso $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas

A Tabela 9 mostra as variações dos custos *CRD* e *CF* para o caso em que $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.

Tabela 9 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário estático $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
Comparativo <i>CRD</i> (R\$)	-6,700E+6	-1,340E+7	-2,006E+7	-2,675E+7	-3,344E+7
Comparativo <i>CF</i> (R\$)	4,150E+6	8,290E+6	1,244E+7	1,658E+7	2,073E+7
Balanco (R\$)	-2,550E+6	-5,110E+6	-7,620E+6	-1,017E+7	-1,271E+7

Fonte: do autor.

O custo misto rodoviário + ferroviário, que é dado por

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p c_{i,j} x_{i,j}, \quad (14)$$

não teve variações significativas, e por isso não foi mostrado.

Pode ser visto na Tabela 9 que *CRD* de fato diminuiu, enquanto *CF* aumentou; no entanto, o balanço mostra que a soma de ambos os custos é sempre menor que zero – ou seja, existe uma diminuição nos custos totais (se os custos de instalação dos armazéns forem ignorados), como esperado.

Utilizando essa quantidade economizada, calcula-se então o *payback* simples do investimento, que é dado por

$$\text{payback} = \frac{|\text{Balanço}|}{\sum_{j=1}^p H_j}, \quad (15)$$

onde H_j denota o custo de instalação de um armazém na localidade j (ver Seção 4.5). Como existe apenas uma safra por ano, o *payback* obtido é dado em anos.

A Tabela 10 mostra o resultado obtido para os *paybacks* simples para cada caso estudado.

Tabela 10 – *Payback* simples para o cenário estático $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
<i>Payback</i> (anos)	6,2745098	6,2622309	6,29921259	6,29301868	6,29425649

Fonte: do autor.

A opção mais viável foi o caso em que apenas dois armazéns foram instalados. Assim, do ponto de vista do *payback* simples, com capacidade estática $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas e variando p de 1 até 5, o modelo implementado retornou que a melhor opção é a instalação de dois armazéns intermodais, ambos na cidade de Cascavel.

4.7.1.2 Caso $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas

A Tabela 11 mostra as variações dos custos *CRD* e *CF* para o caso em que $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.

Tabela 11 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário estático $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
Comparativo CRD (R\$)	-1,110E+7	-2,229E+7	-3,344E+7	-4,458E+7	-5,573E+7
Comparativo CF (R\$)	6,910E+6	1,382E+7	2,073E+7	2,763E+7	3,454E+7
Balanco (R\$)	-4,190E+6	-8,470E+7	-1,271E+7	-1,695E+7	-2,119E+7

Fonte: do autor.

O balanço mostrou-se novamente favorável à instalação dos armazéns. Além disso, a exemplo do caso anterior, o custo misto rodoviário + ferroviário foi omitido, pois sua variação foi desprezível. A Tabela 12 mostra o resultado obtido para os *paybacks* simples para cada caso estudado.

Tabela 12 – *Payback* simples para o cenário estático $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
Payback (anos)	5,0119331	4,9586776	4,95672698	4,95575221	4,95516753

Fonte: do autor.

A opção mais viável foi o caso em que cinco armazéns foram instalados. Ao contrário do caso anterior, o *payback* diminuiu com o aumento de p , apesar de a variação ter sido pequena. Além disso, o *payback* também diminuiu com relação ao caso anterior: 5 contra 6 anos, aproximadamente. Esse comportamento reflete exatamente a natureza linear dos custos de instalação: a presença de um custo fixo na relação linear torna o investimento mais viável para capacidades maiores.

Assim, do ponto de vista do *payback* simples, com capacidade estática $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas e variando p de 1 até 5, o modelo implementado retornou que a melhor opção é a instalação de cinco armazéns intermodais, todos na cidade de Cascavel.

4.7.2 Capacidade Dinâmica

Por fatores já discutidos na Seção 4.4, estimou-se para o cenário de capacidade dinâmica que o tempo efetivo de transporte da produção de soja é de 10% do período da colheita, ou seja,

10 dias completos. Dessa forma, todas as grandezas relacionadas ao fluxo de escoamento da produção devem ser divididas por 10, e passarem agora a denotarem um fluxo médio de escoamento diário; assim, por exemplo, a variável $x_{i,j}$ representa neste cenário a quantidade média, em toneladas, transportada diariamente da cidade i até o armazém instalado na cidade j , por rodovia. A variável y_j , por sua vez, representa neste cenário a quantidade média, em toneladas, transportada diariamente do armazém j até o porto de Paranaguá, por ferrovia. A mesma analogia vale para as variáveis z_i e S_i .

Os cenários dinâmicos apresentaram, em geral, uma diversidade muito maior de resultados do que o caso estático, pois de fato se assemelham mais ao problema real. Devido à existência de um grande número de variáveis, apenas o caso com melhor *payback* simples será analisado de modo mais detalhado. Dessa forma, as capacidades dinâmicas máximas dos armazéns a serem instalados assumem os mesmos valores dos casos estáticos, 60 mil e 100 mil toneladas, e os valores de p variam novamente entre 1 e 5, como no cenário estático.

4.7.2.1 Caso $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas

No caso dinâmico, a variação dos custos de transporte misto rodoviário + ferroviário mostrou-se significativa. Assim, a análise do balanço de custos é feita agora considerando a função objetivo subtraída dos custos de instalação: $(OBJ - \sum_{j=1}^p H_j)$. A Tabela 13 mostra as variações desse valor para o caso dinâmico em que $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas. O comparativo se dá com relação ao caso em que $p = 0$, ou seja, em que nenhum armazém foi instalado.

Tabela 13 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
Comparativo $(OBJ - \sum_{j=1}^p H_j)$ (R\$)	1,191E+8	1,176E+8	1,165E+8	1,155E+8	1,147E+8
Balanço (R\$)	1,420E+6	2,590E+6	3,590E+6	4,370E+6	5,090E+6

Fonte: do autor.

Os valores comparativos de fato diminuem com o aumento de p , gerando um balanço favorável. Isso é esperado, uma vez que a existência de mais armazéns fornece mais opções

para os fluxos de escoamento. No entanto, o custo de instalação desses novos armazéns foi, como dito, excluído desse comparativo. Sua relevância é vista então no cálculo do *payback* simples, que é mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 – *Payback* simples para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
<i>Payback</i> (anos)	11,267605	12,355212	13,370473	14,6453089	15,7170923

Fonte: do autor.

O melhor caso foi $p = 1$, que forneceu um *payback* simples de pouco mais de 11 anos. A instalação de armazém foi prevista na cidade de Jacarezinho, no nordeste do estado. Apenas duas cidades tiveram suas produções totalmente escoadas por rodovia: Curitiba, que se encontra a 77 km do porto de Paranaguá, e União da Vitória, que se encontra a 268 km do mesmo. O resultado para a primeira cidade é razoável, pois sua distância ao porto é pequena, não justificando assim a necessidade de transporte rodoviário; o resultado da segunda, no entanto, já não é tão intuitivo, pois existe um armazém relativamente próximo que não foi totalmente utilizado (na cidade de Ponta Grossa, a 156 km), que poderia a princípio ser utilizado para o escoamento em modal ferroviário.

O modo de escoamento misto, que utiliza ambos os modais, foi naturalmente a maneira resultante para todas as demais cidades não conectadas à malha ferroviária. A Tabela 15 descreve esse fluxo entre cidades.

Tabela 15 – Fluxo de escoamento da produção no modo misto para o caso $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas.

Cidade não conectada à malha ferroviária	Armazém destino	Quantidade diária transportada $x_{i,j}$ (t)
Campo Mourão	Maringá	201300
Cornélio Procópio	Jacarezinho	12750
Cornélio Procópio	Londrina	100770
Francisco Beltrão	Guarapuava	83985
Irati	Ponta Grossa	52341

Ivaiporã	Apucarana	91224
Laranjeiras do Sul	Guarapuava	39585
Paranavaí	Maringá	7773
Pato Branco	Guarapuava	99000
Toledo	Cascavel	164920
Umuarama	Maringá	55721

Fonte: do autor.

As cidades descritas como destinos utilizam seus armazéns para absorver a produção de seus vizinhos através do modal rodoviário, para posterior escoamento via modal ferroviário. Nesse modo, se destacaram as cidades de Maringá e Guarapuava, que absorveram a produção de três cidades vizinhas.

Dessa forma, do ponto de vista do *payback* simples, com capacidade dinâmica $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas e variando p de 1 até 5, o modelo implementado retornou que a melhor opção é a instalação de um único armazém intermodal, na cidade de Jacarezinho, no nordeste do estado. O modal rodoviário direto ao porto nesse caso foi utilizado apenas pelas cidades de Curitiba e União da Vitória, enquanto as cidades de Maringá e Guarapuava se destacaram como absorvedores da produção de cidades vizinhas para escoamento no modo misto.

4.7.2.2 Caso $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas

A exemplo do caso dinâmico anterior, o comparativo para o caso $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas é realizado para $(OBJ - \sum_{j=1}^p H_j)$. A Tabela 16 mostra os resultados obtidos.

Tabela 16 – Variação dos custos rodoviários diretos e custos ferroviários para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
Comparativo $(OBJ - \sum_{j=1}^p H_j)$ (R\$)	1,175E+8	1,171E+8	1,155E+8	1,155E+8	1,155E+8
Balço (R\$)	-1,530E+6	-1,950E+6	-3,490E+6	-3,490E+6	-3,490E+6

Fonte: do autor.

Novamente, o balanço mostrou-se favorável. O *payback* simples é mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 – *Payback* simples para o cenário dinâmico $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$
<i>Payback</i> (anos)	13,725490	21,538461	18,0515759	24,0687679	30,0859598

Fonte: do autor.

O melhor caso foi também aquele em que apenas um armazém é instalado ($p = 1$), na cidade de Jacarezinho. Os valores do *payback*, no entanto, aumentaram com o aumento da capacidade de armazenagem, ao contrário do ocorrido no cenário estático.

As cidades de Curitiba e União da Vitória tiveram novamente sua produção escoada totalmente via rodovia. Esse resultado é coerente, pois o armazém instalado se encontra em uma cidade relativamente distante, de modo que não existe influência sobre seus escoamentos.

Os fluxos mistos (ferroviário + rodoviário) ainda continuaram bastante presentes. A única diferença com relação ao caso anterior foi que a cidade de Jacarezinho absorveu uma maior produção da cidade de Cornélio Procópio, devido ao aumento na capacidade de armazenagem do armazém instalado, como mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Fluxo de escoamento da produção no modo misto para o caso $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas.

Cidade não conectada à malha ferroviária	Armazém destino	Quantidade diária transportada x_{ij} (t)
Campo Mourão	Maringá	201300
Cornélio Procópio	Jacarezinho	52750
Cornélio Procópio	Londrina	60770
Francisco Beltrão	Guarapuava	83985
Irati	Ponta Grossa	52341
Ivaiporã	Apucarana	91224
Laranjeiras do Sul	Guarapuava	39585
Paranavaí	Maringá	7773

Pato Branco	Guarapuava	99000
Toledo	Cascavel	164920
Umuarama	Maringá	55721

Fonte: do autor.

Assim, os resultados são qualitativamente idênticos ao caso anterior, com $CAP_{INST} = 60$ mil toneladas. A única diferença relevante é o crescimento do valor do *payback* simples do melhor caso, sugerindo que aumentar a capacidade do armazém instalado não é indicado economicamente. Dessa forma, do ponto de vista do *payback* simples, com capacidade dinâmica $CAP_{INST} = 100$ mil toneladas e variando p de 1 até 5, o modelo implementado retornou que novamente a melhor opção é a instalação de um único armazém intermodal, na cidade de Jacarezinho. O modal rodoviário direto ao porto foi utilizado apenas pelas cidades de Curitiba e União da Vitória, enquanto as cidades de Maringá e Guarapuava continuaram se destacando como absorvedores da produção de cidades vizinhas para escoamento no modo misto.

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, informações sobre a produção da soja no estado do Paraná e sobre a localização das malhas ferroviárias e rodoviárias foram reunidas. Elas foram utilizadas para a construção de um modelo de Pesquisa Operacional, que resultou em um problema de programação inteira mista. O objetivo era minimizar os custos de transporte totais, considerando os modais ferroviário e rodoviário, para escoar toda a produção de soja no porto de Paranaguá, no leste do estado. Para isso, a possibilidade de construção de novos armazéns intermodais de soja foi adotada, pois os custos de transporte ferroviário costumam ser menores que os custos de transporte rodoviário – além da existência de outros fatores favoráveis, como maior segurança e menor poluição. Deve notar-se que nenhum diagnóstico sobre as condições de transporte existentes em ambas as malhas foi considerado, apenas suas dimensões físicas e interconexões.

Após implementação do modelo, dois cenários foram estudados. O primeiro deles foi o cenário estático, onde efeitos temporais foram desconsiderados, de modo que a capacidade dos armazéns foi considerada estática. Nesse cenário, analisamos primeiramente a possibilidade de instalação de armazéns com capacidade para 60 mil toneladas, e posteriormente capacidade 100 mil toneladas. Para um número máximo de 5 armazéns instalados, os resultados sempre foram o mesmo: instalação dos armazéns na cidade de Cascavel, no oeste do estado. Esses resultados, apesar de simplórios, se mostram razoáveis, uma vez que a cidade de Cascavel absorve a produção da cidade vizinha Toledo, e elas juntas somam cerca de 22% da produção de soja do estado, além de se localizarem a uma grande distância do porto de Paranaguá. Do ponto de vista do *payback* simples, a construção dos armazéns com capacidade para 100 mil toneladas se mostrou mais favorável – resultado que também é coerente, pois os custos de instalação possuem uma parte referente ao custo fixo de implantação.

O segundo cenário estudado foi o cenário dinâmico, onde o tempo de 100 dias da colheita da safra de soja foi considerado. Desses 100 dias, estimou-se que apenas 10% são utilizados efetivamente no escoamento da produção de soja. Tal fator é bastante difícil de se estimar; não obstante, corresponde a um fator crítico de nosso modelo. Para as implementações, utilizamos os mesmos parâmetros do caso estático: número máximo de 5 armazéns instalados, e capacidades de armazenamento de 60 mil e 100 mil toneladas. O resultado, para ambos os casos, foi a instalação de um único armazém, e na cidade de Jacarezinho, no nordeste do estado.

O *payback* simples dessa vez favoreceu a instalação do armazém de capacidade menor, 60 mil toneladas, de modo contrário ao resultado para o caso estático.

Quanto às aproximações adotadas no modelo, convém citar que não foram considerados os custos operacionais dos armazéns. Esse custo é obviamente muito menor que o custo de instalação; no entanto, para consideração de *paybacks*, seu efeito cumulativo durante as safras pode se tornar relevante. Outro fator não quantificado foi a economia advinda da diminuição das perdas geradas pelo uso do modal ferroviário – fator esse que também pode ser relevante em análises de *payback*.

Por fim, destacam-se algumas modificações que podem ser adicionados ao modelo em eventuais trabalhos futuros. A primeira delas é tornar a capacidade dos armazéns uma variável também (e não mais um parâmetro); dessa forma, o próprio problema implementado retornaria capacidades ótimas de instalação. Outra possibilidade é realizar o procedimento contrário ao descrito nesse trabalho: fixar um *payback* desejado para o investimento, e determinar as melhores localizações e quantidade dos armazéns intermodais a serem instalados.

Referências

- ABOUNACER, R.; REKIK, M.; RENAUD, J. An exact solution approach for multi-objective location–transportation problem for disaster response. *Computers & Operations Research*, v.41, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Disponível em <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/11516/America_Latina_Logistica_Malha_Su_L_S_A_.html>. Acesso em 11/11/2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Disponível em <<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/11853/Informacoes.html>>. Acesso em 13/10/2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Autoriza o reajuste das tarifas de referência do serviço de transporte ferroviário de cargas da América Latina Logística Malha Sul – ALLMS e unifica as tabelas tarifárias das Resoluções nº 3.562/2010, nº 3.610/2010 e nº 3.717/2011. Resolução nº 4194, de 19 de novembro de 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES Autoriza a revisão das tarifas de referência do serviço de transporte ferroviário de cargas da Estrada de Ferro Paraná Oeste S/A. Resolução nº 3894, de 6 de setembro de 2012.
- ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 3.ed. LTC, 2004. p.1-2.
- ARABANI, A. B.; FARAHANI, R. Z. Facility Location Dynamics: An Overview of Classifications and Applications. *Computers & Industrial Engineering*, v. 62, 2012.
- ARENALES M. *et al.* **Pesquisa Operacional**. Elsevier, 2007. 523p.
- ASHRAFZADEH, M.; RAFIEI, F. M.; ZARE, Z. The Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process Approach for the Selection of Warehouse Location: A Case Study. *International Journal of Business and Social Science*, v.3, nº4, 2012.
- BALLOU, H. R. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. 5.ed. Bookman, 2009. p. 431-481.
- BELIËN, J. *et al.* Optimizing the Facility Location Design of Organ Transplant Centers. *Decision Support Systems*, v. 54, 2013.
- BORGES G. R.; ARAUJO F.; SOLON A. S. Desperdício de soja nas estradas: análise de perdas de soja nas regiões sudeste e centro-oeste. In: XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2013, Salvador, BA, Brasil.
- BUENO, J. V. **Caracterização do mercado logístico e de escoamento da produção agrícola de soja no estado do Paraná**. Piracicaba: USP, 2011.
- CAETANO, M. Porto de Paranaguá prevê embarcar volume de soja 6% maior em 2015. Disponível em <<http://www.valor.com.br/agro/3881124/porto-de-paranagua-preve-embarcar-volume-de-soja-6-maior-em-2015>>. Acesso em 21/04/2015.
- CAIXETA-FILHO, J. V. **Pesquisa Operacional**. 2.ed. Atlas, 2004. p. 9-10.
- CONAB. **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE GRÃOS**. Brasília, 2013. V.1. ISSN 2318-6852.
- COPPEAD. **Transporte de carga no brasil: ameaças e oportunidades para o desenvolvimento do país**. Rio de janeiro, 2002.
- CUNHA, C. B. **Contribuição à Modelagem de Problemas em Logística e Transportes**. p. 200-220. Tese de Livre Docência - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- DASKIN, M. S. **Network and Discrete Location**. Willey-Interscience, 1995. 494p.
- DERAL. **Soja – Análise da Conjuntura Agropecuária**. 2014. p. 18.
- FARAHANI, R. Z.; STEADIESEIFI, M.; ASGARI N. Multiple Criteria Facility Location Problems: A Survey. *Applied Mathematical Modelling*, v. 34, 2010.

- EMBRAPA. **O complexo agroindustrial da soja brasileira**. Londrina, 2007. ISSN 1516-7860.
- EMBRAPA. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina, 2014. ISSN 2176-2937.
- EMBRAPA. **Indicadores de sustentabilidade da cadeia produtiva da soja no Brasil**. Londrina, 2014. ISSN 2176-2937.
- GALAN, B. *et al.* Optimisation of the Construction and Demolition Waste Management Facilities Location in Cantabria (Spain) under Economical and Environmental Criteria. *Waste Biomass Valor*, 2013.
- GUIA GEOGRÁFICO PARANÁ. Disponível em <<http://www.guiageo-parana.com/mapa-rodoviario.htm>>. Acesso em 2/11/2015.
- GUIMARÃES FILHO, C. Paraguaçu em busca da soja ‘perdida’. 2015. Disponível em <<http://agro.gazetadopovo.com.br/noticias/paranagua-em-busca-da-soja-‘perdida’/>>. Acesso em 21/04/2015.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 6.ed. McGraw-Hill International, 1995. 998p.
- LIMA, F. R. F. Rotas Internas de Produtos de Exportação: o caso da soja. *Revista paranaense de desenvolvimento*, n.123, p.235-255, 2012.
- JABBARZADEH, A. *et al.* Designing a Supply Chain Network under the Risk of Disruptions. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2012, 2011.
- KHAKBAZ, A.; NOOKABADI A. S.; SHETAB-BUSHEHRI, N. A Model for Locating Park-and-Ride Facilities on Urban Networks Based on Maximizing Flow Capture: A Case Study of Isfahan, Iran. *Netw Spat Econ*, 2012.
- MLADENOVIC, N. *et al.* The p-median problem: A Survey Of Metaheuristic Approaches. *European Journal of Operational Research*, v.179, 2007.
- OLIVEIRA, A. M. K.; FILHO J. V. C. Potencial da logística ferroviária para exportação de açúcar em São Paulo: recomendações de localização para armazéns intermodais. *RER*, Rio de Janeiro, 2007. vol. 45, nº 04, p. 823-853.
- OWEN, S. H.; MARK S. D. Strategic Facility Location: A Review. *European Journal of Operational Research*, v.111, 1998.
- PIZZOLATO, N. D.; RAUPP, F. M.; ALZAMORA, G. S. Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da p-mediana e suas variantes. *Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*. Rio de Janeiro, v.4, n.1, p. 13-42, 2012.
- REVELLE, C. S.; EISELT, H. A.; DASKIN, M. S. A Bibliography for Some Fundamental Problem Categories In Discrete Location Science. *European Journal of Operational Research*, v.184, 2008.
- SIFRECA. Indicadores de fretes Rodoviários. Disponível em: <<http://esalqlog.esalq.usp.br/sifreca/mercado-de-fretes/soja/>>. Acesso em 2/11/2015.
- XI, M. *et al.* A Modified p-Median Model for the Emergency Facilities Location Problem and Its Variable Neighbourhood Search-Based Algorithm. *Journal of Applied Mathematics*, 2013.