



Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Biociências – Câmpus de Botucatu
Programa de Pós-graduação em Biometria



Programação por metas aplicada ao problema de distribuição de alimentos

Letícia Ferreira Godoi

Botucatu
2025

Letícia Ferreira Godoi

Programação por metas aplicada ao problema de distribuição de alimentos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biometria da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutora em Biometria.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Renata Cantane

Coorientadora: Profa. Dra. Flávia Queiroga Aranha

Botucatu
2025

G588p

Godoi, Letícia Ferreira

Programação por metas aplicada ao problema de distribuição de alimentos / Letícia Ferreira Godoi. -- Botucatu, 2025

84 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Biociências, Botucatu

Orientadora: Daniela Renata Cantane

Coorientadora: Flávia Queiroga Aranha

1. Pesquisa operacional. 2. Modelos matemáticos. 3. Alocação de recursos. 4. Segurança alimentar. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE LETÍCIA FERREIRA GODOI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA, DO INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS - CÂMPUS DE BOTUCATU.

Aos 21 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 9h, no(a) Sala da Pós-graduação, Central de Aulas 2 - IBB, Unesp, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de LETÍCIA FERREIRA GODOI, intitulada **Programação por metas aplicada ao problema de distribuição de alimentos**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. DANIELA RENATA CANTANE (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP, Profª. Drª. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA (Participação Presencial) do(a) Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP, Profª Drª FRANKLINA MARIA BRAGION DE TOLEDO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática Aplicada e Estatística / Universidade de São Paulo - São Carlos, Profa. Dra. KELLY CRISTINA POLDI (Participação Virtual) do(a) Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica - IMECC / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Profa. Dra. CAROLINE DE BARROS GOMES (Participação Presencial) do(a) Departamento de Saúde Pública / Faculdade de Medicina - FMB/UNESP. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. DANIELA RENATA CANTANE

Agradecimentos

Aos meus pais, Antônio (*in memoriam*) e Débora, por todo o apoio, amor e incentivo em todas as etapas da minha formação tanto pessoal quanto profissional. Ao meu irmão, Bruno, por todos os momentos de parceria. Ao Guilherme, por todo o companheirismo e amor, obrigada por vivenciar cada etapa desta jornada, me apoiando inclusive nos momentos difíceis. Aos demais familiares que sempre me incentivaram na busca por conhecimento.

À minha orientadora Profa. Dra. Daniela Renata Cantane e minha coorientadora Profa. Dra. Flávia Queiroga Aranha, por me aceitarem como aluna em mais esta etapa da minha formação, contribuindo para meu desenvolvimento profissional, obrigada pela confiança, pela oportunidade e pela parceria. Agradeço também por toda a atenção, e por todos os ensinamentos que contribuíram não somente para minha formação profissional, mas também pessoal.

Ao Prof. Dr. Dylan Jones, da University of Portsmouth, por aceitar ser meu supervisor por seis meses durante o meu período de intercâmbio na Inglaterra. Agradeço por todos os direcionamentos e reuniões que tornaram possível o aprimoramento deste trabalho.

À todos os demais que me receberam na Inglaterra e contribuíram para o meu enriquecimento cultural, principalmente à Liz, obrigada por tornar a sua casa um ambiente acolhedor e seguro para que fosse possível o desenvolvimento dos meus estudos em seu país. Agradeço também o Rhyen e a Gabriela, por tornarem este período menos solitário e mais feliz.

Ao Banco de Alimentos de Botucatu – SP, em especial à nutricionista Mariele Colletti Coral, pela contribuição para o trabalho permitindo a realização das visitas à organização e também pelo fornecimento de informações e dados que foram de grande importância para o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos que o Programa de Pós-graduação em Biometria me presenteou, em especial para Janielly, Lara, Bethina, Roniel e Felipe, por todos os momentos de companheirismo e alegria, e Juliana Freitas por toda a ajuda e disponibilidade.

Ao IBIT, Escritório de Inovação e Tecnologia do Instituto de Biociências, o qual pude fazer parte como representante discente, agradeço pela oportunidade e por me proporcionar o desenvolvimento de habilidades importantes, contribuindo para minha formação.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Biometria por toda a disponibilidade e atenção sempre que possível e necessário.

À CAPES, pelo apoio financeiro essencial para a realização e desenvolvimento do trabalho, inclusive durante o período de intercâmbio no exterior. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

You cannot hope to build a better world without improving the individuals. To that end, each of us must work for his own improvement and, at the same time, share a general responsibility for all humanity.
Marie Curie

Resumo

A distribuição de alimentos é uma estratégia fundamental no combate à insegurança alimentar e nutricional e ao desperdício de alimentos, especialmente quando conduzida por Bancos de Alimentos. Essas organizações desempenham um papel crucial ao receber e distribuir alimentos doados, atendendo tanto famílias em situação de vulnerabilidade quanto instituições que apresentam suporte à população carente. O principal desafio desse processo se dá pela necessidade de equilibrar os conceitos de equidade, eficiência e eficácia, especialmente diante da insuficiência de alimentos disponíveis para atender a todas as demandas da população. Motivado por essa complexidade, este trabalho se propõe a estudar os Bancos de Alimentos brasileiros, desenvolvendo modelos de otimização voltados para o planejamento e aprimoramento do processo de distribuição de recursos. A metodologia utilizada para a construção dos modelos foi baseada na técnica de Programação por Metas, com ênfase na variante de Programação por Metas Estendida, que combina as variantes de Programação por Metas Ponderadas e Chebyshev. Os modelos de otimização foram desenvolvidos e implementados considerando o cenário brasileiro de Bancos de Alimentos, permitindo a realização de análises que abrangem diferentes instâncias e casos possíveis. Foram consideradas situações em que não há priorização de nenhuma instituição no atendimento, bem como foi realizada uma análise de sensibilidade dos pesos em cenários em que há priorização, seja devido à presença de desertos alimentares ou às preferências de um tomador de decisão. Os resultados obtidos demonstraram grande potencial, possibilitando o desenvolvimento de uma ferramenta prática para auxiliar gestores de Bancos de Alimentos no planejamento eficiente, ágil e equitativo do processo de distribuição de recursos.

Palavras-chave: Programação Linear; Bancos de Alimentos; Alocação de Recursos; Insegurança Alimentar e Nutricional.

Abstract

Food distribution is a key strategy in the fight against food insecurity and food waste, especially when conducted by Food Banks. These organizations play a crucial role in receiving and distributing donated food, serving both vulnerable families and institutions that provide support to the underprivileged population. The main challenge of this process lies in the need to balance the concepts of equity, efficiency, and effectiveness, especially in the face of insufficient available food to meet all the demands of the population. Motivated by this complexity, this study aims to examine Brazilian Food Banks, developing optimization models focused on planning and improving the resource distribution process. The methodology used for building the models was based on the Goal Programming technique, with an emphasis on the Extended Goal Programming variant, which combines the Weighted Goal Programming and Chebyshev variants. The optimization models were developed and implemented considering the Brazilian context of Food Banks, enabling analyses that cover different instances and possible cases. Situations were considered where there is no prioritization of any institution in the service, and a sensitivity analysis of the weights was conducted in scenarios in which there is prioritisation, either due to the presence of food deserts or the preferences of a decision-maker. The results obtained showed great potential, enabling the development of a practical tool to assist Food Bank managers in the efficient, agile, and equitable planning of the resource distribution process.

Keywords: Linear Programming; Food Banks; Resource Allocation; Food Insecurity.

Lista de figuras

Figura 1 – Mapa conceitual dos fatores que influenciam a segurança alimentar e nutricional, adaptado de Pérez-Escamilla e Segall-Corrêa (2008).	5
Figura 2 – Esquema de funcionamento de um Banco de Alimentos Convencional. . . .	10
Figura 3 – Esquema de funcionamento de um Banco de Alimentos Colheita Urbana/Rural. . .	10
Figura 4 – Porcentagens de alimentos distribuídos pelo Banco de Alimentos de Botucatu. . .	37
Figura 5 – Cenário construído para o modelo M1.	42
Figura 6 – Valores (a) da função objetivo e (b) da variável λ para diferentes valores de α , na instância M1C1.	43
Figura 7 – Distribuição de alimentos considerando a instância M1C1 e $\alpha = 0$	44
Figura 8 – Distribuição de alimentos considerando a instância M1C1 e $\alpha = 1$	45
Figura 9 – Distribuição de alimentos considerando as instâncias M1C2 e M1C3, e $\alpha \in [0, 1]$	46
Figura 10 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 1, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.	48
Figura 11 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 2, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.	49
Figura 12 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 3, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.	50
Figura 13 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 4, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.	51
Figura 14 – Comparação da distribuição de alimentos, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M2 e demanda.	53
Figura 15 – Desvios de equidade em (a) dados reais, (b) resultados do modelo M1, e (c) resultados do modelo M2.	56
Figura 16 – Valores de WCSS para diferentes números de clusters.	58
Figura 17 – Clusterização dos dados de localização das instituições atendidas pelo BA. . .	58
Figura 18 – Resultados do modelo WGP usando o conjunto de pesos v^A	60
Figura 19 – Distância entre resultados do modelo M2 usando $\alpha \in [0, 1]$ e WGP ($\alpha = 0$) para o Caso 1.	62
Figura 20 – Resultados do modelo M2 com $\alpha = 0,85$ usando o conjunto de pesos A1. . .	63
Figura 21 – Resultados do modelo WGP usando o conjunto de pesos v^E	64

Figura 22 – Distância entre resultados do modelo M2 usando $\alpha \in [0, 1]$ e WGP ($\alpha = 0$) para o Caso 2.	66
Figura 23 – Resultados do modelo M2 com $\alpha = 0,85$ usando o conjunto de pesos E1. . .	67
Figura 24 – Comparação da distribuição de alimentos, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M2 com $\alpha = 0$ e conjunto de pesos N1, e demanda.	69
Figura 25 – Distância entre resultados do modelo M2 usando $\alpha \in [0, 1]$ e WGP ($\alpha = 0$) para o Caso 3.	71
Figura 26 – Comparação da distribuição de alimentos, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M2 com $\alpha = 0,85$ e conjunto de pesos N14, e demanda. . . .	72
Figura 27 – Visão geral da primeira página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.	74
Figura 28 – Exemplo de arquivo com informações sobre as instituições sociais atendidas.	74
Figura 29 – Exemplo de arquivo com informações sobre os tipos de alimentos disponíveis para o processo de distribuição.	75
Figura 30 – Exemplo de arquivo com informações sobre as preferências de recebimento de cada tipo de alimento em relação à cada instituição atendida.	75
Figura 31 – Visão geral da segunda página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.	76
Figura 32 – Visão geral da terceira página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.	77
Figura 33 – Visão geral da quarta página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.	77
Figura 34 – Visão geral da quinta página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.	78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Notação utilizada no modelo M1.	25
Tabela 2 – Informações mensais sobre a distribuição de alimentos realizada pelo Banco de Alimentos de Botucatu em 2021 e 2022.	32
Tabela 3 – Informações mensais sobre a economia gerada pela distribuição de alimentos realizada pelo Banco de Alimentos de Botucatu em 2022.	33
Tabela 4 – Informações mensais sobre a distribuição de alimentos realizada pelo Banco de Alimentos de Botucatu em 2023 e 2024.	34
Tabela 5 – Quantidades e classificações de alimentos (em kg) distribuídos.	36
Tabela 6 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 1.	38
Tabela 7 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 2.	38
Tabela 8 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 3.	39
Tabela 9 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 4.	39
Tabela 10 – Instâncias construídas para análise do modelo M1 (em kg).	43
Tabela 11 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 1 (em kg).	47
Tabela 12 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 2 (em kg).	48
Tabela 13 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 3 (em kg).	50
Tabela 14 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 4 (em kg).	51
Tabela 15 – Resultados referentes a estoque de alimentos (em kg) obtidos pelo modelo M2.	54
Tabela 16 – Desvios de equidade associados a cada instituição atendida (escala 10^{-3}).	55
Tabela 17 – Descrição dos clusters considerados para os Casos 1 e 2.	59
Tabela 18 – Conjuntos de pesos analisados pelo algoritmo utilizando o conjunto inicial v^A	61
Tabela 19 – Conjuntos de pesos analisados pelo algoritmo utilizando o conjunto inicial v^E	65
Tabela 20 – Descrição dos clusters considerados para o Caso 3.	68
Tabela 21 – Conjuntos de pesos analisados pelo algoritmo utilizando o conjunto inicial v^N	70

Lista de abreviaturas e siglas

AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i> (Processo Hierárquico Analítico)
BA	Banco de Alimentos
CAISAN	Câmara Interministerial de Segurança Alimentar e Nutricional
CGP	<i>Chebyshev Goal Programming</i> (Programação por Metas Chebyshev)
DHAA	Direito Humano à Alimentação Adequada
EBIA	Escala Brasileira de Insegurança Alimentar
EGP	<i>Extended Goal Programming</i> (Programação por Metas Estendida)
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
LGP	<i>Lexicographic Goal Programming</i> (Programação por Metas Lexicográfica)
MapaSAN	Mapeamento de Segurança Alimentar e Nutricional
ONG	Organização Não-Governamental
PPL	Problema de Programação Linear
RC	Razão de Consistência
SAN	Segurança Alimentar e Nutricional
SESC	Serviço Social do Comércio
WGP	<i>Weighted Goal Programming</i> (Programação por Metas Ponderadas)
WCSS	<i>Within-Cluster Sum of Squares</i>

Sumário

1	Introdução	1
2	Princípios Alimentares	4
2.1	Segurança Alimentar e Nutricional	4
2.2	Perda e Desperdício de Alimentos	7
2.3	Bancos de Alimentos	9
2.3.1	Alimentos doados	11
3	Abordagem Matemática	13
3.1	Programação linear	13
3.2	Programação por Metas	14
3.2.1	Sensibilidade dos Pesos	17
3.2.2	Processo Hierárquico Analítico	19
3.2.3	Algoritmo <i>k-means</i> para clusterização	20
4	Programação por Metas Aplicada ao Problema de Distribuição de Alimentos	22
4.1	Modelos Matemáticos Aplicados ao Problema de Distribuição de Alimentos	22
4.2	Modelos Propostos	24
4.2.1	Modelo M1	24
4.2.2	Modelo M2	26
4.3	Estudo da Sensibilidade dos Pesos	27
4.4	Banco de Alimentos de Botucatu – SP	29
4.4.1	Descrição dos Dados Reais	35
5	Resultados e Discussões	41
5.1	Simulações Computacionais Utilizando Cenários Fictícios	41
5.2	Simulações Computacionais Utilizando Dados Reais	46
5.2.1	Distribuição de alimentos utilizando o modelo M1	47
5.2.2	Distribuição de alimentos utilizando o modelo M2	52
5.2.3	Análise da Medida de Equidade	54
5.3	Análise de Sensibilidade dos Pesos	57
5.3.1	Caso 1	57
5.3.2	Caso 2	63
5.3.3	Caso 3	67
6	Ferramenta para Distribuição Equitativa de Alimentos	73
7	Considerações finais	79
	Referências	81

1 Introdução

Os desafios de combate à fome e ao desperdício são preocupações mundiais e estão presentes nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, da Organização das Nações Unidas. O Objetivo 2 é atrelado ao combate à fome e garantia do acesso das pessoas a alimentos seguros, nutritivos e suficientes durante todo o ano. Outra meta muito importante relacionada ao tema é o Objetivo 12, que visa reduzir pela metade o desperdício de alimentos nos níveis de varejo e do consumidor, além de reduzir as perdas de alimentos ao longo das cadeias de produção e abastecimento ([Organização das Nações Unidas, 2022](#)).

Estes configuram importantes desafios ao nível global, uma vez que o período pandêmico de Covid-19 afetou significativamente o cenário mundial e nacional no que diz respeito à fome e insegurança alimentar. Segundo [FAO et al. \(2024\)](#), a quantidade média de pessoas que podem ter enfrentado a fome no ano de 2023 permaneceu a mesma que os dois anos anteriores, que corresponde entre 713 e 757 milhões no mundo. Esta quantidade média corresponde a 122 milhões de pessoas a mais do que o calculado para 2019, período anterior à pandemia ([FAO et al., 2023](#)). Ao nível nacional, segundo a pesquisa realizada por [IBGE \(2024\)](#) em torno de 27,6% dos domicílios particulares permanentes no Brasil apresentaram algum grau de insegurança alimentar, sendo 4,1% referente à insegurança alimentar grave, a qual corresponde à privação na quantidade de alimentos. Esta realidade preocupante atinge 3,2 milhões de domicílios, e não está restrita aos adultos, mas também crianças e adolescentes.

Assim como a fome e a insegurança alimentar e nutricional, o desperdício de alimentos também configura um problema a ser combatido, e pode ser entendido como o descarte de alimentos que ainda se apresentam apropriados para o consumo, ou alimentos que estragaram por serem mantidos além da data de validade. Em um cenário em que fome e desperdício de alimentos coexistem, fica explícita a necessidade de iniciativas que reorganizem a distribuição destes alimentos para atingir maior número de pessoas. Neste sentido, uma iniciativa muito importante são os Bancos de Alimentos, cujo objetivo central consiste na redistribuição de alimentos que muitas vezes já não possuem valor comercial, porém, continuam apropriados para o consumo.

Por meio dessa iniciativa é garantido o acesso aos alimentos por famílias que se encontram em situação de insegurança alimentar e nutricional. O processo de captação e redistribuição dos alimentos deve ser feito de maneira estratégica, visto que a disponibilidade de alimentos em cada município e região varia conforme a economia e agricultura correspondente. Assim, cada

região deve ser analisada de forma a garantir que o processo seja realizado com equidade, eficiência e eficácia. Estes fatores são fundamentais no processo de distribuição de alimentos visando o atendimento do maior número possível de famílias em situação de insegurança alimentar e nutricional.

Com o entendimento da temática e da complexidade do processo de distribuição, existem ferramentas matemáticas capazes de auxiliar o processo e a tomada de decisão. Neste contexto, os modelos matemáticos podem ser vistos como ferramentas de auxílio no entendimento do problema e na busca por sua solução. Estes modelos, quando associados a um objetivo, são chamados modelos de otimização, e podem ser classificados de diferentes formas.

A maioria dos problemas reais apresenta mais de um objetivo, e muitas vezes eles se apresentam conflitantes. Uma abordagem para problemas multiobjetivos que envolvem a tomada de decisão é a técnica de Programação por Metas, que corresponde ao estabelecimento de valores alvo numéricos associados à cada objetivo, sendo o tomador de decisão fundamental para o bom desempenho da busca por soluções.

Considerando os modelos matemáticos de otimização encontrados na literatura com aplicação na área de atuação dos Bancos de Alimentos, ainda há uma escassez de estudos voltados para os processos realizados no cenário nacional. Com isso, e motivados por estudos recentes que apontam ser necessário aumentar o investimento público e de pesquisas para desenvolvimento de novas tecnologias e inovações para o aumento da disponibilidade e acessibilidade aos alimentos nutritivos (FAO *et al.*, 2023), o presente trabalho visa a proposição de uma ferramenta de auxílio aos gestores dos Bancos de Alimentos brasileiros a fim de tornar o processo de distribuição mais equitativo, eficiente e eficaz.

Sendo assim, as contribuições específicas deste trabalho são:

1. Propor modelos para o processo de distribuição de alimentos utilizando a técnica de Programação por Metas;
2. Estudar a realidade dos Bancos de Alimentos e utilizar dados reais referentes ao município de Botucatu – SP na resolução do modelo proposto;
3. Analisar os resultados obtidos em relação à eficácia, eficiência e equidade;
4. Analisar as técnicas de Programação por Metas Ponderadas e Chebyshev para o processo de distribuição de alimentos;
5. Estudar a sensibilidade dos pesos envolvidos no modelo proposto;
6. Propor uma ferramenta que auxilie os gestores de Bancos de Alimentos no planejamento diário da distribuição dos alimentos que, na prática, é realizada durante horas.

Este trabalho foi reconhecido com o primeiro lugar na categoria de apresentação oral de trabalhos de pós-graduação apresentados no evento Jornada de Nutrição da UNESP de Botucatu (JONUB) em 2024, evidenciando sua relevância na área. Os resultados obtidos também resultaram na submissão de dois artigos científicos: um já aceito para publicação no periódico *OPSEARCH* e outro atualmente em fase de segunda revisão no periódico *Journal of the Operational Research Society (JORS)*, reafirmando a contribuição deste estudo para o avanço do conhecimento.

O trabalho está estruturado de forma que este capítulo apresenta uma breve introdução sobre o tema e os desafios estudados. O Capítulo 2 aborda brevemente conceitos alimentares voltados para a compreensão da segurança e insegurança alimentar e nutricional, desperdício de alimentos, desertos alimentares e o papel dos Bancos de Alimentos na diminuição do número de pessoas que vivenciam a fome e insegurança alimentar em seus domicílios. O Capítulo 3 apresenta os principais conceitos atrelados à abordagem matemática necessária para facilitar o entendimento do trabalho desenvolvido e contextualização sobre a técnica de Programação por Metas. No Capítulo 4 primeiramente é apresentada uma revisão bibliográfica dos modelos matemáticos de otimização aplicados ao processo de distribuição de alimentos e, em seguida, estão dispostos os modelos de otimização propostos, assim como a descrição de variáveis de decisão, parâmetros e informações utilizadas em suas formulações, além de informações referentes ao Banco de Alimentos da cidade de Botucatu – SP, descrevendo os dados obtidos e informações importantes. Já no Capítulo 5, são reportados os resultados computacionais obtidos neste trabalho, incluindo desde as instâncias e cenários construídos para análise dos modelos propostos. O Capítulo 6 apresenta a ferramenta *web* desenvolvida para uso dos gestores de Bancos de Alimentos brasileiros como uma resposta a demanda vista na sociedade. As considerações finais relevantes para o trabalho são apresentadas no Capítulo 7.

2 Princípios Alimentares

Neste capítulo, são apresentados conceitos para compreensão da insegurança alimentar e nutricional presente tanto no cenário mundial quanto no cenário nacional, além do conceito de desertos alimentares, e da abordagem de outro importante problema que corresponde ao desperdício de alimentos. Em sequência, são discutidas as principais características dos Bancos de Alimentos, com enfoque no processo de distribuição de alimentos realizado pela organização.

2.1 Segurança Alimentar e Nutricional

A Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) representa a realização do direito de todas as pessoas ao acesso, seja físico ou econômico, a alimentos de qualidade, em quantidade suficiente, considerando suas preferências alimentares, sem comprometer o acesso a outras necessidades essenciais (Brasil, 2006). Dessa forma, o indivíduo em segurança alimentar e nutricional consegue levar uma vida ativa e saudável. Considerando a situação em que esta condição não é satisfeita, o termo utilizado é insegurança alimentar e nutricional.

Duas dimensões são consideradas quando o termo segurança alimentar e nutricional é discutido: a alimentar, que corresponde à disponibilidade de alimentos e ao acesso à qualidade sanitária e biológica; e a nutricional, que corresponde ao estado nutricional, preservação da cultura alimentar e práticas alimentares saudáveis (Araújo *et al.*, 2020).

Este conceito está diretamente ligado ao Direito Humano à Alimentação Adequada (DHAA), que representa o direito de todas as pessoas a estarem livres da fome, com acesso regular, permanente e irrestrito a alimentos seguros e saudáveis, garantindo uma vida digna e plena nas dimensões física, mental, individual e coletiva (ABRANDH, 2013).

Os fatores capazes de influenciar na segurança alimentar e nutricional de um indivíduo podem ser encontrados em diferentes níveis como mostra a Figura 1. A disponibilidade global de alimentos influencia na importação e, associada à produção local, determina a disponibilidade nacional de alimentos. Esta disponibilidade influencia o acesso dos domicílios aos alimentos, que também sofre influência do rendimento disponível para cada família ou indivíduo (Pérez-Escamilla; Segall-Corrêa, 2008).

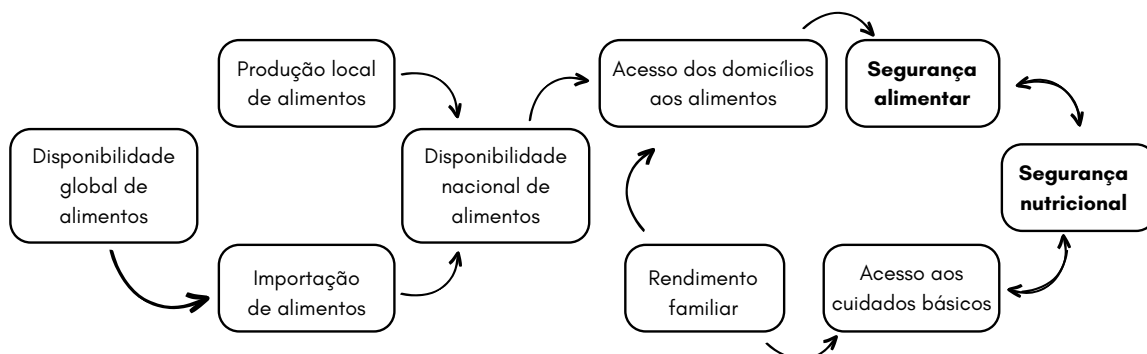


Figura 1 – Mapa conceitual dos fatores que influenciam a segurança alimentar e nutricional, adaptado de Pérez-Escamilla e Segall-Corrêa (2008).

Com relação à insegurança alimentar e nutricional, esta pode ser identificada e classificada por diversos métodos, que diferem nas informações utilizadas e nível de detalhamento (Pérez-Escamilla; Segall-Corrêa, 2008). No Brasil, a classificação e avaliação da insegurança alimentar e nutricional é feita por meio da Escala Brasileira de Insegurança Alimentar (EBIA). A EBIA consegue medir diretamente a percepção e vivência de insegurança alimentar no nível domiciliar, mensurando a dificuldade de acesso familiar aos alimentos e também as dimensões psicossociais, sendo de fácil aplicação e baixo custo. A escala é composta de 14 itens avaliados e constituem a classificação da segurança ou insegurança alimentar, sendo a última subdividida em leve, média e grave conforme a pontuação obtida no questionário (Brasil, 2014).

A insegurança alimentar leve é compreendida quando há preocupação ou incerteza quanto ao acesso aos alimentos no futuro; já a insegurança alimentar moderada é vista quando ocorre a redução da quantidade de alimentos ingeridos entre os adultos, e a insegurança alimentar grave é considerada quando esta redução de alimentos acontece também entre as crianças, evidenciando assim a experiência de fome no domicílio nesta última situação (IBGE, 2020).

Segundo pesquisas realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), entre os anos de 2004 e 2013 foi observado, em território brasileiro, um aumento no número de domicílios em segurança alimentar e nutricional. Em 2004, 65,1% dos domicílios brasileiros foram considerados em situação de segurança alimentar e nutricional. Já em 2009, este valor teve um aumento e registrou 69,8%, seguido de 77,4% no ano de 2013. Porém, após este período de aumento da segurança alimentar e nutricional no país, as pesquisas realizadas em 2017 – 2018 apontaram uma queda na situação de segurança alimentar e nutricional dos domicílios brasileiros, chegando a 63,3% (IBGE, 2020).

No cenário mundial, os dados coletados pela Organização das Nações Unidas para a Ali-

mentação e a Agricultura (FAO) indicam que a insegurança alimentar moderada ou grave sofreu um aumento, mesmo que lento, entre os anos de 2014 e 2019. Em 2014, os dados apontaram que 22,6% da população mundial se encontrava nesta situação, e este valor passou para 26,6% em 2019. Em 2020, um fator que tornou a insegurança alimentar e nutricional ainda mais evidente no cenário mundial foi o período de pandemia da Covid-19, onde as medidas de distanciamento físico eram necessárias para a contenção da propagação da doença. Com a interrupção de atividades realizadas nas escolas e o distanciamento social, medidas fundamentais para o enfrentamento do período de maior transmissão da doença, houve um grande impacto na alimentação de adultos e, principalmente, crianças, devido à dificuldade de acesso às determinadas categorias de alimentos. Os efeitos provocados por este fator foram ainda mais evidentes em relação ao acesso aos alimentos perecíveis, como frutas e legumes (FAO *et al.*, 2021).

Os reflexos da pandemia no Brasil não diferiram do cenário mundial, um inquérito populacional realizado pela Rede PENSSAN (2021) apontou agravamento relacionado à insegurança alimentar e nutricional. Segundo uma pesquisa realizada em 2020, que contou com uma amostra probabilística de 2180 domicílios brasileiros, mais da metade (55,2%) tinha seus moradores em situação de insegurança alimentar e nutricional, sendo que 9% conviviam com a fome. No ano seguinte, um novo inquérito populacional foi realizado por Rede PENSSAN (2022), com uma amostra probabilística de 12745 domicílios, e apontou que em pouco mais de um ano houve uma redução significativa de famílias em segurança alimentar e nutricional, com um agravamento da insegurança alimentar e nutricional moderada e grave. Também relacionado a este período, Galindo *et al.* (2021) ressaltam a redução no consumo de alimentos saudáveis devido à dificuldade de acesso entre os domicílios brasileiros que se encontravam nesta situação.

Considerando as famílias que se encontram em situação de insegurança alimentar e nutricional, vale ressaltar que, segundo o estudo realizado por Araújo *et al.* (2020), a prevalência das famílias brasileiras nesta condição foi fortemente associada às condições de vida. A desigualdade de oportunidades de educação, trabalho, mobilidade e acesso à alimentos com qualidade e preço acessível, aumentam a vulnerabilidade individual e comunitária, e expõem a população a múltiplos fatores de risco sociais e ambientais.

A localização em que estas famílias vivem também consiste em um fator importante que deve ser considerado, uma vez que as famílias que não tem uma renda mínima necessária para suprir suas necessidades básicas de sobrevivência geralmente moram em regiões mais afastadas dos grandes centros urbanos, o que pode, muitas vezes, levar a uma maior vulnerabilidade social (CAISAN, 2018).

Estas regiões com menor disponibilidade de recursos e que apresentam dificuldade de acesso à alimentos saudáveis são chamadas de desertos alimentares e, geralmente, são caracterizadas por áreas urbanas densamente povoadas (França *et al.*, 2024). Considerando o contexto de desertos alimentares e a realidade das famílias de baixa renda, é evidente que essas regiões se tornam cada vez mais preocupantes. Isso se deve ao processo de amplificação da privação, que

intensifica as desigualdades sociais, criando um ciclo vicioso em que a escassez de recursos em uma área agrava as desvantagens individuais, perpetuando um estado de vulnerabilidade para os moradores dessas comunidades (Beaulac; Kristjansson; Cummins, 2009).

Os estudos voltados para os desertos alimentares são importantes, pois orientam a implementação e desenvolvimento de políticas públicas voltadas para a alimentação e nutrição da população. O estudo realizado por Honorio *et al.* (2021) evidenciou que as regiões identificadas como desertos alimentares tinham pouca disponibilidade de serviços essenciais em comparação com outras regiões, destacando a desigualdade social e escassez de medidas por parte das autoridades públicas nestes locais.

2.2 Perda e Desperdício de Alimentos

Outro problema a ser combatido, que afeta diretamente a segurança alimentar e nutricional da população, consiste na perda e desperdício de alimentos. O desperdício pode ser compreendido como o descarte de alimentos que continuam apropriados para o consumo humano ou alimentos que estragaram por serem mantidos além de sua data de validade, e pode acontecer nas etapas de distribuição, comercialização e consumo. Já a perda de alimentos pode ser entendida como a redução no peso ou qualidade dos alimentos originalmente produzidos para o consumo humano e é normalmente encontrada nas etapas que antecedem o consumidor, ou seja, nas etapas de produção, colheita e processamento dos alimentos (Ishangulyyev; Kim; Lee, 2019).

Segundo FAO *et al.* (2022), a perda e o desperdício de alimentos podem variar conforme o tipo do produto, perecível ou não perecível, uma vez que cada tipo de alimento necessita de um cuidado e atenção específicos. Na África, a perda de alimentos não perecíveis está entre 1,3% e 1,7%, enquanto as perdas de alimentos perecíveis podem atingir até 28%. Sendo assim, o investimento e infraestrutura são fatores que influenciam neste contexto, porém, além destas medidas, também se faz necessário o uso de outras medidas de combate ao desperdício e perda de alimentos, como a sensibilização da população para uma possível mudança de comportamento ao nível do consumidor.

Segundo Freire Junior e Soares (2020), as taxas de perda e desperdício de alimentos no Brasil são altas, podendo chegar a até 30% na cadeia produtiva de frutas e 35% de vegetais, e entre as principais causas se encontram as formas de manuseio no campo no momento da colheita, condições de transporte que configuram etapas pós-colheita, mas também o acúmulo de produtos nas prateleiras de varejo. Sendo assim, é possível observar o grande impacto do desperdício de alimentos nas esferas social e econômica, porém, Santos *et al.* (2020) salientam que o impacto é causado também na esfera ambiental, devido à quantidade de resíduos gerados.

Existem estudos voltados para encontrar as melhores maneiras de se medir as perdas de alimentos, assim como para determinar quais são as melhores intervenções que podem ser

aplicadas. O estudo realizado por [Cattaneo et al. \(2021\)](#) pontua os cinco principais desafios atrelados a esta temática e também fornece informações importantes para a tomada de decisão no âmbito de redução das perdas de alimentos, indicando como possíveis intervenções o investimento em políticas que proporcionem um ambiente empresarial favorável, melhorando as maneiras de armazenamento e também investindo na integração das cadeias rural e urbana, além da sensibilização de fornecedores e consumidores para os benefícios da redução no desperdício de alimentos.

Com o agravamento da fome e o aumento de pessoas em situação de insegurança alimentar e nutricional no país, assim como a presença do desperdício de alimentos, surgem as políticas públicas, que correspondem a um conjunto de ações e decisões do governo de modo a solucionar os problemas enfrentados pela sociedade. Além das iniciativas governamentais, existem também as iniciativas não-governamentais que partem da sociedade civil de modo a auxiliar no processo de redução da perda de alimentos e aumento da segurança alimentar e nutricional.

Dentre as iniciativas brasileiras desenvolvidas para este cenário podemos encontrar o Projeto Fome Zero, lançado em 2003, cujo objetivo consiste no combate à fome por meio do apoio à agricultura familiar, implementação de restaurantes populares, Bancos de Alimentos, entre outras estratégias ([Belik, 2012](#); [Henz; Porpino, 2017](#)).

Com relação a outras iniciativas relevantes, [Santos et al. \(2020\)](#) destacam o Programa Mesa Brasil, que consiste em um projeto desenvolvido pelo SESC (Serviço Social do Comércio) que configura uma Rede Nacional de Bancos de Alimentos. Existem mais de 3000 parceiros doadores, desde produtores rurais até atacadistas e varejistas, que doam os alimentos excedentes ou que já não se encontram nos padrões de comercialização, mas ainda são seguros para consumo. Dessa forma, os alimentos doados são distribuídos principalmente para pessoas em situação de vulnerabilidade social e nutricional assistidas por entidades sociais cadastradas ([SESC, 2023](#)).

Neste mesmo contexto, a Organização Não-Governamental (ONG) Banco de Alimentos representa uma associação civil que recolhe alimentos partindo dos mesmos critérios citados, e os distribui à quem precisa. As entidades sociais cadastradas são atendidas com a distribuição dos alimentos que consiste em uma importante aliada para a complementação nutricional de refeições servidas à população. A organização ainda publica relatórios anuais de transparência com informações da quantidade total de alimentos recebidos e distribuídos, assim como a quantidade de pessoas atendidas ([ONG, 2023](#)).

Considerando as iniciativas apresentadas, é possível verificar a relevância dos Bancos de Alimentos no combate à fome e ao desperdício de alimentos. Sendo assim, a seguir é discutido o papel dos Bancos de Alimentos na busca por segurança alimentar e nutricional, e como o processo de distribuição é realizado por meio destas unidades.

2.3 Bancos de Alimentos

Os Bancos de Alimentos (BAs) surgem visando o combate às perdas e desperdícios de alimentos por meio da reintrodução destes na cadeia de abastecimento, além da garantia de segurança alimentar e nutricional da população beneficiária. No Brasil, as primeiras unidades foram oriundas de uma iniciativa não governamental, posteriormente incorporada na política de segurança alimentar e nutricional. Dessa forma, no país coexistem dois formatos organizacionais, sendo um não governamental e outro com apoio estatal (Belik; Cunha; Costa, 2012).

Em 2016 foi criada a Rede Brasileira de Bancos de Alimentos com a finalidade de fortalecer e integrar o desempenho dos Bancos de Alimentos existentes, além de auxiliar na redução de desperdícios alimentares. Estas organizações recebem alimentos doados que não possuem mais valor para a comercialização, mas ainda se apresentam adequados para o consumo, e assim estes alimentos são distribuídos às entidades e instituições sem fins lucrativos que repassam os alimentos para a sociedade civil que os necessita (Henz; Porpino, 2017).

Além dos dois formatos organizacionais mencionados, são identificadas duas modalidades de funcionamento para os Bancos de Alimentos no cenário nacional. A modalidade Convencional, cujo funcionamento está representado no esquema disposto na Figura 2, conta com uma sede que possui estrutura física e capacidade de triagem e seleção dos alimentos, podendo também dispor de processamento, beneficiamento e estocagem (Brasil, 2020).

Os alimentos doados nesta modalidade podem chegar à unidade por meio dos próprios doadores que realizam a entrega dos produtos. Caso o doador não possa realizar a entrega, a unidade se encarrega de fazer a coleta destes alimentos e encaminhá-los à sede, onde passam por uma triagem e são selecionados para distribuição às entidades beneficiárias. Esta distribuição pode ser feita pelos veículos de transporte do Banco de Alimentos ou os alimentos podem ser retirados na sede pelas próprias entidades.

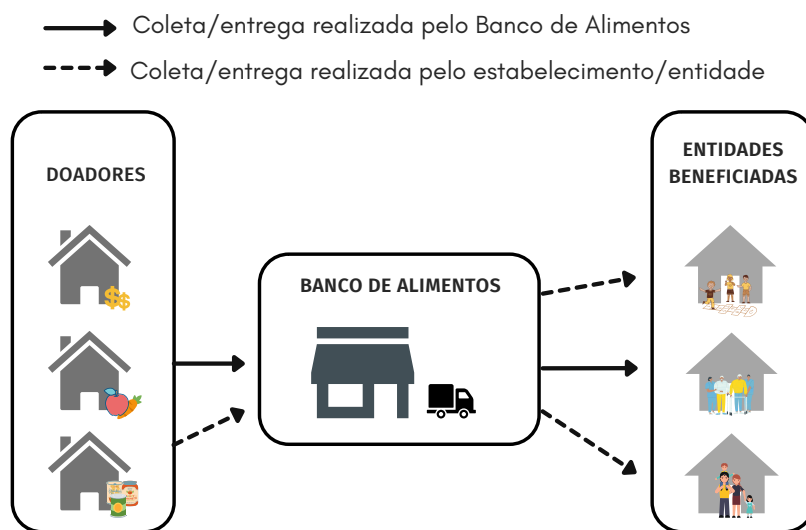


Figura 2 – Esquema de funcionamento de um Banco de Alimentos Convencional.

Já na modalidade Colheita Urbana/Rural, esquematizada na Figura 3, a sede consiste em uma estrutura logística que realiza exclusivamente a coleta, o transporte e a entrega imediata dos alimentos (Brasil, 2020). Nesta modalidade, os veículos de transporte do Banco de Alimentos fazem a coleta das doações, seleção e separação de alimentos no próprio estabelecimento doador, e então é realizada a entrega imediata das doações para as entidades sociais sem passagem pela sede física.

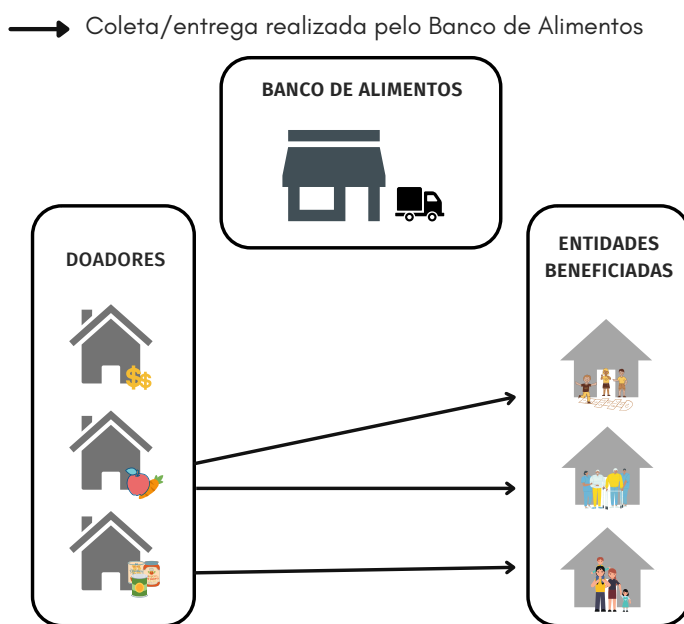


Figura 3 – Esquema de funcionamento de um Banco de Alimentos Colheita Urbana/Rural.

Em busca da caracterização do cenário nacional, o estudo realizado por [Tenuta et al. \(2021\)](#) apresenta uma pesquisa descritiva sobre os Bancos de Alimentos no Brasil. Segundo a pesquisa, existem 217 unidades ativas no território brasileiro, das quais 140 seguem a modalidade Convencional e 77 seguem a modalidade de Colheita Urbana/Rural. Existem informações também sobre os maiores parceiros das unidades, sendo estes os estabelecimentos comerciais, cujas doações são compostas em maior parte por frutas e legumes.

Apesar das divergências apontadas entre as modalidades de funcionamento dos Bancos de Alimentos, alguns aspectos não se alteram, como os doadores e entidades beneficiadas. Em relação aos doadores, estes podem ser doadores financeiros, que representam as instituições ou indivíduos que fazem doações em dinheiro para a unidade, ou também podem doar alimentos, perecíveis ou não perecíveis.

Em relação às entidades beneficiadas, estas podem apresentar diferentes necessidades e público-alvo. Algumas entidades que recebem alimentos por meio desta distribuição consistem em creches, unidades escolares e até mesmo restaurantes populares, que recebem os alimentos e já realizam o preparo das refeições para seu público-alvo, porém esta não é a única forma de consumo. Existe também a entrega de alimentos em forma de *kits*, ou cestas básicas, para a população realizar seu preparo e consumo.

Outro ponto a se ressaltar sobre as entidades beneficiadas consiste na diferença de alimentação apropriada ao público-alvo associado a cada entidade, visto que seu atendimento pode ser voltado para idosos, adultos, crianças ou ainda indivíduos com necessidades especiais, com relação à dieta, devido a alguma patologia. Este fato torna ainda mais importante o processo de seleção e triagem para servir cada entidade de acordo com sua demanda. Segundo [Tenuta et al. \(2021\)](#), as principais entidades atendidas pelos Bancos de Alimentos brasileiros são famílias que se encontram em algum nível de risco social e entidades voltadas para o cuidado infantil.

2.3.1 Alimentos doados

Os alimentos doados aos Bancos de Alimentos podem ser provenientes de campanhas de arrecadação de alimentos, realizadas nos municípios, e também podem vir de doações de empresas, como supermercados ou produtores, quando estes produtos perdem seu valor comercial, ou apresentam baixo interesse comercial, mas ainda apresentam valores nutricionais, estando no prazo de validade e em condições aptas para o consumo. São diversos os tipos de alimentos que podem ser recebidos pelos Bancos de Alimentos.

Segundo [Brasil \(2018\)](#), os alimentos de diversas classificações podem ser aceitos pelos Bancos de Alimentos conforme suas condições. Vale ainda ressaltar que cada classificação de alimento apresenta valor nutritivo distinto, como disposto em [Philippi \(2014\)](#).

- **Hortaliças e frutas *in natura* e inteiras:** hortaliça é a denominação genérica para legumes e verduras, e fruta corresponde a parte polposa que envolve a semente de plantas. Alimen-

tos dessa classificação podem ser aceitos desde que aptos para o consumo segundo a avaliação realizada com base nas características visuais comuns observadas nestes vegetais. São fontes de fibras, minerais e vitaminas, como a vitamina C, complexo B e beta-caroteno (vegetais amarelos).

- **Pães de padaria:** podem ser aceitos produtos, provenientes de padarias regularizadas junto à Vigilância Sanitária, que estejam no prazo de validade. São alimentos que podem ser consumidos em todas as refeições, apresentam uma mistura de diversos ingredientes, como cereais, por exemplo, ricos em carboidratos e energia, além de serem compostos também de proteína e vitaminas. Considerando os cereais integrais, estes são ricos também em fibras, minerais e maior teor de tiamina.
- **Alimentos de origem animal:** podem ser aceitos alimentos minimamente processados, que estejam devidamente embalados, rotulados e nas condições e temperatura indicadas pelo fabricante. Dentre os alimentos de origem animal destaca-se o leite, que contém muitos nutrientes, sendo os principais proteínas, carboidratos, lipídios, vitaminas e minerais. Outros destaques dessa classificação são os ovos e as carnes, fontes de proteínas, gorduras, vitaminas e minerais.
- **Alimentos processados, ultraprocessados e minimamente processados:** podem ser aceitos alimentos que apresentem informações como designação do produto, dados do fabricante ou importador, data de validade e lote. São alimentos de origem animal ou vegetal submetidos a técnicas que os tornam tecnologicamente modificados, isto é, passaram por um ou mais processos antes do consumo, podendo ser cocção, pasteurização, adição de substâncias, entre outros.

Considerando toda a complexidade envolvida no processo, a distribuição de alimentos consiste em uma importante tarefa que deve ser realizada considerando a equidade, que pode ser entendida como a capacidade de servir as necessidades do cliente de maneira justa. Outros conceitos muito importantes que devem ser incorporados ao processo são eficácia e eficiência, visto que a distribuição deve atender às necessidades do consumidor final, mesmo que com os recursos limitados, ou seja, os alimentos disponíveis devem ser aproveitados ao máximo, o melhor possível, garantindo que o processo seja eficiente (Brasil, 2020; Orgut *et al.*, 2016).

3 Abordagem Matemática

Neste capítulo, são apresentados conceitos básicos de programação linear e otimização de maneira geral para entendimento da abordagem matemática utilizada no trabalho, assim como a técnica utilizada para a proposição dos modelos, a Programação por Metas. Além disso, são apresentados os demais métodos utilizados no trabalho para análise de sensibilidade dos pesos, Processo Hierárquico Analítico e o algoritmo *k-means* para clusterização. São apresentados também modelos matemáticos de otimização propostos na literatura com enfoque nos processos logísticos realizados pelos Bancos de Alimentos.

3.1 Programação linear

De maneira geral, um problema de otimização pode ser formalizado em linguagem matemática da seguinte forma (Goldbarg; Luna, 2005):

$$\min \quad f(\mathbf{x}) \quad (3.1)$$

$$\text{s a:} \quad \mathbf{x} \in F, \quad (3.2)$$

em que o objetivo central do problema é a minimização de uma função $f(\mathbf{x})$, como formalizado em (3.1). Dessa forma, buscamos uma solução $\mathbf{x}^*$ cujo valor da função neste ponto, $f(\mathbf{x}^*)$, seja mínimo. Esta busca está sujeita à restrições, ou seja, a solução precisa pertencer a uma região factível (F), como formalizado em (3.2). Esta região factível pode ser delimitada por equações ou inequações, que são classificadas de acordo com suas características.

Considerando estas características, um problema de otimização pode ser classificado de diferentes formas, sendo linear no caso em que os termos da função objetivo e restrições são lineares; não linear, quando possui ao menos uma expressão não linear; etc. Um problema de programação linear (PPL) consiste em um modelo de otimização cuja função objetivo e restrições apresentam apenas termos lineares. O PPL apresenta uma função objetivo (3.3), em que $c_1, c_2, \dots, c_n$ representam os coeficientes associados à cada variável de decisão $x_1, x_2, \dots, x_n$, e pode ser formulado da seguinte forma:

$$\min \quad c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \quad (3.3)$$

$$\text{s a:} \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \geq b_1, \quad (3.4)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leq b_2, \quad (3.5)$$

$$\vdots \quad (3.6)$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m, \quad (3.7)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0. \quad (3.8)$$

As restrições de um problema de otimização podem se apresentar na forma de inequações, como em (3.4) e (3.5), ou ainda podem ser dispostas na forma de equação, como exemplificado em (3.7). Dessa forma, podemos identificar o problema na forma matricial, em que os coeficientes associados às variáveis de decisão são dispostos em uma matriz de coeficientes $\mathbf{A}$ e então um vetor $\mathbf{b}$ é composto pelos termos independentes. O conjunto de valores para as variáveis de decisão $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ que satisfaz todas as restrições é chamado ponto ou solução factível (Bazaraa; Jarvis; Sherali, 1952). No caso em que todas as restrições podem ser escritas como igualdades, a forma matricial é apresentada da seguinte forma:

$$\min \quad \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (3.9)$$

$$\text{s a:} \quad \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \quad (3.10)$$

$$\mathbf{x} \geq 0. \quad (3.11)$$

Considerando um problema de programação linear cujo objetivo é de minimização, solução ótima é uma solução factível que apresenta o menor valor para a função objetivo dentre as demais soluções factíveis. Dentre os métodos para a resolução de problemas de programação linear, um amplamente utilizado é o método simplex, que trabalha com a ideia de busca da solução ótima entre os vértices formados pelas intersecções das retas representadas pelas restrições (Arenales *et al.*, 2011).

Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para a construção e formulação de um problema de otimização, e sua escolha se dá a partir das particularidades e objetivo de cada problema. Quando lidamos com um problema multiobjetivo de tomada de decisão, uma das alternativas é o uso da técnica de Programação por Metas. Sendo assim, a seguir serão abordados os conceitos básicos referentes a esta técnica, assim como os demais métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

3.2 Programação por Metas

A Programação por Metas consiste em uma abordagem alternativa para lidar com problemas multiobjetivo de tomada de decisão. A técnica se baseia no estabelecimento *a priori* de

um conjunto de valores alvos numéricos, ditos metas, para cada função objetivo do problema. Neste método, o tomador de decisão consiste em uma peça fundamental para a busca de soluções ótimas, visto que conhece a realidade do problema, as necessidades e limitações reais do cenário a ser modelado (Jones; Tamiz, 2010).

Sendo assim, vamos considerar um problema em que existem L metas, sendo $l = 1, \dots, L$, e $\mathbf{x}$ representa o vetor das variáveis de decisão. O valor numérico a ser atingido está representado por b_l , e $f_l(\mathbf{x})$ representa o valor alcançado. De maneira geral, a formulação da l -ésima meta é feita da seguinte forma:

$$f_l(\mathbf{x}) + n_l - p_l = b_l, \quad (3.12)$$

As variáveis n_l e p_l representam os desvios, e correspondem a valores reais não negativos, sendo o valor faltante e excedente, respectivamente, para o cumprimento da meta estabelecida. Ambas variáveis são não negativas e não podem assumir valores diferentes de zero simultaneamente (Jones; Tamiz, 2010).

Neste sentido, os desvios indesejados devem ser minimizados e uma métrica para medir estes desvios deve ser estabelecida. Dependendo da métrica utilizada, tem-se uma variante para a Programação por Metas. Considerando as variantes baseadas na métrica de distância, a estratégia de Programação por Metas Ponderadas, do inglês *Weighted Goal Programming* (WGP), pode também ser encontrada na literatura como *Non-pre-emptive Goal Programming*, propõe que os desvios indesejados são associados a pesos, μ_l e ν_l , determinados conforme as preferências de um tomador de decisão, permitindo compensações diretas entre todas as variáveis de desvio indesejadas, uma vez que são colocadas em uma única função de realização ponderada e normalizada (Jones; Tamiz, 2010).

O problema é modelado da seguinte forma:

$$\min \sum_{l=1}^L \left(\frac{\mu_l n_l}{k_l} + \frac{\nu_l p_l}{k_l} \right) \quad (3.13)$$

$$\text{s a: } f_l(\mathbf{x}) + n_l - p_l = b_l, \quad l = 1, \dots, L, \quad (3.14)$$

$$\mathbf{x} \in F, \quad (3.15)$$

$$n_l, p_l \geq 0, \quad l = 1, \dots, L. \quad (3.16)$$

em que k_l , com $l = 1, \dots, L$, representam constantes de normalização associadas com a respectiva meta, e F representa a região factível da variável $\mathbf{x}$, ou seja, é formada pelos pontos do espaço decisão que satisfazem todas as restrições do problema. O problema deve ser construído de forma a minimizar apenas os desvios indesejados.

Outra variante é denominada Programação por Metas Chebyshev, do inglês *Chebyshev Goal Programming* (CGP), e utiliza a ideia oposta à variante WGP apresentada, uma vez que o desvio máximo, denominado λ , que delimita superiormente os desvios indesejados, é minimi-

zado. Este limitante máximo λ corresponde a uma nova variável do problema que pode assumir valores não negativos. Sendo assim, a formulação do problema se dá como segue:

$$\min \quad \lambda \quad (3.17)$$

$$\text{s a: } f_l(\mathbf{x}) + n_l - p_l = b_l, \quad l = 1, \dots, L, \quad (3.18)$$

$$\left(\frac{\mu_l n_l}{k_l} + \frac{\nu_l p_l}{k_l} \right) \leq \lambda, \quad l = 1, \dots, L, \quad (3.19)$$

$$\mathbf{x} \in F, \quad (3.20)$$

$$\lambda, n_l, p_l \geq 0, \quad l = 1, \dots, L. \quad (3.21)$$

A variante de CGP é utilizada em situações nas quais o objetivo é encontrar soluções ótimas para modelos lineares que não estão localizados em pontos extremos no espaço de decisão, pois tem o potencial de fornecer a solução mais adequada quando um equilíbrio entre os níveis de satisfação das metas é necessário.

Considerando um problema em que é necessária a busca por soluções eficientes e equitativas, a Programação por Metas Estendida, do inglês *Extended Goal Programming* (EGP) é a mais adequada, uma vez que a formulação combina soluções eficientes, provenientes do uso da técnica WGP, e soluções equitativas, pela variante CGP (Romero, 2001). Esta combinação das técnicas é ponderada na função objetivo pelo parâmetro α . Sendo assim, quando $\alpha = 0$ temos apenas a variante de WGP, já no caso em que $\alpha = 1$, apenas a variante de CGP, e no caso em que o parâmetro assume valores entre 0 e 1, ou seja, $0 < \alpha < 1$, temos o uso das duas técnicas. Sua formulação se dá da seguinte forma:

$$\min \quad \alpha\lambda + (1 - \alpha) \sum_{l=1}^L \left(\frac{\mu_l n_l}{k_l} + \frac{\nu_l p_l}{k_l} \right) \quad (3.22)$$

$$\text{s a: } f_l(\mathbf{x}) + n_l - p_l = b_l, \quad l = 1, \dots, L, \quad (3.23)$$

$$\left(\frac{\mu_l n_l}{k_l} + \frac{\nu_l p_l}{k_l} \right) \leq \lambda, \quad l = 1, \dots, L, \quad (3.24)$$

$$\mathbf{x} \in F, \quad (3.25)$$

$$n_l, p_l \geq 0, \quad l = 1, \dots, L. \quad (3.26)$$

Outra variante amplamente utilizada consiste na variante de Programação por Metas Lexicográfica, do inglês *Lexicographic Goal Programming* (LGP), também conhecida como “Pre-emptive” *Goal Programming* na literatura. LGP é caracterizada pelo uso de níveis de prioridade, em que cada nível corresponde a uma função $h_j(\mathbf{n}, \mathbf{p})$, $j = 1, \dots, J$, de um subconjunto de variáveis de desvio indesejadas $\mathbf{n}$ e $\mathbf{p}$. Em um problema com J níveis de prioridade, temos:

$$\text{Lex min } [h_1(\mathbf{n}, \mathbf{p}), h_2(\mathbf{n}, \mathbf{p}), \dots, h_J(\mathbf{n}, \mathbf{p})] \quad (3.27)$$

$$\text{s a: } f_l(\mathbf{x}) + n_l - p_l = b_l, \quad l = 1, \dots, L, \quad (3.28)$$

$$\mathbf{x} \in F, \quad (3.29)$$

$$n_l, p_l \geq 0, \quad l = 1, \dots, L. \quad (3.30)$$

Dessa forma, é produzida uma série de otimizações sequenciais, sendo os problemas de otimização de maior nível de prioridade resolvidos primeiro. Após a resolução do maior nível de prioridade, seu valor ótimo passa a ser considerado como uma nova restrição do problema, reduzindo assim a região factível dos problemas de otimização resolvidos na sequência. O processo é repetido, até que todos os níveis de prioridade sejam resolvidos. Esta variante é utilizada quando um tomador de decisão tem uma ordenação clara das metas e não deseja fazer comparações diretas entre elas (Jones; Tamiz, 2010).

Entre as variantes apresentadas, principalmente na variante WGP, os pesos desempenham um papel relevante no processo de busca por uma solução ótima que atenda as preferências do tomador de decisão. Por isso, existem estudos voltados para uma análise sistemática de exploração do espaço dos pesos. O estudo conduzido por Jones (2011) propõe um algoritmo revisado capaz de explorar o espaço destes parâmetros para o fornecimento de um relatório sobre a sensibilidade de uma determinada solução escolhida pelo tomador de decisão.

3.2.1 Sensibilidade dos Pesos

A sensibilidade dos pesos associados à técnica de Programação por Metas pode ser analisada utilizando o algoritmo proposto por Jones (2011), que configura uma investigação da parte relevante do espaço dos pesos. Seu propósito geral é resolver o problema WGP para diferentes combinações de pesos, a fim de explorar este espaço e armazenar soluções únicas.

O Algoritmo 1 apresenta o passo a passo do método, que começa com um conjunto inicial de pesos $\mathbf{w}$. Considerando este conjunto, o modelo WGP é resolvido, $WGP(\mathbf{w})$, e a solução é armazenada. O algoritmo então passa por uma série de iterações, para $n = 1$ até $TMax$, sendo $TMax$ o parâmetro que controla o número de pesos a serem variados simultaneamente, e, para cada subconjunto de desvios de cardinalidade n , é calculado um novo conjunto de pesos pela subrotina $Calc_Max$.

A subrotina $Calc_Max$ calcula o nível máximo de peso que pode ser compartilhado entre os desvios de acordo com as proporções de importância fornecidas na solução inicial, mantendo-se dentro dos limites especificados pelas informações adicionais de preferência fornecidas pelo usuário. Em alguns casos, o cálculo do novo conjunto de pesos pode ser feito de maneira simples, com base apenas nas informações de preferência fornecidas. No entanto, em outros casos, é necessário construir e resolver um modelo LGP com dois níveis de prioridade,

onde os valores de peso são tratados como variáveis de decisão e as preferências do usuário são impostas como restrições. Com a resolução do modelo LGP, é encontrado o vetor de peso máximo.

Em seguida, a subrotina *Examine_Weight_Line* divide recursivamente o intervalo de pesos considerando os dois últimos conjuntos analisados, e resolve o modelo WGP para os valores intermediários, garantindo que todos os resultados possíveis sejam examinados. Esta subrotina utiliza um parâmetro que também deve ser estabelecido *a priori*, *Max_Level*, que corresponde ao parâmetro que controla o número máximo de divisões da linha na direção entre os conjuntos de pesos para o cálculo dos valores intermediários.

O conjunto inicial de pesos, w , pode ser definido de três diferentes formas, sendo a primeira delas uma estimativa feita pelo tomador de decisão, com base em suas preferências, a segunda é a consideração de um esquema de pesos iguais, e a terceira forma consiste em encontrar um conjunto de pesos utilizando métodos de comparação em pares utilizando as preferências de um tomador de decisão (Jones, 2011).

Algoritmo 1: Estudo da sensibilidade dos pesos (Jones, 2011).

Entrada: Dados conjunto de pesos iniciais $\mathbf{w}$ e parâmetros $TMax$ e Max_Level ;
 $S = \emptyset$;
 Adicione o resultado do $WGP(\mathbf{w})$ em S ;
para $n = 1, \dots, TMax$ **faça**
 para cada subconjunto T^* de desvios de cardinalidade n **faça**
 Forme um novo vetor $\mathbf{w}^*$ pela rotina $Calc_Max(T^*, max_weight_vector)$;
 Defina $w = max_weight_vector$;
 se o resultado do $WGP(\mathbf{w})$ não está em S **então**
 | Adicione o resultado de $WGP(\mathbf{w})$ em S ;
 fim
 Seja $\mathbf{w} = \mathbf{w}_{low}$ e $\mathbf{w}^* = \mathbf{w}_{up}$
 Execute a rotina $Examine_Weight_Line(\mathbf{w}_{low}, \mathbf{w}_{up}, 1)$;
 fim
fim

Rotina $Examine_Weight_Line(\mathbf{w}_{low}, \mathbf{w}_{up}, level)$

se o resultado do $WGP(\mathbf{w}_{low}) =$ o resultado do $WGP(\mathbf{w}_{up})$ **então**
 | Fim;
fim
se $level > Max_Level$ **então**
 | Fim;
fim
 Forme um novo vetor de pesos $\mathbf{w}_{mid} = \frac{(\mathbf{w}_{low} + \mathbf{w}_{up})}{2}$;
se o resultado do $WGP(\mathbf{w}_{mid})$ não está em S **então**
 | Adicione o resultado do $WGP(\mathbf{w}_{mid})$ em S ;
fim
 $Examine_Weight_Line(\mathbf{w}_{low}, \mathbf{w}_{mid}, level + 1)$;
 $Examine_Weight_Line(\mathbf{w}_{mid}, \mathbf{w}_{up}, level + 1)$;

Rotina $Calc_Max(T^*, max_weight_vector)$

Encontre os conjuntos de pesos considerando as preferências do tomador de decisão via metodologia desejada;

3.2.2 Processo Hierárquico Analítico

O Processo Hierárquico Analítico (AHP, do inglês *Analytical Hierarchy Process*) é uma técnica proposta por Thomas Saaty, e usada para comparações em pares, que analisa as escolhas de um ou mais tomadores de decisão, considerando a inclusão de fatores subjetivos (Emrouzne-

jad; Marra, 2017). Dentre os motivos que tornam o método interessante podemos destacar sua flexibilidade para ser integrado a diferentes técnicas, e também a possibilidade de verificar a consistência da decisão (Donegan; Dodd, 1991; Vaidya; Kumar, 2006).

Os elementos a serem estudados devem ser estruturados em uma hierarquia de diferentes níveis. Para isso, comparações devem ser feitas considerando cada par de elementos, a Escala Fundamental de Saaty varia de 1 a 9, sendo 1 para igual importância, ou superior considerando os demais valores, e então a escala é calibrada. Com estes valores, uma matriz é construída, sendo seus elementos as comparações a cada dois elementos do problema. Cálculos são realizados para encontrar o maior autovalor, o Índice de Consistência (CI), a Razão de Consistência (CR), e os valores normalizados para cada elemento (Vaidya; Kumar, 2006).

A medida do índice de consistência proposto por Saaty é calculada utilizando o maior autovalor e a ordem da matriz. Além dessa informação, também é utilizado o valor de índice de consistência aleatório que consiste na média dos CIs de matrizes de mesma ordem. Com isso, a CR representa uma versão redimensionada do CI, e representa a razão entre CI e o índice de consistência aleatório. Para que uma matriz seja considerada consistente, a CR deve ser menor ou igual a 0,1 (Pant *et al.*, 2022). Se os valores para o maior autovalor, o CI e o CR forem aceitáveis, a decisão é tomada com base nos valores normalizados (Vaidya; Kumar, 2006).

Além do método AHP para implementação do algoritmo de análise de sensibilidade dos pesos, também foi utilizado um método de clusterização, que é apresentado na sequência.

3.2.3 Algoritmo *k-means* para clusterização

A clusterização consiste em uma técnica utilizada quando é necessário a separação dos dados em grupos ou categorias distintas. Existem diversos métodos para isso, e a escolha deve ser baseada nas particularidades e necessidades de cada caso. O algoritmo *k-means* consiste em um método para clusterização amplamente utilizado, e pode ser descrito como um modelo de aprendizado não supervisionado (Cui, 2020).

Este algoritmo é baseado na realocação iterativa de pontos entre os clusters de acordo com cálculos de similaridade. Estes cálculos são baseados em métricas de distância e, normalmente, é calculada a distância euclidiana, tornando assim possível a determinação de centroides (Morissette; Chartier, 2013).

Para que o algoritmo tenha início, é necessária a definição do número k de centroides, ou seja, o número total de clusters. O processo de definição do número k de clusters nem sempre é intuitivo, por isso, existem métodos para facilitar a determinação de um número de clusters adequado para o uso do algoritmo de maneira eficiente.

O método do cotovelo, também conhecido por seu nome em inglês *Elbow Method*, é capaz de auxiliar esta escolha para que seja feita de maneira assertiva. Consiste na análise do comportamento gráfico da soma das distâncias quadráticas dos pontos em relação ao centroide do

cluster, sendo esta métrica conhecida como WCSS (do inglês, *Within-Cluster Sum-of-Squares*). Considerando o número de clusters no eixo x e a métrica WCSS no eixo y , a busca é feita por um ponto de inflexão na curva, que pode ser considerado como um “cotovelo”. Este ponto então indica o melhor valor para k (Cui, 2020).

Após definido o valor para k , ou seja, o número de clusters que os dados serão divididos, o algoritmo calcula as similaridades entre os pontos utilizando a métrica de distância, e então os pontos são organizados de acordo com esta medida. Em seguida, são feitas atualizações deste agrupamento, uma vez que a busca é pela minimização da soma das distâncias entre os pontos e seus respectivos centroides. Este passo continua até que não haja mais mudanças, ou algum outro critério de tolerância pré-estabelecido seja atendido (Morissette; Chartier, 2013).

4 Programação por Metas Aplicada ao Problema de Distribuição de Alimentos

Neste capítulo, primeiramente são apresentados os modelos matemáticos aplicados ao problema de distribuição de alimentos encontrados na literatura. Na sequência, são apresentados dois modelos de otimização desenvolvidos para o processo de distribuição realizado pelos BAs brasileiros. Além disso, são apresentadas as informações sobre o Banco de Alimentos de Botucatu, assim como a descrição dos dados referentes ao Banco de Alimentos da cidade de Botucatu – SP.

4.1 Modelos Matemáticos Aplicados ao Problema de Distribuição de Alimentos

Os modelos matemáticos de otimização são muito importantes para o entendimento e compreensão de diversos processos, visto que buscam traduzir o comportamento encontrado em cenários realísticos em relações algébricas, facilitando assim a busca por ferramentas de auxílio à tomada de decisão, e seu aprimoramento.

Considerando os processos realizados por BAs, a logística pode ser estudada em diferentes níveis, desde a localização das instalações da organização, até a distribuição de alimentos para a população (Mahmoudi; Shirzad; Verter, 2022). Segundo a revisão da literatura realizada por Rivera, Smith e Ruiz (2023), o número de publicações envolvendo os temas de otimização de processos realizados por BAs é baixo se comparado às demais aplicações, porém, se encontra em crescimento, mostrando a atualidade e relevância da problemática.

O problema abordado por Balcik, Iravani e Smilowitz (2014) consiste em um problema de alocação sequencial de veículos envolvidos no sistema de distribuição sem fins lucrativos para minimizar as doações não distribuídas, considerando ainda a maximização da equidade. Já Davis *et al.* (2014), que também apresentam estudos relacionados aos veículos envolvidos no sistema de distribuição, desenvolvem horários de transporte que permitam os Bancos de Alimentos coletarem alimentos de fontes locais e entregarem os alimentos às agências beneficentes. Outro trabalho neste contexto, proposto por Solak, Scherrer e Ghoniem (2014) propõe uma pro-

gramação de rotas para os veículos de entrega das redes de distribuição de alimentos sem fins lucrativos.

O modelo proposto por [Orgut et al. \(2016\)](#) visa a minimização do desperdício de alimentos, ou seja, a quantidade de alimentos não distribuídos pelo Banco de Alimentos. O modelo proposto no estudo apresenta restrições relacionadas à equidade, capacidade de cada centro e também quantidade total de alimento disponível. [Orgut, Ivy e Uzsoy \(2017\)](#) apresentam modelos estocásticos com a finalidade de tornar a distribuição de alimentos mais equitativa e eficaz, uma vez que a demanda de alimentos normalmente excede a quantidade de alimentos doados, além de incorporar a minimização dos desperdícios de alimentos no processo. [Orgut et al. \(2018\)](#) propõem dois modelos de otimização robusta, abordando a incerteza na quantidade de alimentos doados que os municípios podem efetivamente receber e distribuir, em que os modelos buscam a maximização da quantidade de alimento distribuído.

Considerando modelos de programação inteira, o estudo proposto por [\(Ahire; Pekgun, 2018\)](#) apresenta um modelo a fim de determinar qual deve ser o número de eventos para cada iniciativa no ano de forma que a renda total das refeições produzidas por um Banco de Alimentos seja máxima. Para isso, o modelo proposto no estudo apresenta restrições referentes à disponibilidade de recursos e também ao número máximo de eventos permitidos para cada iniciativa.

O modelo proposto por [Martins, Melo e Pato \(2019\)](#) apresenta uma estratégia de reorganização da rede de abastecimento de Bancos de Alimentos com várias escalas para a coleta de doações e sua distribuição a agências beneficentes. As decisões incluem a abertura de novos Bancos de Alimentos ao longo de um horizonte de planejamento de vários períodos. Além disso, os Bancos de Alimentos existentes podem ser fechados ou ter suas capacidades expandidas. O modelo abrange as três esferas da sustentabilidade (econômica, ambiental e social) configurando um problema de otimização multiobjetivo.

O estudo realizado por [Castanon, Campos e Martinez \(2020\)](#) apresenta um modelo linear para o fornecimento de alimentos a fim de determinar as estratégias adequadas para uma semana de atendimento da população, com atenções voltadas às necessidades de macronutrientes, sendo o estudo voltado para a realidade de Madri. Já o estudo conduzido por [\(Gomez-Pantoja; Salazar-Aguilar; Gonzalez-Velarde, 2021\)](#) propõe um problema de alocação de recursos de Bancos de Alimentos utilizando programação inteira mista, em busca de uma alimentação balanceada e variada aos beneficiários.

Outro modelo aplicado ao problema de distribuição realizado pelos Bancos de Alimentos foi proposto por [Hasnain, Orgut e Ivy \(2021\)](#), e aborda os critérios de equidade, eficácia e eficiência, associados à ponderação, possibilitando que o tomador de decisão adicione suas preferências conforme a atualidade da oferta e a demanda. A função objetivo é construída de maneira que há minimização dos desvios associados à equidade, eficácia e eficiência, sendo cada um dos termos associados às respectivas ponderações. As restrições garantem que o centro e as filiais não distribuam mais alimentos do que a quantidade disponível para o processo. O

estudo realizado por [Hasnain, Orgut e Ivy \(2021\)](#) ainda propõe um algoritmo que determina a ponderação com base nas ações do Banco de Alimentos em um único período.

[Islam e Ivy \(2021\)](#) apresentam um modelo de otimização cujo objetivo consiste na minimização dos custos associados ao processo de distribuição de alimentos, desde custos operacionais dos centros de distribuições, até custos atrelados aos alimentos não distribuídos. O modelo incorpora conceitos de equidade para a busca de uma atribuição eficiente de regiões de demanda aos centros de distribuição (filiais), assim como a alocação equitativa dos alimentos doados desde as agências do Banco de Alimentos até as regiões de demanda.

Existem também estudos mais recentes, como o estudo proposto por [Kaviyani-Charati et al. \(2022\)](#), o qual apresenta um modelo multiobjetivo, multiperíodo e multiproduto para Bancos de Alimentos, considerando desde armazenamento dos alimentos, até instalações de transporte, considerando restrições de tempo. O estudo realizado por [Ghahremani-Nahr, Ghaderi e Kian \(2023\)](#) também propõe um modelo multiobjetivo, porém, considera diferentes aspectos voltados para o valor nutricional dos alimentos e seu frescor.

Apesar dos diversos estudos voltados para a otimização da logística dos processos nos Bancos de Alimentos, ainda há escassez de estudos focados especificamente na realidade brasileira, a maioria dos estudos existentes não aborda de maneira profunda os desafios enfrentados por Bancos de Alimentos no Brasil. Além disso, observa-se uma limitação de estudos utilizando a técnica de programação por metas na área. Assim, o presente trabalho se destaca ao preencher essa lacuna, propondo uma abordagem inovadora e alinhada às necessidades dos Bancos de Alimentos do contexto brasileiro.

4.2 Modelos Propostos

Foram propostos dois modelos de otimização, M1 e M2, que correspondem ao mesmo processo de distribuição de alimentos, porém, são propostos para diferentes situações. Enquanto o modelo M1 foi pensado para a distribuição diária de alimentos, o modelo M2 pode ser utilizado para o planejamento do processo considerando, por exemplo, uma semana, desde que conhecida a quantidade de alimentos em todo o período. Assim, o modelo M2 considera também um parâmetro relacionado ao estoque, sendo possível o armazenamento de alimentos para distribuição em dias posteriores em busca de uma distribuição mais equitativa durante todo o horizonte de planejamento.

4.2.1 Modelo M1

O modelo proposto M1 utiliza a técnica EGP em sua formulação, a qual combina as técnicas de CGP e WGP por meio de um parâmetro α . Dessa forma, o problema visa a minimização do desvio máximo de Chebyshev, representado por λ , e a minimização da soma ponderada dos desvios n_i faltantes das demandas D_i , sendo i a representação de cada instituição atendida

pelo Banco de Alimentos. A ponderação associada aos desvios n_{ai} , que correspondem aos desvios indesejados do alimento a e instituição i , em (4.1), está representada por μ_i , de forma que $\sum_{i \in I} \mu_i = 1$, sendo I a representação do conjunto de todas as instituições atendidas. Os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão considerados no modelo estão apresentados e descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Notação utilizada no modelo M1.

Notação	Definição	Tipo
I	Conjunto de todas as instituições atendidas	Conjunto
B	Conjunto de todos os BAs considerados	Conjunto
A	Conjunto de todos os tipos de alimentos disponíveis para doação	Conjunto
I_b	Conjunto das instituições atendidas pelo BA b	Conjunto
I_f	Conjunto das instituições atendidas pelo BA b que atendem diretamente famílias	Conjunto
D_i	Demanda de alimentos da Instituição i	Parâmetro
g_{ai}	Proporção do alimento a para a Instituição i	Parâmetro
C_i	Capacidade de recebimento de alimentos da Instituição i	Parâmetro
Q_{ab}	Quantidade total de alimento a disponível para distribuição no BA b	Parâmetro
fam_k	Número de famílias atendidas pela instituição k	Parâmetro
α	Ponderação das técnicas na função objetivo	Parâmetro
μ_i	Peso associado a meta da Instituição i	Parâmetro
λ	Desvio máximo de Chebyshev	Variável de decisão
x_{abi}	Quantidade de alimento a distribuído pelo BA b para Instituição i	Variável de decisão
n_{ai}	Desvio faltante do alimento a para atingir a meta da Instituição i	Variável de decisão
p_{ai}	Desvio excedente do alimento a da meta da Instituição i	Variável de decisão
y_k	Quantidade de alimento de cada kit enviado para a Instituição k	Variável de decisão
$z_{abb'}$	Quantidade do alimento a recebido pelo BA b do BA b'	Variável de decisão
$z_{ab'b}$	Quantidade do alimento a enviado do BA b para o BA b'	Variável de decisão

O modelo M1 é dado por:

$$\min \quad \alpha\lambda + (1 - \alpha) \left(\sum_{i \in I} \mu_i \frac{\sum_{a \in A} n_{ai}}{D_i} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{s a:} \quad x_{abi} + n_{ai} - p_{ai} = D_i g_{ai}, \quad i \in I_b, b \in B, a \in A, \quad (4.2)$$

$$\sum_{a \in A} x_{abi} \leq C_i, \quad i \in I, b \in B, \quad (4.3)$$

$$fam_k y_k = \sum_{a \in A} x_{abk}, \quad k \in I_f \subset I, b \in B, \quad (4.4)$$

$$\mu_i \frac{\sum_{a \in A} n_{ai}}{D_i} \leq \lambda, \quad i \in I, \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in I_b} x_{abi} = Q_{ab} + \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} z_{abb'} - \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} z_{ab'b}, \quad a \in A, b \in B, \quad (4.6)$$

$$\lambda \geq 0, \quad (4.7)$$

$$x_{abi} \geq 0, \quad i \in I, a \in A, b \in B, \quad (4.8)$$

$$n_{ai}, p_{ai} \geq 0, \quad i \in I, a \in A, \quad (4.9)$$

$$y_k \geq 0, \quad k \in I_f \subset I, \quad (4.10)$$

$$z_{abb'}, z_{ab'b} \geq 0, \quad a \in A, b, b' \in B, b' \neq b. \quad (4.11)$$

A restrição (4.2) determina que a quantidade de alimentos x_{abi} do tipo a distribuído pelo BA b para a instituição i , considerando os desvios faltantes (n_{ai}) e excedentes (p_{ai}), deve ser igual a sua demanda D_i multiplicada por g_{ai} que representa a preferência de recebimento da instituição, ou seja, a proporção que a instituição deseja receber do tipo de alimento a . A restrição (4.3) representa a limitação da quantidade de alimento recebida segundo a capacidade de recebimento de cada instituição.

Com relação às instituições que recebem alimentos já separados em forma de *kits* para distribuição direta às famílias, a restrição (4.4) determina a quantidade total de alimento y_k que cada família atendida receberá. A restrição (4.5) está associada a limitação dos desvios faltantes, que devem ser menores que um desvio máximo λ , característica da técnica de Programação por Metas utilizada.

A limitação da quantidade total de alimentos distribuídos é realizada pela restrição (4.6) considerando a quantidade total disponível para doação em cada BA, assim como os alimentos enviados e recebidos. As restrições (4.7), (4.8), (4.9), (4.10) e (4.11) representam a não negatividade das variáveis de decisão envolvidas no modelo.

4.2.2 Modelo M2

O modelo M2 utiliza a mesma variante de Programação por Metas, a EGP, para a formulação do modelo, e as informações gerais sobre parâmetros, conjuntos e variáveis estão dispostas na Tabela 1, porém, difere do modelo M1 por permitir o processo de distribuição de alimentos considerando horizontes de planejamento. Sendo assim, um novo conjunto T é adicionado, referente aos dias considerados para a distribuição. O modelo M2 permite também a consideração de estoque, representado por E_{abt} , referente à quantidade de alimento (em kg) do tipo a , no BA b , no momento t , em estoque na sede do BA. Outra mudança está relacionada aos dois tipos de instituições consideradas no modelo M1, uma vez que apenas um tipo de instituição é considerada no modelo M2, a que recebe os alimentos em quantidades totais sem a separação dos alimentos em *kits*, porém, a restrição (4.4) pode ser facilmente incluída no modelo M2 caso necessário.

O modelo M2 é dado por:

$$\min \quad \alpha\lambda + (1 - \alpha) \left(\sum_{i \in I} \mu_i \frac{\sum_{a \in A} n_{ai}}{D_i} \right) \quad (4.12)$$

$$\text{s a:} \quad x_{abit} + n_{ai} - p_{ai} = g_{ai}D_i, \quad i \in I_t, t \in T, a \in A, b \in B, \quad (4.13)$$

$$\sum_{a \in A} x_{abit} \leq C_i, \quad i \in I_t, t \in T, b \in B, \quad (4.14)$$

$$\mu_i \frac{\sum_{a \in A} n_{ai}}{D_i} \leq \lambda, \quad i \in I, \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in I_t} x_{abit} \leq Q_{abt} + E_{ab(t-1)} + \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} z_{abb't} - \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} z_{ab'b't} \quad a \in A, t \in T, \quad (4.16)$$

$$E_{abt} = Q_{abt} + E_{ab(t-1)} - \sum_{i \in I_t} x_{abit} + \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} z_{abb't} - \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} z_{ab'b't}, \quad a \in A, t \in T, \quad (4.17)$$

$$\lambda \geq 0, \quad (4.18)$$

$$x_{abit} \geq 0, \quad i \in I_t, a \in A, b \in B, t \in T, \quad (4.19)$$

$$n_{ai}, p_{ai} \geq 0, \quad i \in I_t, a \in A, \quad (4.20)$$

$$z_{ab'b't}, z_{abb't} \geq 0, \quad a \in A, t \in T, b, b' \in B, b' \neq b \quad (4.21)$$

$$E_{abt} \geq 0, \quad a \in A, t \in T, b \in B, \quad (4.22)$$

$$E_{ab0} = 0 \quad a \in A, b \in B. \quad (4.23)$$

Os processos e fatores considerados no modelo proposto M2 podem ser considerados os mesmos já apresentados no modelo M1. As principais diferenças estão nas restrições (4.16) e (4.17), as quais agora consideram uma variável de decisão referente ao estoque do tipo de alimento a , no BA b , no tempo t . O estoque disponível no dia anterior $t - 1$ é considerado como alimento adicional para a distribuição no dia t . Além disso, o estoque atual é calculado com base na soma de todos os alimentos disponíveis menos a soma de todos os alimentos distribuídos.

A seguir são apresentadas as informações referentes à implementação do algoritmo para estudo da sensibilidade dos pesos associados à técnica de Programação por Metas.

4.3 Estudo da Sensibilidade dos Pesos

O estudo da sensibilidade dos pesos associados à técnica de Programação por metas foi realizado por meio da implementação do método proposto por Jones (2011) apresentado na Seção 3.2.1. Para o estudo, foi utilizado o modelo M2 considerando $\alpha = 0$, ou seja, apenas com a variante de Programação por Metas Ponderadas. Na sequência, são apresentadas as configurações dos parâmetros utilizados para a implementação do método adaptado para o problema em questão.

Os parâmetros utilizados para implementação do algoritmo, $TMax$ e Max_Level , respectivamente, foram iguais a 2 e 1. Os pesos analisados foram classificados em quatro grupos por meio da clusterização, de forma que o conjunto inicial de pesos é composto por v_i , sendo $i = 1, 2, 3, 4$. Além disso, para a determinação dos conjuntos de pesos, foram construídos conjuntos de modelos de LGP.

Foram estudados três diferentes casos abordando as diferentes configurações que podem ser encontradas considerando o cenário brasileiro. O Caso 1 aborda o cenário em que existem desertos alimentares, sendo a priorização das instituições feitas de acordo com sua localização. O Caso 2 aborda o cenário em que todos os pesos são iguais, e o Caso 3 aborda a realidade do Banco de Alimentos de Botucatu – SP, com as preferências do tomador de decisão.

Como indicado no Algoritmo 1 disponível na Seção 3.2.1, a rotina *Calc_Max* é responsável por encontrar os conjuntos de pesos que serão avaliados. Sendo assim, com a finalidade de encontrar o maior valor de cada direção de peso com variação única, para o Caso 1 e 2, foi construído o seguinte conjunto de quatro modelos LGP, baseado no estudo realizado por Jones (2011), sendo $i = 1, 2, 3, 4$:

$$\text{Lex min} \quad \left[-v_i, \sum_{k=1}^3 n_k + p_k \right] \quad (4.24)$$

$$\text{s a:} \quad v_3 - v_4 \geq 0 \quad (4.25)$$

$$v_3 - v_1 \geq 0 \quad (4.26)$$

$$v_3 - v_2 \geq 0 \quad (4.27)$$

$$\sum_{q=1}^4 v_q = 1 \quad (4.28)$$

$$v_j v_l^* + n_k - p_k = v_i v_j^*, \quad l > j, j \neq i, l \neq i \quad (4.29)$$

$$v_1^{\min} \leq v_1 \leq v_1^{\max} \quad (4.30)$$

$$v_2^{\min} \leq v_2 \leq v_2^{\max} \quad (4.31)$$

$$v_3^{\min} \leq v_3 \leq v_3^{\max} \quad (4.32)$$

$$v_4^{\min} \leq v_4 \leq v_4^{\max} \quad (4.33)$$

$$n_k, p_k \geq 0 \quad k = 1, 2, 3, \quad (4.34)$$

onde os pesos v_1, v_2, v_3 e v_4 são considerados variáveis de decisão, e são considerados dois níveis hierárquicos para a otimização. Primeiramente, é realizada a maximização do peso v_i cuja direção está sendo investigada, e então, em sequência, o restante é distribuído de forma balanceada entre os demais pela segunda otimização seguindo as restrições (4.30) – (4.33). Como forma de padronização, para todos os casos estudados foram utilizados valores $v_i^{\min}$ referentes a 50% do respectivo valor de v_i , com $i = 1, \dots, 4$, e $v_i^{\max}$ como 150% do respectivo valor de v_i .

Para a avaliação do aumento máximo quando o interesse se dá em pares de pesos, foi construído um novo conjunto de seis modelos LGP com dois níveis hierárquicos, sendo $i = 1, 2, 3, 4, m = 1, 2, 3, 4$ e $i < m$, baseado no estudo realizado por Jones (2011), dado por:

$$\text{Lex min} \quad [-v_i, n + p] \quad (4.35)$$

$$\text{s a:} \quad v_j^* v_m = v_i^* v_m \quad (4.36)$$

$$v_3 - v_4 \geq 0 \quad (4.37)$$

$$v_3 - v_1 \geq 0 \quad (4.38)$$

$$v_3 - v_2 \geq 0 \quad (4.39)$$

$$\sum_{q=1}^4 v_q = 1 \quad (4.40)$$

$$v_j v_l^* + n - p = v_l v_j^*, \quad l > j, j \neq i, m, l \neq i, m \quad (4.41)$$

$$v_1^{\min} \leq v_1 \leq v_1^{\max} \quad (4.42)$$

$$v_2^{\min} \leq v_2 \leq v_2^{\max} \quad (4.43)$$

$$v_3^{\min} \leq v_3 \leq v_3^{\max} \quad (4.44)$$

$$v_4^{\min} \leq v_4 \leq v_4^{\max} \quad (4.45)$$

$$n, p \geq 0 \quad (4.46)$$

No Caso 3, para que as preferências do tomador de decisão fossem atendidas, as restrições (4.25) – (4.27) e (4.37) – (4.39) dos modelos apresentados acima foram substituídas pelas seguintes inequações:

$$\frac{v_1}{12} - \frac{v_2}{17} \geq 0 \quad (4.47)$$

$$\frac{v_2}{17} - \frac{v_3}{3} \geq 0 \quad (4.48)$$

$$\frac{v_3}{3} - \frac{v_4}{9} \geq 0 \quad (4.49)$$

O conjunto de modelos LGP segue os mesmos conceitos do conjunto apresentado anteriormente, porém, agora considera pares de pesos.

A seguir são apresentadas informações referentes ao Banco de Alimentos da cidade de Botucatu - SP, uma vez que foram realizadas visitas à sede física da organização para entender sobre seu funcionamento e verificar as possíveis demandas incorporadas nos modelos propostos e demais estudos.

4.4 Banco de Alimentos de Botucatu – SP

O Banco de Alimentos “Lourdes Pedutti Soares Batista” foi criado em dezembro de 2015 no município de Botucatu, estado de São Paulo, e atua com o objetivo central de minimizar a fome e o desperdício de alimentos. Foi construído com recursos do município e conta com uma

sede que possui infraestrutura física para recebimento, higienização e processamento, quando necessário, dos alimentos doados a distribuição às instituições sociais da cidade.

A organização visitada funciona de segunda a sexta-feira, possui uma sede com a infraestrutura necessária para o processo de recebimento dos alimentos, seleção e distribuição. Atualmente é mantida com recursos municipais através da Secretaria de Assistência Social, conta com um veículo para a realização das coletas de alimentos doados diariamente, por meio de determinadas rotas, que podem sofrer adaptações conforme a necessidade. Além disso, a organização conta com dez funcionários, sendo um nutricionista, um técnico de nutrição, um assistente social, um motorista, seis auxiliares de serviços gerais e dois voluntários.

Os principais doadores podem ser classificados como grandes redes de supermercados presentes na cidade, porém, produtores rurais também contribuem com doações de alimentos. Com relação aos alimentos recebidos, a maior parte corresponde a alimentos de hortifrúti, como legumes, verduras e frutas, normalmente recebidos conforme a sazonalidade. Outros alimentos também podem ser encontrados entre as doações, como leite, ovos e alimentos não perecíveis, presentes em cestas básicas, porém, em menor quantidade.

Os alimentos recebidos são selecionados e separados de forma que atendam todas as entidades cadastradas na organização. O Banco de Alimentos de Botucatu – SP não trabalha com o atendimento direto às famílias, sendo assim, para as famílias terem acesso aos alimentos distribuídos pela organização, estas precisam estar cadastradas em uma das instituições, e então estas fazem a ligação entre as famílias e os alimentos doados.

O cadastramento das instituições sociais é renovado anualmente e alguns critérios devem ser atingidos. Entre os critérios, a instituição deve estar inscrita em conselhos específicos, como o Conselho Municipal dos Direitos da Criança e do Adolescente ou o Conselho Municipal de Assistência Social; possuir vínculo formal com a Prefeitura; e estar regularizada na vigilância sanitária.

Existem diferentes tipos de entidades atendidas, configurando diferentes distribuições de alimentos. Entidades que atendem diretamente o público, com o fornecimento de refeições, recebem os alimentos de maneira geral em forma de quantidade, em quilogramas, e esta quantidade pode ser entendida como a demanda de cada entidade, informada pela própria instituição conforme o número de pessoas por ela atendidas. Outro tipo de entidade consiste nas instituições que atendem diretamente as famílias. Estas, então, fornecem ao Banco o número de famílias atendidas. Sendo assim, a distribuição de alimentos é realizada de forma mais individualizada, já sendo enviadas as quantidades divididas nos chamados *kits*, que representam uma quantidade de alimentos que será enviado para cada família por meio da entidade. É importante que cada *kit* apresente uma variedade de alimentos, para que a família atendida tenha acesso a uma alimentação saudável e balanceada.

Convencionalmente, o Banco de Alimentos da cidade de Botucatu – SP adotou uma mé-

dia de 5,00 kg de alimento por *kit* distribuído, para que todas as famílias tenham acesso semanal aos alimentos. Considerando todos os tipos de entidades, a distribuição de alimentos também considera os alimentos mais adequados para o público atendido em cada entidade, uma vez que determinadas instituições podem atender idosos, crianças ou pacientes com alguma patologia como, por exemplo, diabéticos, sendo indicados alimentos específicos para cada público-alvo.

Outro fato observado é a não ocorrência de perda de alimentos na organização, uma vez que todos os alimentos recebidos são higienizados e selecionados. Aqueles que estão apropriados para o consumo são distribuídos para as entidades. Caso o alimento apresente alguma imperfeição ou urgência no consumo, o alimento é processado, sendo produzidos doces, molhos e polpas para serem incorporados nas doações segundo a disponibilidade e público. Os alimentos que chegam ao Banco, mas já não se apresentam adequados para o consumo, são utilizados na compostagem que possibilita a produção de adubo.

Todos os alimentos distribuídos são provenientes de doações, não sendo realizada a compra de alimentos para este processo. Sendo assim, existem momentos em que a demanda das entidades é maior que a quantidade de alimentos disponível para distribuição. Nestes casos, são feitas adaptações, os tamanhos dos *kits* são reduzidos e também é considerada a priorização no atendimento das demandas provenientes das instituições que assistem à população com maior risco e dificuldade de acesso aos alimentos.

Foi verificado também que existem ligações entre os Bancos de Alimentos, principalmente aqueles que estão situados em uma mesma região, mesmo que em cidades diferentes, de maneira que, quando há sobra de determinado tipo de alimento em um Banco, este pode entrar em contato com outro para realizar esta troca de produtos. Existem casos também em que há sobra de alimentos, mas não se mostra viável a viagem para a coleta devido aos custos associados a este processo, e então este alimento é distribuído para alguma outra entidade que possui demanda, mas que não está dentre aquelas atendidas semanalmente pelo Banco.

A capacidade de recebimento de alimentos do BA visitado é de 30 toneladas ao mês. São aproximadamente 48 instituições atendidas e 36 doadores fixos. Sobre os alimentos processados, em média são 1000 kg de alimentos ao mês. Os alimentos recebidos no dia normalmente já são distribuídos, uma vez que a validade dos produtos é de aproximadamente três dias.

Em relação aos pontos observados e possíveis demandas, destaca-se a inexistência de um sistema para que os nutricionistas e demais funcionários possam planejar e organizar a distribuição dos alimentos de maneira mais eficiente. Sendo assim, os funcionários gastam grande parte do dia planejando as distribuições, tempo que poderia ser utilizado com outros trabalhos importantes desenvolvidos pela organização.

Segundo os dados disponíveis pelo Mapeamento de Segurança Alimentar e Nutricional (MapaSAN) realizado em 2018 em território nacional, a organização realiza a distribuição dos alimentos a equipamentos públicos de segurança alimentar e nutricional, associações beneficen-

tes, unidades de atendimento para pessoas com deficiência, entre outros equipamentos públicos e organizações da sociedade civil (Brasil, 2023). Sempre trabalhando com a transparência das informações relacionadas à quantidade de alimentos recebidos e distribuídos, o Banco de Alimentos de Botucatu – SP forneceu informações, e também disponibiliza por meio das redes sociais da organização para conhecimento da população em geral.

Em 2020, o Banco de Alimentos de Botucatu distribuiu em torno de 198 toneladas de alimentos, atendendo em média 350 famílias mensalmente. Os dados relacionados ao ano de 2021 e 2022 estão detalhados conforme o mês, e estão dispostos na Tabela 2, sendo obtidas informações referentes ao número de doadores mensais, número de instituições sociais atendidas ao mês e também o total de arrecadações (em toneladas).

Tabela 2 – Informações mensais sobre a distribuição de alimentos realizada pelo Banco de Alimentos de Botucatu em 2021 e 2022.

Ano	Mês	Doadores	Instituições atendidas	Arrecadações (toneladas)
2021	Janeiro	26	29	28,32
	Fevereiro	21	34	23,12
	Março	26	34	37,82
	Abril	25	34	30,49
	Maio	24	36	33,92
	Junho	29	40	29,46
	Julho	23	40	23,91
	Agosto	29	43	27,38
	Setembro	28	44	23,24
	Outubro	30	48	23,08
	Novembro	32	46	23,68
	Dezembro	34	48	19,75
2022	Janeiro	31	40	26,65
	Fevereiro	31	45	25,09
	Março	29	45	28,40
	Abril	28	46	25,10
	Maio	30	51	31,55
	Junho	30	48	31,67
	Julho	30	44	30,57
	Agosto	38	53	31,99
	Setembro	35	50	25,11
	Outubro	39	48	24,73
	Novembro	34	50	22,46
	Dezembro	38	46	11,30

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

Considerando os dados disponíveis, podemos verificar que no ano de 2021 o Banco de Alimentos teve em torno de 27 doadores mensais, atendendo em torno de 39 instituições

mensalmente e realizando a arrecadação de mais de 295 toneladas de alimentos no ano.

Os dados referentes ao ano de 2022 indicam que a arrecadação corresponde a mais de 314 toneladas de alimentos, proveniente de em média 32 doadores mensais, atendendo em média 47 instituições sociais mensalmente. A economia proporcionada às entidades atendidas pelo processo de distribuição de alimentos realizado pela organização está disposta na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações mensais sobre a economia gerada pela distribuição de alimentos realizada pelo Banco de Alimentos de Botucatu em 2022.

Mês	Pessoas	Famílias	Economia (em R\$)
Janeiro	-	-	173.241,12
Fevereiro	-	-	163.136,02
Março	-	-	184.661,75
Abril	3272	484	156.768,98
Mai	3482	479	189.741,58
Junho	3434	496	183.046,56
Julho	3489	538	180.135,95
Agosto	3780	534	211.891,41
Setembro	3697	560	180.771,61
Outubro	3423	527	149.885,19
Novembro	3780	-	174.194,97
Dezembro	3278	391	94.197,88

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

Os dados indicam que no ano de 2022 a economia proporcionada pelo Banco de Alimentos com o processo de distribuição foi de R\$2.041.673,02 ao longo dos doze meses, proveniente do fato da população não comprar os alimentos distribuídos.

A Tabela 4 apresenta os dados referentes aos anos de 2023 e 2024, que indicam uma redução na doação de alimentos, visto que a arrecadação total no ano de 2023 foi menor que os anos anteriores, seguido de um aumento nas doações no ano de 2024. Os valores evidenciam o impacto positivo do processo realizado pelo Banco de Alimentos na alimentação de milhares de pessoas em situação de insegurança alimentar e nutricional.

Tabela 4 – Informações mensais sobre a distribuição de alimentos realizada pelo Banco de Alimentos de Botucatu em 2023 e 2024.

Ano	Mês	Doadores	Instituições atendidas	Arrecadações (toneladas)
2023	Janeiro	37	39	17,94
	Fevereiro	39	42	18,83
	Março	38	43	24,94
	Abril	35	43	21,19
	Maio	43	43	26,11
	Junho	47	44	29,30
	Julho	50	40	24,96
	Agosto	47	48	30,40
	Setembro	48	50	28,19
	Outubro	48	50	27,42
	Novembro	37	46	24,29
	Dezembro	44	45	15,37
2024	Janeiro	38	39	21,50
	Fevereiro	38	43	23,75
	Março	38	45	27,97
	Abril	43	47	31,82
	Maio	41	50	25,71
	Junho	40	49	25,12
	Julho	52	59	27,41
	Agosto	49	58	29,47
	Setembro	53	60	33,74
	Outubro	43	54	31,91
	Novembro	46	60	44,26
	Dezembro	40	54	14,66

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

Com base nas informações analisadas relacionadas ao processo de distribuição de alimentos doados pelo Banco de Alimentos de Botucatu – SP, podemos verificar que seu funcionamento afeta positivamente as três esferas: ambiental, social e econômica. A esfera social é afetada de maneira positiva, uma vez que a organização proporciona o acesso aos alimentos às pessoas que se encontram em situação de vulnerabilidade social e insegurança alimentar. Já na esfera ambiental, podemos salientar que ao realizar o processo de distribuição destes alimentos, ocorre a diminuição do desperdício, e na esfera econômica, fica evidente a economia financeira proporcionada pelo processo às instituições sociais atendidas.

Com a finalidade de compreender a realidade brasileira dos Bancos de Alimentos, foram realizadas visitas ao Banco de Alimentos de Botucatu – SP. Com isso, em conversa com a nutricionista do Banco, responsável pela organização e planejamento da distribuição de alimentos, foram obtidas informações importantes incorporadas nos modelos matemáticos propostos.

4.4.1 Descrição dos Dados Reais

Durante as visitas ao Banco de Alimentos de Botucatu – SP, foram obtidos dados relacionados à distribuição de alimentos de quatro dias de uma semana. Os alimentos distribuídos pelo Banco foram divididos em oito classificações e os dados foram analisados de maneira descritiva. As classificações foram consideradas da seguinte forma:

- **Legumes/Verduras:** abóbora, abobrinha, alface, alho-poró, almeirão, batata, batata-doce, berinjela, beterraba, brócolis, cará, cenoura, chicória, chuchu, couve, couve-flor, inhame, jiló, mandioca, mandioquinha, milho, pepino, pimentão, quiabo, rabanete, repolho, rúcula, tomate e vagem.
- **Frutas:** ameixa, banana, caqui, coco, cupuaçu, goiaba, kiwi, laranja, lima-da-pérsia, limão, maçã, mamão, manga, maracujá, melão, mexerica, pêra, pêssego, pitaya e uva.
- **Tempero:** alecrim, alho, caldo de legumes, cebola, cheiro verde, coentro, gengibre, hortelã, manjerição, pimenta, pimentão em molho, tomate em molho.
- **Polpa:** polpa de abacaxi, polpa de carambola, polpa de goiaba, polpa de mamão, polpa de manga, polpa de maracujá, polpa de melão e polpa de pitaya.
- **Doces:** ameixa em calda, compota de maçã, doce de banana, pêra em calda e pêssego em calda.
- **Leite pasteurizado.**
- **Ovos.**
- **Itens Cesta Básica:** arroz, feijão, fubá, molho de tomate e óleo.

A Tabela 5 apresenta informações gerais relacionadas aos tipos de alimentos distribuídos nos quatro dias analisados e suas respectivas quantidades (em kg).

Tabela 5 – Quantidades e classificações de alimentos (em kg) distribuídos.

Tipo de Alimento	Quantidade distribuída (em kg)				Total
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	
Legumes/Verduras	195,40	187,20	100,05	152,00	635,10
Frutas	260,80	84,00	158,40	150,05	653,25
Tempero	33,35	89,85	80,00	29,2	232,40
Polpa	20,95	8,25	7,70	4,95	41,85
Doce	28,70	32,05	20,85	10,65	92,25
Leite	117,00	104,00	53,00	29,00	303,00
Ovos	0	0	0	8,15	8,15
Itens Cesta Básica	0	0	0	18,60	18,60
Total	656,20	505,35	420,00	402,60	1984,15

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

Podemos observar que, de maneira geral, a maioria dos alimentos disponíveis para distribuição são referentes a alimentos de hortifrúti, sendo as frutas encontradas em maior quantidade (653,25 kg), seguida por legumes/verduras (635,10 kg), leite (303 kg) e tempero (232,40 kg). Os alimentos que configuram itens da cesta básica só foram encontrados em um dos dias analisados, Dia 4, assim como a distribuição de ovos. Em relação a polpas e doces, estes representam alimentos já processados pelo Banco de Alimentos a fim de diminuir o desperdício. A Figura 4 apresenta as porcentagens de alimentos distribuídos de acordo com cada dia analisado, evidenciando a predominância de frutas e legumes/verduras na distribuição.

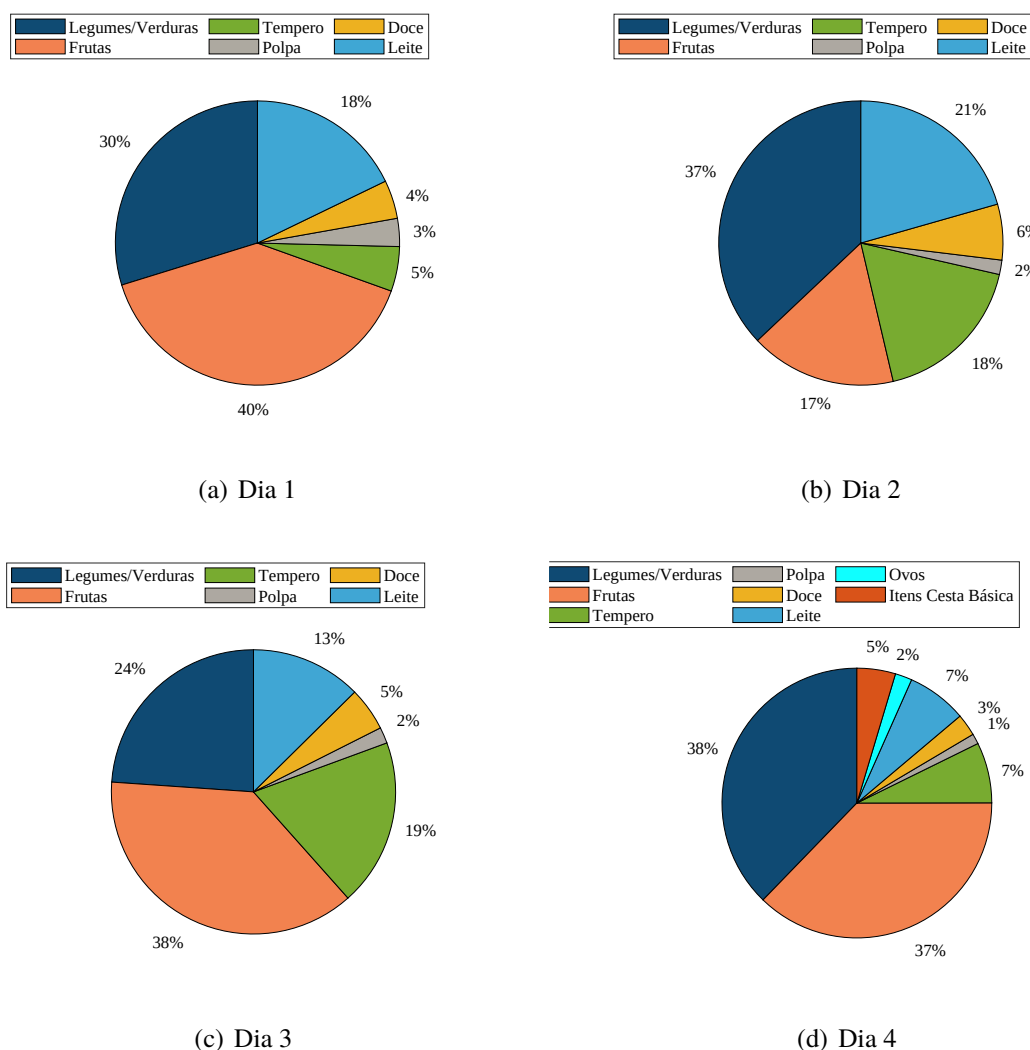


Figura 4 – Porcentagens de alimentos distribuídos pelo Banco de Alimentos de Botucatu.

Outro fato que podemos observar na Figura 4 é relacionado à porcentagem de alimentos processados distribuídos, ao menos 7%, 8%, 7% e 4% dos alimentos distribuídos nos dias 1, 2, 3 e 4, respectivamente, puderam ser utilizados graças ao processamento conduzido pela organização.

Além dos dados apresentados, também foram obtidas informações detalhadas referentes à distribuição de alimentos realizada nestes quatro dias estudados. Sendo assim, foi possível observar a quantidade de cada tipo de alimento enviado para cada instituição atendida. Ao todo, foram atendidas 41 instituições nos quatro dias avaliados, dessa forma, as instituições foram numeradas de 1 a 41. A Tabela 6 apresenta a distribuição realizada no Dia 1. Foram atendidas 14 instituições, das quais as Instituições 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12 e 14 atendem, respectivamente, 19, 8, 12, 9, 11, 6, 2, 3 e 3 famílias.

Tabela 6 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 1.

Inst.	Demanda	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Total	Kits
1	95,00	45,25	38,00	0	0	5,00	0	88,25	4,38
2	40,00	15,65	16,00	7,45	0	4,00	0	43,10	5,39
3	60,00	20,45	23,40	0	4,40	2,55	10,00	60,80	5,07
4	45,00	13,80	17,10	5,50	0	0	18,00	54,40	6,04
5	65,00	25,10	22,30	0	0	5,50	22,00	74,90	6,81
6	50,00	14,20	12,00	6,00	0	3,00	12,00	47,20	7,37
7	50,00	23,10	31,50	0,55	0	3,55	0	58,70	-
8	20,00	0	12,70	0	5,40	5,10	9,00	32,30	-
9	70,00	9,95	23,35	5,60	4,10	0	10,00	53,00	-
10	10,00	4,35	4,00	0	0	0	4,00	12,35	6,18
11	70,00	4,90	20,00	3,25	1,85	0	10	40,00	-
12	25,00	7,30	6,00	0	0	0	6,00	19,30	6,43
13	70,00	2,45	28,45	5,00	5,20	0	10,00	51,10	-
14	20,00	8,90	6,00	0	0	0	6,00	20,90	6,97

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

Podemos observar que nem todas as instituições receberam todos os tipos de alimentos, e isto pode ser explicado pelo fato de que cada instituição apresenta um público-alvo distinto, e determinados tipos de alimentos não são recomendados para determinados grupos de pessoas. Podemos exemplificar este fato ao considerar o público-alvo que apresenta determinada patologia, que os impossibilita a ingestão de determinados tipos de alimentos. Sendo assim, a organização leva em consideração estas informações para a escolha dos alimentos distribuídos.

Os dados relacionados à distribuição dos alimentos no Dia 2 estão dispostos na Tabela 7. No segundo dia estudado, foram atendidas mais 10 instituições, das quais as Instituições 15, 16, 17, 18, 20 e 24 atendem, respectivamente, 14, 21, 12, 8, 6 e 1 famílias.

Tabela 7 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 2.

Inst.	Demanda	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Total	Kits
15	70,00	35,50	6,50	9,55	0	8,35	28,00	87,90	6,28
16	105,00	42,00	21,00	25,90	0	5,30	0	94,20	4,49
17	60,00	25,95	11,70	3,40	0	6,00	24,00	71,05	5,92
18	40,00	19,80	0	9,80	0	4,25	0	33,85	4,23
19	55,00	22,90	6,30	14,35	2,80	0	0	46,35	-
20	50,00	16,60	4,15	2,55	0	3,25	12,00	38,55	6,42
21	50,00	14,60	18,45	10,05	1,65	4,90	9,00	58,65	-
22	50,00	9,85	5,10	14,25	0	0	15,00	39,10	-
23	30,00	0	10,80	0	3,80	0	16,00	30,60	-
24	5,00	0	5,10	0	0	0	0	5,10	5,10

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

Outro fato observável, assim como nos dados disponíveis relacionados ao Dia 1, é a maior distribuição de legumes e frutas, o que está relacionada com a quantidade de alimentos disponíveis para o processo. Sendo assim, as instituições em sua maioria recebem estes tipos de alimentos em maior proporção se observados em relação à respectiva demanda total de alimentos apresentada por cada instituição.

A Tabela 8 apresenta os dados referentes à distribuição de alimentos realizada no Dia 3. Foram atendidas 11 instituições, das quais as Instituições 25, 26, 27, 28, 29, 31 e 33 atendem, respectivamente, 11, 11, 4, 12, 8, 2 e 2 famílias.

Tabela 8 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 3.

Inst.	Demanda	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Total	Kits
25	55,00	6,60	22,00	13,60	0	2,70	0	44,90	4,08
26	55,00	15,30	22,00	8,60	0	0	0	45,90	4,17
27	20,00	7,85	8,00	0,55	0	0,95	0	17,35	4,34
28	65,00	7,75	24,00	24,00	0	0	24,00	82,15	6,85
29	40,00	15,65	16,00	3,60	0	0	0	35,25	4,24
30	50,00	16,25	13,80	4,25	0	4,35	10,00	48,65	-
31	10,00	3,30	4,00	0,60	0	0	2,00	9,90	4,95
32	50,00	9,40	10,50	16,50	0	5,75	0	41,95	-
33	10,00	4,05	4,00	1,75	0	0	0	9,80	4,90
34	50,00	14,10	8,50	4,15	3,4	2,80	17,00	49,95	-
35	50,00	0	25,60	0	4,30	4,30	0	34,20	-

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

Podemos verificar diferentes preferências com relação aos alimentos recebidos, uma vez que polpas de frutas foram enviadas apenas para duas instituições. Porém, as mesmas observações realizadas nos dados referentes aos Dias 1 e 2 são aplicáveis no Dia 3.

Por fim, a Tabela 9 apresenta os dados referentes à distribuição de alimentos do Dia 4.

Tabela 9 – Dados reais referentes à distribuição de alimentos (em kg) no Dia 4.

Inst.	Demanda	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Ovos	Cesta	Total
36	80,00	13,90	39,70	8,00	0	3,25	0	0	0	64,85
37	105,00	33,80	14,50	2,90	4,95	0,95	10,00	4,35	0	72,05
38	150,00	36,00	31,15	5,45	0	0	0	3,80	0	76,40
39	50,00	14,50	21,75	7,95	0	3,30	0	0	0	47,60
40	80,00	18,40	36,10	4,30	0	3,15	0	0	18,60	80,55
41	50,00	35,40	6,75	0	0	0	19,00	0	0	61,15

Fonte: Banco de Alimentos de Botucatu – SP.

As instituições atendidas no Dia 4 não atendem diretamente famílias, indicando que correspondem as instituições que preparam as refeições para oferecimento ao seu público-alvo.

Além disso, enquanto nos Dias 1, 2 e 3 foram encontrados seis diferentes tipos de alimentos para distribuição, no Dia 4 foram encontradas oito classificações distintas de alimentos, que agora incluem ovos e itens de cesta básica.

5 Resultados e Discussões

Os modelos de otimização M1 e M2 foram implementados e resolvidos utilizando o *software* Matlab versão R2023a com licença acadêmica fornecida pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” de número 41081750, sendo sua resolução por meio do método simplex, escolhido de maneira automática pela ferramenta de otimização utilizada. Primeiramente, visando analisar o comportamento dos modelos propostos, assim como verificar a eficiência das técnicas utilizadas para a modelagem do problema, foram construídos cenários e instâncias para o modelo M1, que são apresentados e discutidos neste capítulo. São apresentados também os resultados obtidos considerando os dados reais disponibilizados em parceria com o Banco de Alimentos de Botucatu – SP, assim como as discussões e análises, incluindo a análise de sensibilidade dos pesos associados à técnica de Programação por Metas utilizando o modelo M2.

As Seções 5.1 e 5.2 apresentam os resultados publicados em Godoi *et al.* (2025a), já a Seção 5.3 apresenta parte dos resultados publicados em (Godoi *et al.*, 2025b).

5.1 Simulações Computacionais Utilizando Cenários Fictícios

Primeiramente, o modelo M1 foi implementado e o cenário considerado está disposto na Figura 5. Foram considerados dois BAs que atendem 21 instituições, sendo as instituições numeradas de 1 a 10 atendidas pelo BA 1, e as Instituições 11 a 21 atendidas pelo BA 2. O caso em que não há priorização no atendimento de instituições foi inicialmente estudado, assim, os valores para os parâmetros μ_i , com $i \in I$, foram iguais, ou seja, $\mu_i = \frac{1}{21}$.

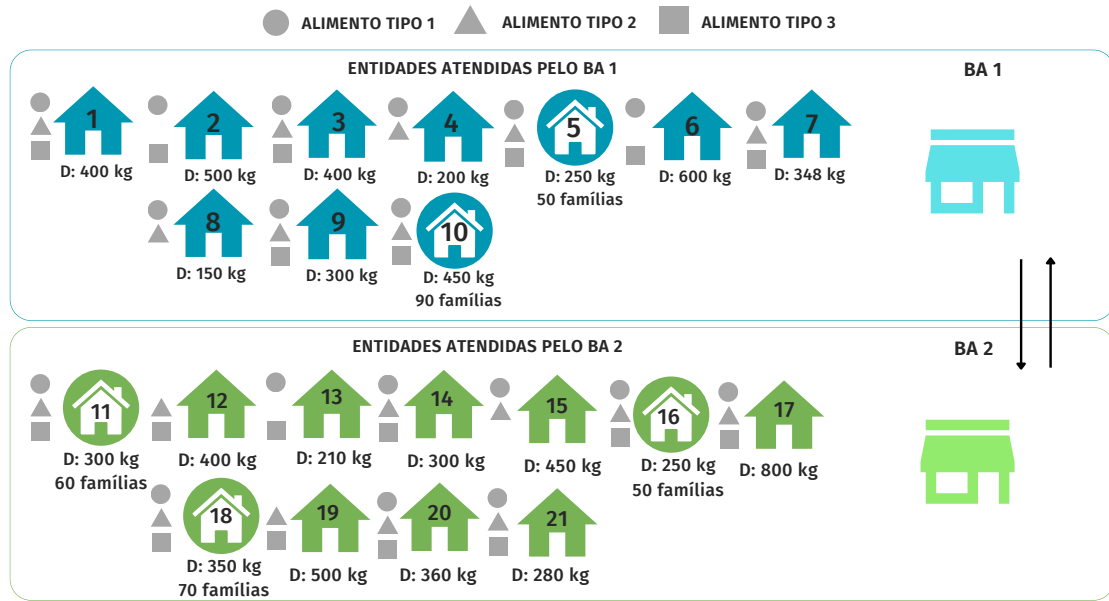


Figura 5 – Cenário construído para o modelo M1.

Três tipos de alimentos foram considerados no cenário, e cada instituição apresenta sua respectiva preferência com relação ao recebimento de cada tipo de alimento, indicado na Figura 5 com diferentes símbolos que acompanham cada instituição. Por exemplo, podemos verificar que a Instituição 1 recebe os três tipos de alimentos, enquanto a Instituição 2 tem preferência pelo recebimento de apenas dois dos tipos disponíveis.

Sendo assim, os parâmetros g_{ai} , com $a \in A$ e $i \in I$, que representam as proporções de cada tipo de alimento, foram calculados de forma que as instituições que apresentam preferência pelo recebimento dos três tipos de alimentos receberam a proporção $\frac{1}{3}$ para cada tipo, e aquelas que tem preferência por apenas dois dos tipos disponíveis, $\frac{1}{2}$ para cada tipo de sua preferência e 0 para o restante.

Foram criadas instâncias para a verificação do comportamento do modelo M1 proposto, e possíveis análises relacionadas à modelagem e resultados obtidos. As instâncias foram criadas da seguinte forma:

- Instância $M1C1$: 10% de alimento faltante para suprir as demandas em cada BA.
- Instância $M1C2$: alimento necessário e ideal para atender todas as demandas.
- Instância $M1C3$: alimento suficiente porém com diferente distribuição entre BAs.

Os respectivos valores para cada tipo de alimento em cada instância estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Instâncias construídas para análise do modelo M1 (em kg).

Instância	BA 1			BA 2		
	Alim. 1	Alim. 2	Alim. 3	Alim. 1	Alim. 2	Alim. 3
<i>M1C1</i>	1297	802	1140	1089	1400	1292
<i>M1C2</i>	1441	891	1266	1210	1555	1435
<i>M1C3</i>	1531	800	1266	1120	1646	1435

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos com relação aos valores da função objetivo e da variável λ na instância *M1C1*, considerando diferentes valores para α , com variação de 0,01 para $\alpha \in [0, 1]$, ou seja, diferentes técnicas e ponderações utilizadas na função objetivo do modelo M1. Podemos verificar que o valor da função objetivo é inversamente proporcional ao valor de α .

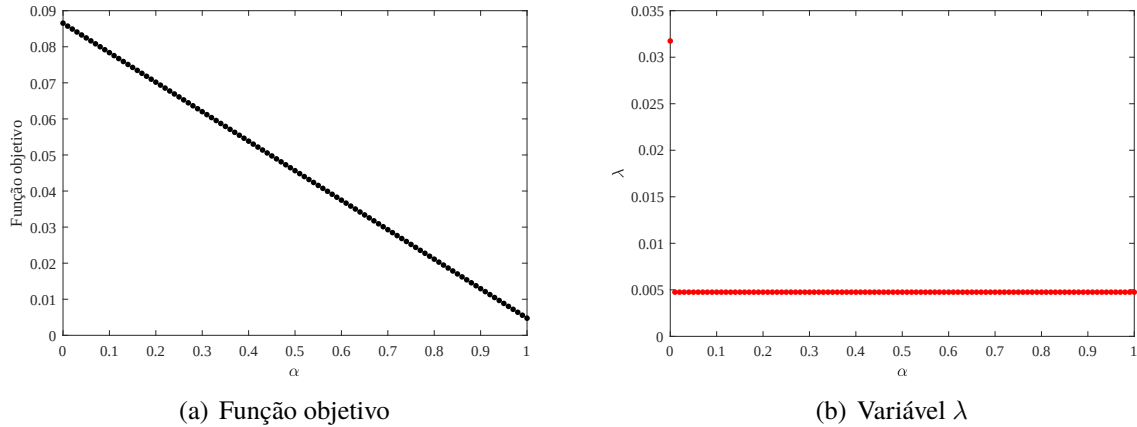


Figura 6 – Valores (a) da função objetivo e (b) da variável λ para diferentes valores de α , na instância *M1C1*.

Considerando ainda a instância *M1C1*, isto é, o cenário em que não há alimentos suficientes disponíveis para suprir todas as demandas da população, a Figura 7 apresenta a quantidade de alimentos enviada para cada instituição atendida, assim como seus respectivos desvios faltantes considerando $\alpha = 0$.

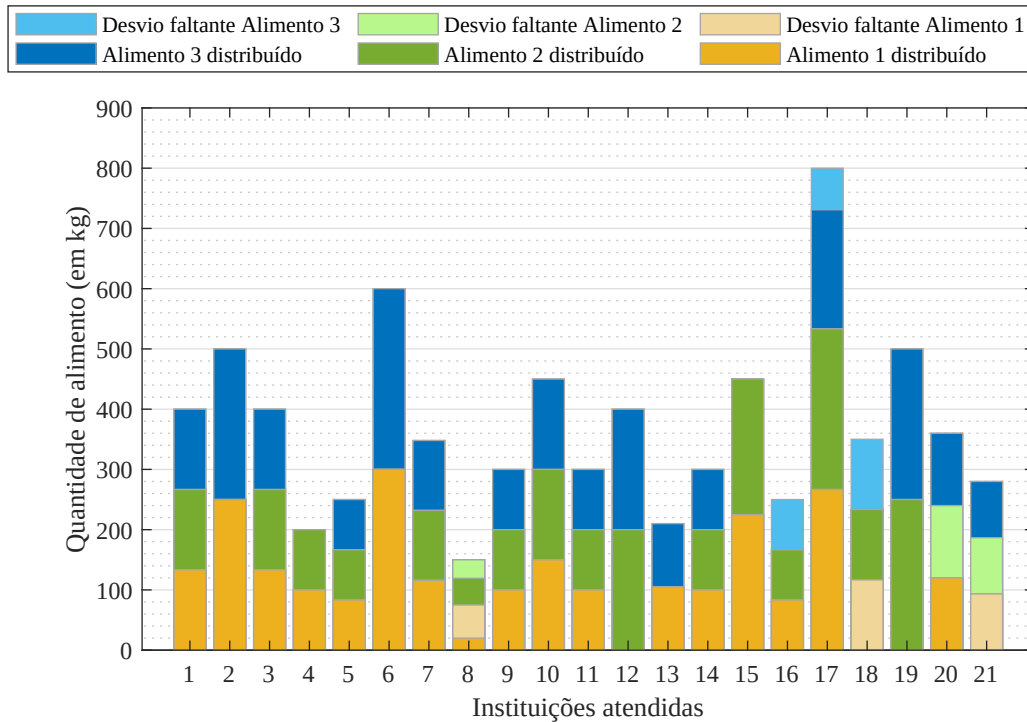


Figura 7 – Distribuição de alimentos considerando a instância $M1C1$ e $\alpha = 0$.

Podemos verificar que a maioria das instituições foi atendida de maneira completa, no entanto, as instituições 8, 16, 17, 18, 20 e 21 apresentaram significativo desvio faltante de alimentos, indicando que a distribuição não foi realizada com equidade. Este fato pode ser evidenciado ao avaliarmos as instituições 18 e 21, as quais estavam aptas para receber os três tipos de alimentos considerados, mas receberam apenas um, apresentando um desvio total faltante que corresponde a mais da metade de sua respectiva demanda.

Os alimentos foram enviados entre os BAs da seguinte forma: o BA 1 enviou 126 kg de alimento do tipo 3 para o BA 2 e, por sua vez, o BA 2 enviou em torno de 58,3 kg de alimento do tipo 2 e 89 kg de alimento do tipo 1 para o BA 1. As instituições 5, 10, 11, 16 e 18 recebem os alimentos organizados em forma de *kits*. As instituições 5, 10 e 11 receberam em torno de 5 kg cada, ao passo que, as instituições 16 e 18 receberam, respectivamente, 3,33 e 1,67 kg cada. Esses resultados evidenciam a falta de equidade no processo de distribuição de alimentos.

Considerando ainda a instância $M1C1$, porém, utilizando $\alpha = 1$, os resultados encontrados com relação à quantidade de alimentos distribuídos estão dispostos na Figura 8. Neste caso, estamos considerando apenas a técnica de Programação por Metas Chebyshev na função objetivo do modelo M1.

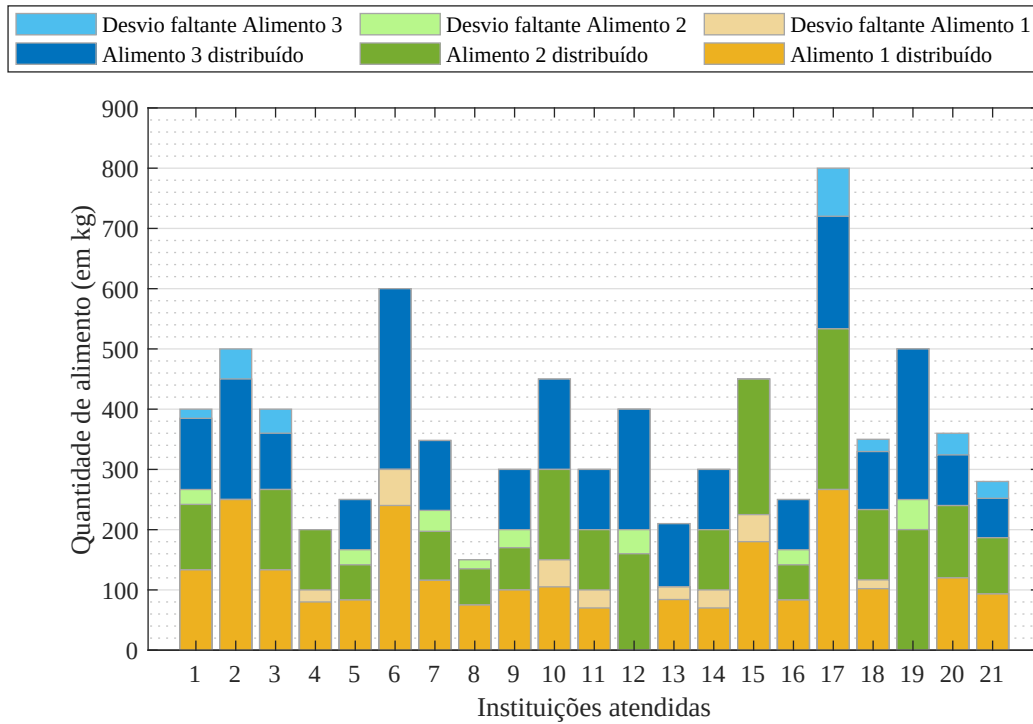


Figura 8 – Distribuição de alimentos considerando a instância $M1C1$ e $\alpha = 1$.

A distribuição de alimentos encontrada se mostrou eficiente, indicando que o atendimento de todas as instituições ocorreu de maneira equitativa, uma vez que os desvios faltantes estão distribuídos proporcionalmente entre todas as instituições. As trocas de alimentos entre BAs se deram da seguinte forma: o BA 1 enviou em torno de 40,26 kg do alimento do tipo 2 para o BA 2 e, por sua vez, o BA 2 enviou em torno de 19,29 kg do alimento do tipo 1 e 21,01 kg do alimento do tipo 3 para o BA 1. Com relação ao valor encontrado para λ , este foi de 0,0048 e os *kits* para distribuição às famílias atendidas pelas instituições 5, 10, 11, 16 e 18, em torno de 4,5 kg cada.

Considerando as instâncias $M1C2$ e $M1C3$, onde há alimento suficiente para suprir todas as demandas, porém, com diferente disponibilidade entre os BAs, o valor atribuído para $\alpha \in [0, 1]$ não apresentou diferença nos resultados obtidos referentes à quantidade de alimento enviado para cada instituição. O valor da função objetivo, assim como da variável λ , foi igual a zero, e a quantidade de alimento distribuído para cada instituição está disposta na Figura 9.

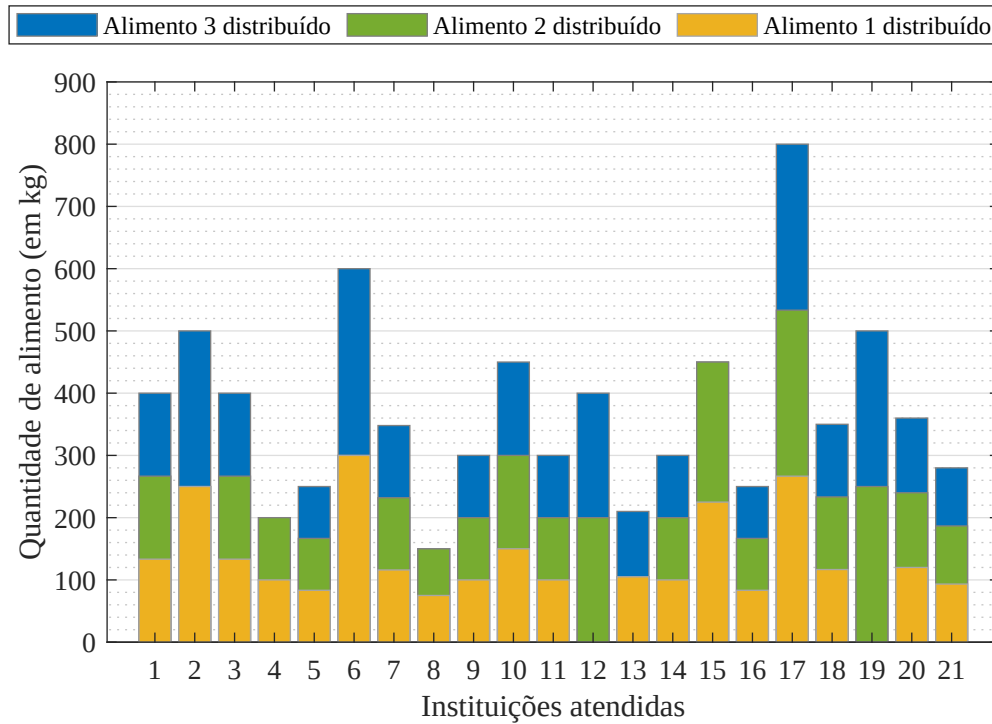


Figura 9 – Distribuição de alimentos considerando as instâncias $M1C2$ e $M1C3$, e $\alpha \in [0, 1]$.

Com base nos resultados obtidos podemos verificar a eficiência do modelo na distribuição de alimentos em condições ideais, uma vez que todas as demandas foram atendidas por completo e nenhum desvio, faltante ou excedente, foi observado. Os *kits* distribuídos às instituições que atendem diretamente as famílias ficaram com 5 kg cada, independentemente da instituição. Considerando a instância $M1C2$, não houve troca de alimentos entre BAs, entretanto, na instância $M1C3$ o BA 1 enviou 90 kg do alimento do tipo 1 para o BA 2, e o BA 2 enviou 91 kg do alimento do tipo 2 para o BA 1, não havendo trocas relacionadas aos alimentos do tipo 3, uma vez que apresentavam a quantidade ideal para distribuição no respectivo BA.

A utilização da técnica de Programação por Metas Chebyshev, ou seja, $\alpha = 1$, apresentou resultados satisfatórios para a resolução eficiente do problema, uma vez que a distribuição de alimentos foi equitativa. Visando a aplicação dos modelos na realidade brasileira de Bancos de Alimentos para otimizar o processo de distribuição, foi estudado o Banco de Alimentos do município de Botucatu – SP, e as informações e análises serão apresentadas a seguir.

5.2 Simulações Computacionais Utilizando Dados Reais

Com a finalidade de avaliar a eficiência dos modelos M1 e M2 em cenários reais, foram implementados os dados disponibilizados pelo Banco de Alimentos de Botucatu – SP referentes à distribuição de alimentos, dispostos no Capítulo 4. Para a implementação do modelo, foi utilizado $\alpha = 1$, uma vez que apresentou melhor desempenho nas instâncias anteriormente dis-

cutidas, e não foi considerada priorização no atendimento de instituições. Foram necessárias adaptações no modelo para a implementação do cenário real, assim, foi desconsiderada a troca de alimentos entre BAs, uma vez que o BA apresenta apenas uma filial, além de adaptações relacionadas ao tipo de alimento aceito em cada instituição com base na distribuição realizada pelo BA e a quantidade de alimentos disponível.

Para a determinação dos parâmetros g_{ai} , com $a \in A$ e $i \in I$, que correspondem à proporção de cada tipo de alimento para o suprimento da demanda de cada instituição, foi calculada inicialmente a proporção de cada tipo de alimento disponível com relação ao total. Com estas proporções, foram verificados os tipos de alimentos enviados para cada instituição segundo os dados reais obtidos. Dessa forma, as proporções foram determinadas para cada instituição com adaptações para que a proporção tenha soma igual a 1, e a demanda seja totalmente satisfeita de acordo com a preferência de cada instituição.

5.2.1 Distribuição de alimentos utilizando o modelo M1

Iniciando as análises pelo modelo M1, a Tabela 11 apresenta os resultados obtidos utilizando os dados referentes ao Dia 1.

Tabela 11 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 1 (em kg).

Instituição	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Total	Kits
1	28,09	47,98	0	0	9,50	0	85,57	4,50
2	10,45	19,24	3,26	0	3,08	0	36,03	4,50
3	18,48	18,49	0	2,51	3,22	11,34	54,04	4,50
4	11,91	15,84	4,05	0,18	0	15,27	47,25	5,25
5	20,96	21,52	0	0	5,62	10,45	58,55	5,32
6	9,99	20,25	2,95	0	2,25	9,60	45,04	7,51
7	18,02	19,09	11,54	0	3,86	0	52,50	-
8	0	11,17	0	0,86	1,18	4,81	18,02	-
9	21,54	21,61	3,85	12,50	0	13,59	73,10	-
10	3,15	3,26	0	0	0	2,60	9,01	4,50
11	21,55	21,61	3,85	2,45	0	24,04	73,50	-
12	5,39	10,63	0	0	0	6,50	22,52	7,51
13	21,55	21,61	3,85	2,45	0	13,59	63,05	-
14	4,32	8,50	0	0	0	5,20	18,02	6,05

Visando a melhor visualização e comparação dos valores obtidos com os dados reais, a Figura 10 apresenta os dados reais e também o resultado da distribuição por meio do modelo M1, em que as diferentes cores indicam os diferentes tipos de alimento. A primeira barra associada a cada instituição representa a distribuição conforme os dados reais, a segunda barra representa o resultado encontrado pelo modelo, e a terceira barra representa a demanda.

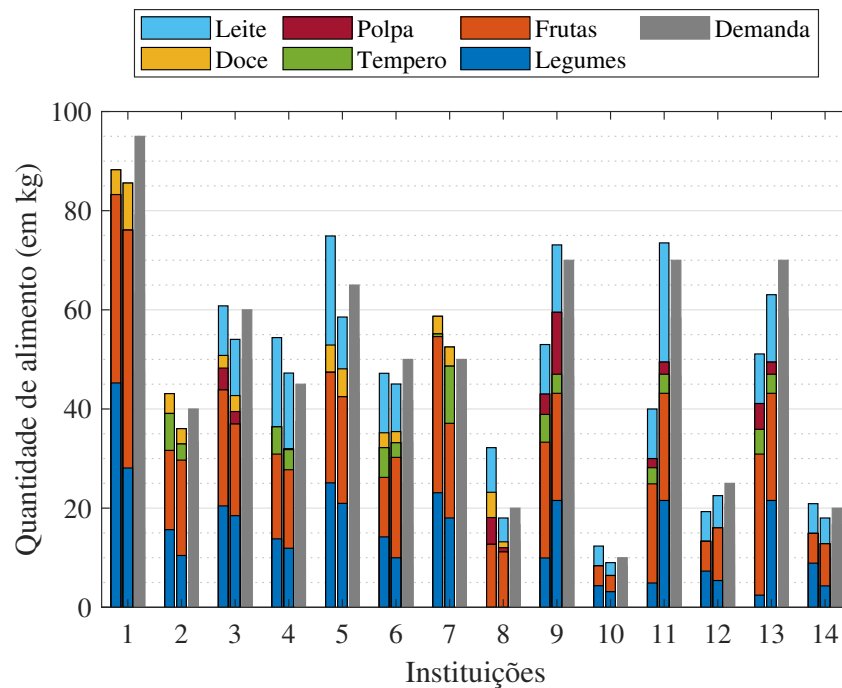


Figura 10 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 1, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.

Podemos observar que há discrepância na quantidade de alimentos enviados para instituições se compararmos os dados reais com os resultados do modelo M1. Podemos verificar que os resultados do modelo indicam um comportamento mais balanceado do que os dados reais, com menores desvios da respectiva demanda de cada instituição atendida, fato que pode ser evidenciado principalmente no atendimento das Instituições 9, 11 e 13.

O cenário referente ao Dia 2 foi implementado e a Tabela 12 apresenta os resultados encontrados utilizando o modelo M1.

Tabela 12 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 2 (em kg).

Instituição	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Total	Kits
15	25,97	11,69	7,54	0	4,55	21,83	71,58	5,11
16	45,15	13,68	26,25	0	12,33	12,84	110,25	5,25
17	17,92	10,02	10,80	0	3,90	13,02	55,66	4,64
18	25,28	0	6,98	0	4,85	0	37,11	4,64
19	21,88	11,55	12,65	4,95	0	6,73	57,75	-
20	16,59	6,69	9,00	1,38	3,25	10,85	47,76	7,96
21	18,52	6,96	6,63	0,82	3,17	10,29	46,38	-
22	15,89	9,00	10,00	0	0	11,50	46,39	-
23	0	9,77	0	1,11	0	16,95	27,83	-
24	0	4,64	0	0	0	0,59	4,64	4,64

A Figura 11 apresenta a quantidade de alimento distribuído tanto nos dados reais quanto pelo resultado do modelo M1 para as instituições atendidas no Dia 2, assim como suas respectivas demandas.

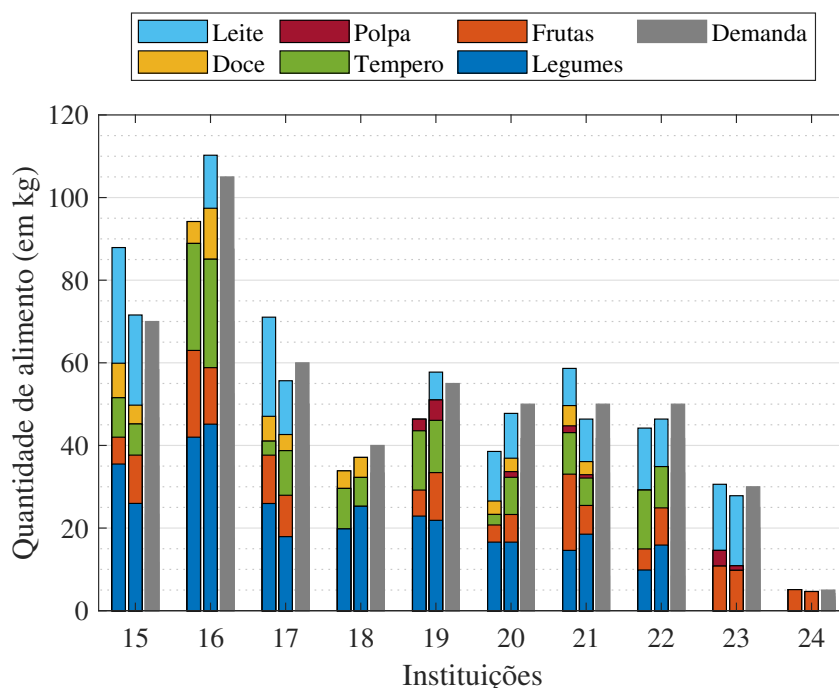


Figura 11 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 2, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.

Podemos verificar que no atendimento da Instituição 15, os dados reais evidenciaram maior envio de alimentos se comparado aos resultados do modelo, porém, segundo a distribuição proposta pelo modelo, a demanda desta instituição é totalmente atingida. Outras instituições que apresentaram menor envio de alimento se comparadas aos dados reais foram as Instituições 17, 21 e 23, porém, a distribuição de alimentos para as demais se dá de maneira balanceada.

A Tabela 13 apresenta a distribuição de alimentos relacionada ao Dia 3, e podemos observar que, assim como nos casos anteriores, a distribuição obtida pelo modelo M1 considera equidade, se verificar o desvio, faltante ou excedente, entre o alimento distribuído com a respectiva demanda de cada instituição.

Tabela 13 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 3 (em kg).

Instituição	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Total	Kits
25	14,99	13,76	12,10	0	6,03	10,86	57,75	5,25
26	15,95	25,30	5,64	0	0	0	46,89	4,26
27	5,45	5,00	4,40	0	2,19	0	17,05	4,26
28	16,54	16,59	13,23	0	0	10,56	56,93	4,74
29	5,70	18,40	10,00	0	0	0	34,10	4,26
30	10,43	13,42	9,78	0	2,60	16,28	52,50	-
31	2,55	2,55	2,04	0	0	1,39	8,52	4,26
32	13,63	12,71	10,80	2,29	5,48	7,59	52,50	-
33	2,90	3,12	2,50	0	0	0	8,52	4,26
34	11,91	11,48	9,53	0,92	2,48	6,31	42,62	-
35	0	36,07	0	4,50	2,05	0	42,62	-

Como indicado na Tabela 13, podemos observar que mesmo com as discrepâncias observadas entre os valores totais distribuídos para cada instituição com relação aos dados reais e resultados do modelo M1, se avaliarmos individualmente cada tipo de alimento, o resultado foi satisfatório por existir proximidade entre a tomada de decisão do gestor com relação aos dados reais e o resultado do modelo de otimização proposto.

A Figura 12 apresenta a quantidade de alimento distribuído tanto nos dados reais quanto pelo resultado do modelo M1 para as instituições atendidas no Dia 3.

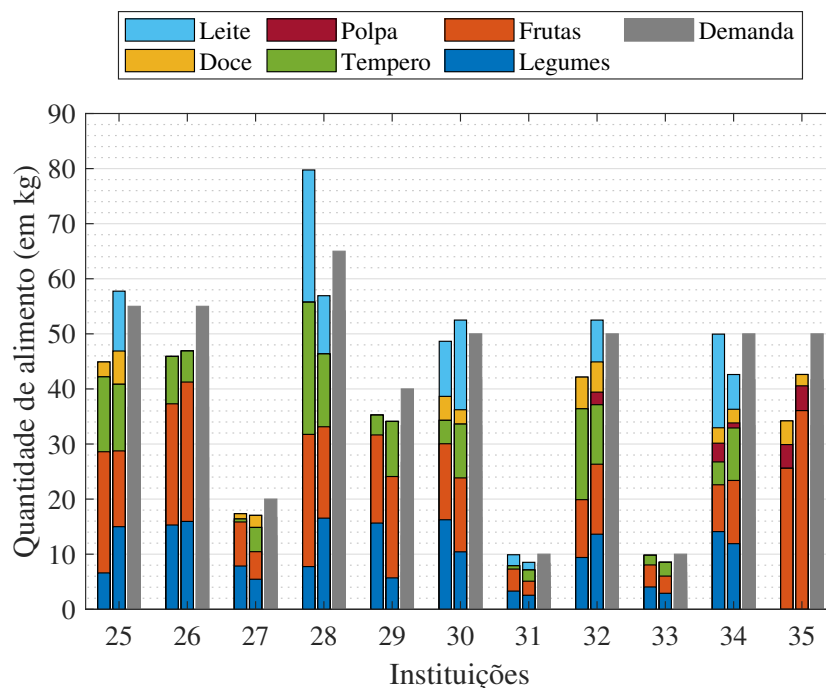


Figura 12 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 3, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.

Assim como nos casos anteriores, os resultados do modelo M1 apresentaram comportamento balanceado no atendimento de todas as demandas das instituições.

Com relação ao Dia 4, a Tabela 14 apresenta os dados e resultados obtidos, evidenciando maior equidade em relação aos dados reais. Todas as instituições atendidas neste período recebem quantidades de alimentos (em kg) para a produção de refeições que serão oferecidas para a população em situação de insegurança alimentar.

Tabela 14 – Resultados do modelo M1 utilizando os dados reais referentes ao Dia 4 (em kg).

Instituição	Legumes	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Ovos	Cesta	Total
36	34,75	11,74	8,53	0	2,40	0	0	0	57,42
37	11,84	39,90	7,79	1,47	4,07	7,98	2,31	0	75,36
38	41,95	58,73	1,14	3,48	0,3	15,52	5,84	13,65	140,64
39	21,72	7,34	5,33	0	1,50	0	0	0	35,89
40	33,36	10,35	6,41	0	2,34	0	0	4,95	57,42
41	8,39	22,00	0	0	0	5,50	0	0	35,89

A Figura 13 apresenta a quantidade de alimento distribuído tanto nos dados reais quanto pelo resultado do modelo M1 para as instituições atendidas no Dia 4 para melhor visualização.

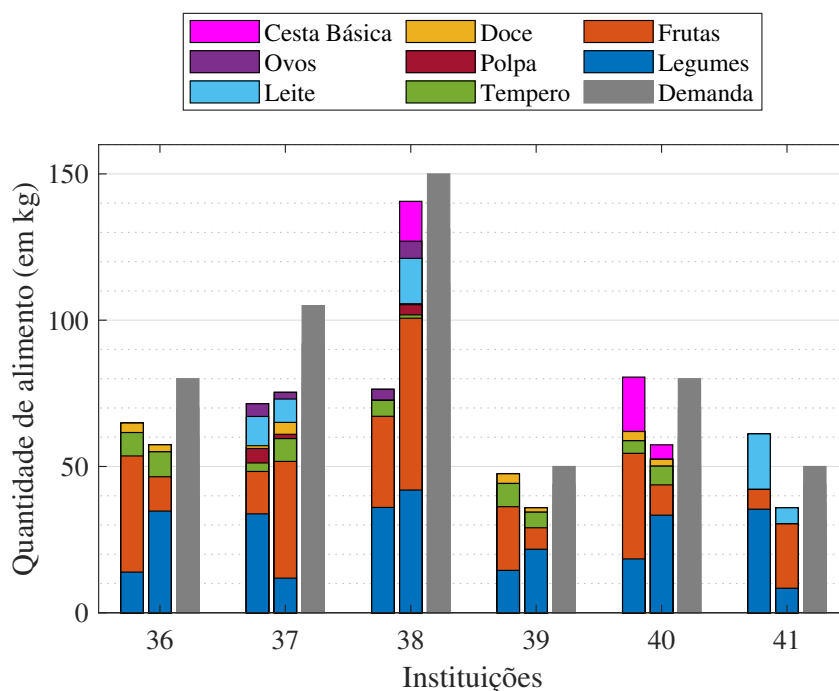


Figura 13 – Comparação da distribuição de alimentos para o Dia 4, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M1 e demanda.

O comportamento dos resultados do modelo para o Dia 4 foi semelhante aos demais dias de distribuição considerados, indicando um balanceamento para o atendimento das demandas

das instituições. Podemos verificar uma diferença significativa no atendimento da Instituição 38 ao comparar os dados reais e os resultados do modelo, sendo o desvio da demanda significativamente menor no segundo caso.

De maneira geral podemos concluir que o modelo M1 avaliado para situações da realidade brasileira de Bancos de Alimentos, utilizando a técnica de Programação por Metas Chebyshev na função objetivo, se mostrou eficiente na resolução do problema cuja busca é por uma distribuição equitativa. Sendo assim, constitui em uma importante ferramenta capaz de realizar com agilidade o planejamento e organização do processo de distribuição de alimentos equitativo realizado diariamente.

5.2.2 Distribuição de alimentos utilizando o modelo M2

Em sequência, considerando os mesmos dados da realidade brasileira de Bancos de Alimentos, o modelo M2 foi implementado e o estoque inicial considerado foi igual a zero para todos os tipos de alimentos. A Figura 14 apresenta os resultados obtidos para os quatro dias de dados reais.

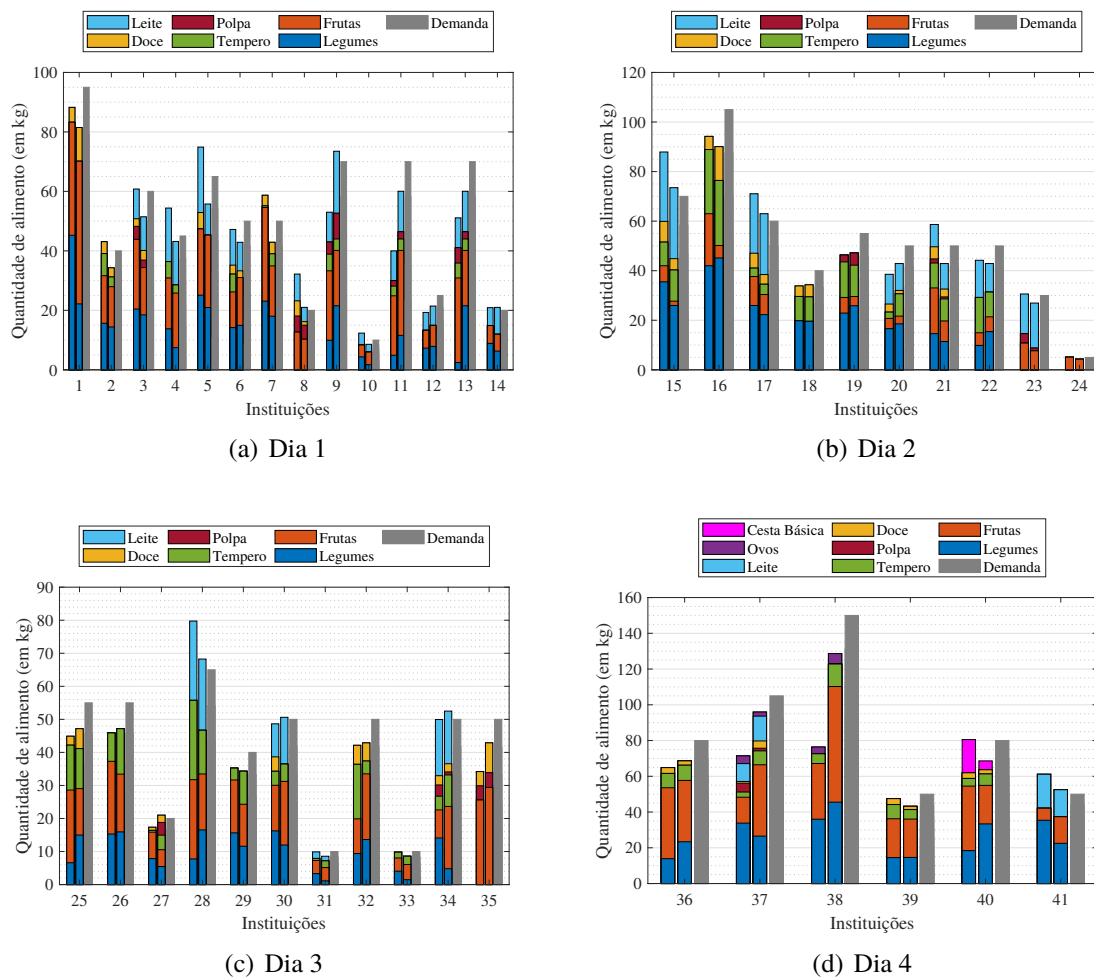


Figura 14 – Comparação da distribuição de alimentos, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M2 e demanda.

Podemos verificar que os resultados do modelo M2 diferem dos resultados do modelo M1, e este fato pode ser explicado uma vez que o modelo M2 considera o estoque. Sendo assim, alimentos de um dia de distribuição podem ser armazenados para serem utilizados em outros dias onde a falta de alimento para o atendimento das demandas é maior. A Tabela 15 apresenta os valores de estoque obtidos para os quatro dias considerados.

Tabela 15 – Resultados referentes a estoque de alimentos (em kg) obtidos pelo modelo M2.

Alimentos	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4
Legumes	8,37	11,39	13,90	0
Frutas	14,59	50,64	46,76	0
Tempero	11,72	8,14	11,46	0
Polpa	0,19	1,56	0	3,48
Doce	3,78	4,34	0	0
Leite	0	0	0	0
Ovos	0	0	0	0
Cesta Básica	0	0	0	13,65

5.2.3 Análise da Medida de Equidade

Em sequência aos estudos, a fim de analisar com mais detalhes a equidade considerada na distribuição de alimentos, foi estabelecido um critério para análise da aplicação deste conceito. Baseado no estudo e modelo proposto por [Orgut et al. \(2016\)](#), assumimos o estudo do desvio da equidade do modelo M1 da seguinte forma:

$$K_i = \left| \frac{\sum_{a \in A} x_{abi}}{\sum_{a \in A} \sum_{j \in I} x_{abj}} - \frac{D_i}{\sum_{j \in I} D_j} \right|, \quad b \in B, i \in I. \quad (5.1)$$

em que K_i representa o desvio de equidade apresentado na distribuição realizada à Instituição i . Para o modelo M2, foram feitas as adaptações necessárias de modo a considerar os diferentes dias de planejamento.

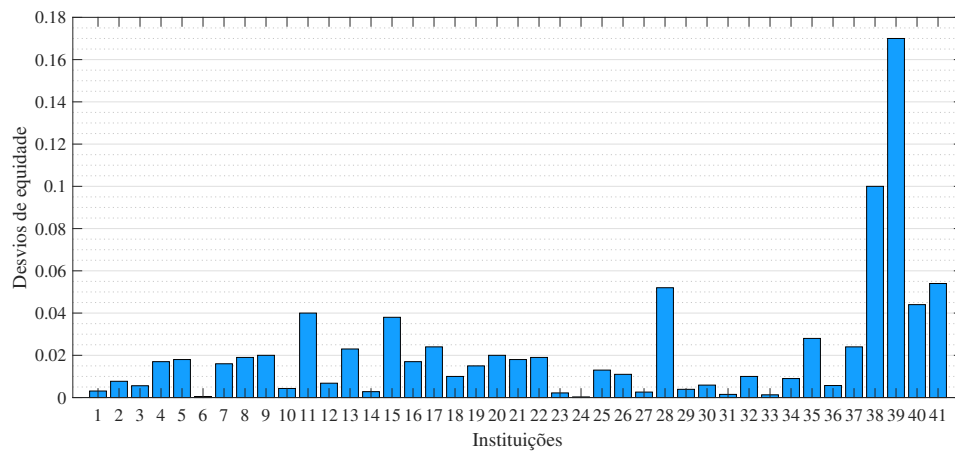
Com este critério de avaliação estabelecido, podemos assumir que quanto menor o valor do desvio K_i , menor será o desvio de equidade associado à Instituição i , com $i \in I$, considerando tanto a falta quanto o excesso de alimento enviado em relação à sua respectiva demanda.

Sendo assim, e para aferir a qualidade dos resultados obtidos pelos modelos propostos, foram calculados os desvios de equidade associados a cada instituição atendida. Além disso, o mesmo cálculo foi realizado para os dados reais disponibilizados pelo Banco de Alimentos para possíveis comparações dos resultados obtidos. A Tabela 16 apresenta os desvios de equidades calculados para os dados reais e resultados dos modelos M1 e M2, respectivamente.

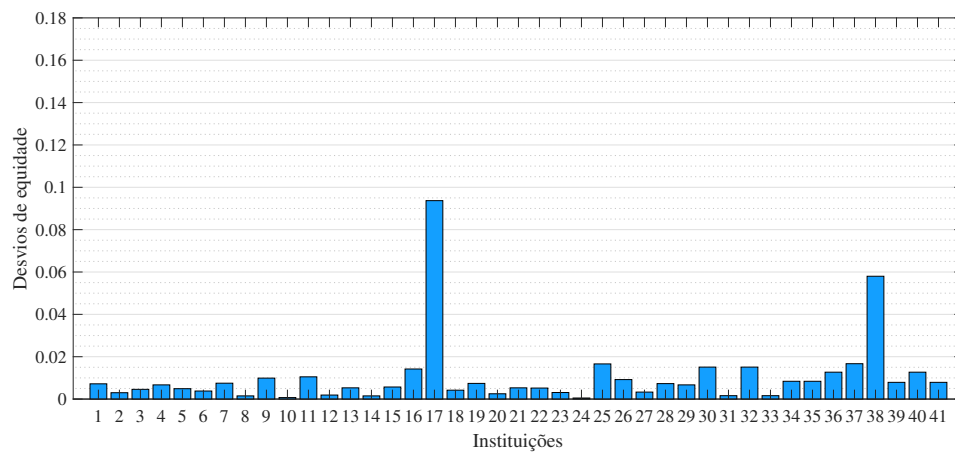
Tabela 16 – Desvios de equidade associados a cada instituição atendida (escala 10^{-3}).

Instituição	Dados Reais	M1	M2	Instituição	Dados Reais	M1	M2
1	3,1	7,2	5,7	22	19,0	5,2	5,4
2	7,7	3,0	2,4	23	2,2	3,1	0,6
3	5,6	4,6	3,6	24	0,3	0,5	0,5
4	17,0	6,7	4,6	25	13,0	16,6	9,6
5	18,0	4,9	3,9	26	11,0	9,2	9,6
6	0,5	3,8	3,0	27	2,6	3,3	5,5
7	16,0	7,5	3,0	28	52,0	7,3	18,1
8	19,0	1,5	5,0	29	3,9	6,7	6,9
9	20,0	9,9	17,5	30	5,9	15,1	9,5
10	4,3	0,7	0,5	31	1,5	1,6	1,7
11	40,0	10,5	4,2	32	10,0	15,1	8,7
12	6,8	1,9	1,5	33	1,3	1,6	1,7
13	23,0	5,3	4,2	34	9,0	8,4	13,9
14	2,8	1,5	5,0	35	28,0	8,4	8,7
15	38,0	5,7	21,1	36	5,7	12,7	5,3
16	17,0	14,2	11,4	37	24,0	16,7	5,8
17	24,0	93,7	18,1	38	100,0	58,0	10,0
18	10,0	4,2	4,3	39	170,0	7,9	2,6
19	15,0	7,4	5,9	40	44,0	12,7	5,3
20	20,0	2,5	5,4	41	54,0	7,9	17,6
21	18,0	5,3	5,4				

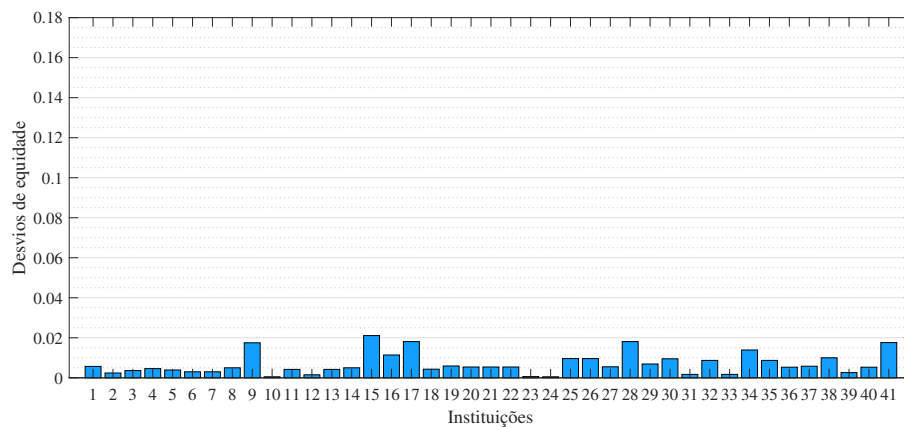
Para melhor visualização dos resultados, a Figura 15 apresenta os desvios de equidade calculados utilizando os dados reais, os resultados do modelo M1 e os resultados do modelo M2. Com base nos resultados apresentados, podemos observar que os resultados do modelo M1 apresentaram maior equidade em 28 das 41 instituições, fato que pode ser verificado na obtenção de desvios de equidade menores. Já com relação aos resultados do modelo M2, os resultados obtidos apresentam ainda mais equidade comparando com os dados reais, uma vez que estes apresentaram 31 de 41 desvios menores se comparado aos dados reais.



(a) Dados Reais



(b) Modelo M1



(c) Modelo M2

Figura 15 – Desvios de equidade em (a) dados reais, (b) resultados do modelo M1, e (c) resultados do modelo M2.

Uma vez que o estudo da distribuição equitativa considerando que não há priorização no atendimento de instituições foi realizado, em sequência foram analisados os parâmetros relacionados à priorização no atendimento de cada instituição por meio de um algoritmo para estudo

da sensibilidade.

5.3 Análise de Sensibilidade dos Pesos

O estudo da sensibilidade dos pesos associados à técnica de Programação por metas foi realizado por meio da implementação do método proposto por Jones (2011) apresentado em na Seção 3.2.1. Os parâmetros e demais informações referentes à implementação do método estão dispostos na Seção 4.3, assim como todas as considerações sobre o cenário implementado.

O modelo utilizado para a análise foi o modelo proposto M2, e para a escolha do conjunto inicial de pesos, foram investigados três casos, a fim de abranger os diversos cenários que podemos encontrar na realidade brasileira de Bancos de Alimentos. O Caso 1 estuda a situação em que a localização das instituições tem influência na priorização, visando abranger os casos em que há desertos alimentares e a priorização é feita por localização. Já o Caso 2 consiste no esquema de pesos iguais, ou seja, não há priorização no atendimento de instituições; e no Caso 3 foi realizada uma análise voltada ao caso particular do Banco de Alimentos de Botucatu – SP, com relação às preferências de um tomador de decisão.

5.3.1 Caso 1

Na determinação do conjunto de pesos inicial no Caso 1, foi utilizado o método AHP. Para isso, inicialmente foram utilizados os valores reais de distribuição para a comparação de pares de instituições, a quantidade de alimento enviado para cada instituição sobre sua demanda. Fazendo as comparações de pares, foi construída uma matriz de ordem 41, que foi representada utilizando a linguagem Python, pacote AHPy (Griffith, 2021). Os pesos normalizados foram obtidos e o índice de consistência da matriz foi 0,0003, indicando um valor satisfatório.

Considerando a existência de desertos alimentares, e também a maior praticidade para estudo dos pesos, as instituições foram divididas em *clusters* por meio do algoritmo *k-means*. Para a classificação dos pontos, foram utilizados os dados de latitude e longitude das instituições. A escolha do valor *k*, que determina a quantidade de *clusters*, foi feita por meio do Método do Cotovelo. Sendo assim, a métrica WCSS foi calculada considerando valores para *k* de 2 até 11 e os resultados estão na Figura 16.

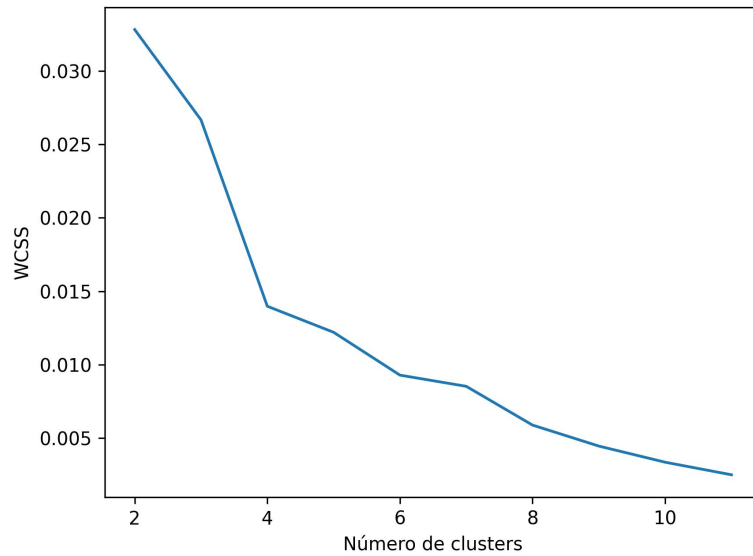


Figura 16 – Valores de WCSS para diferentes números de clusters.

Utilizando a metodologia apresentada, e avaliando a Figura 16, foi escolhido $k = 4$, ou seja, os dados foram divididos em quatro *clusters*. Sendo assim, a Figura 17(a) apresenta os dados de localização das instituições atendidas e a Figura 17(b) apresenta a divisão encontrada pelo algoritmo *k-means* indicada por diferentes cores.

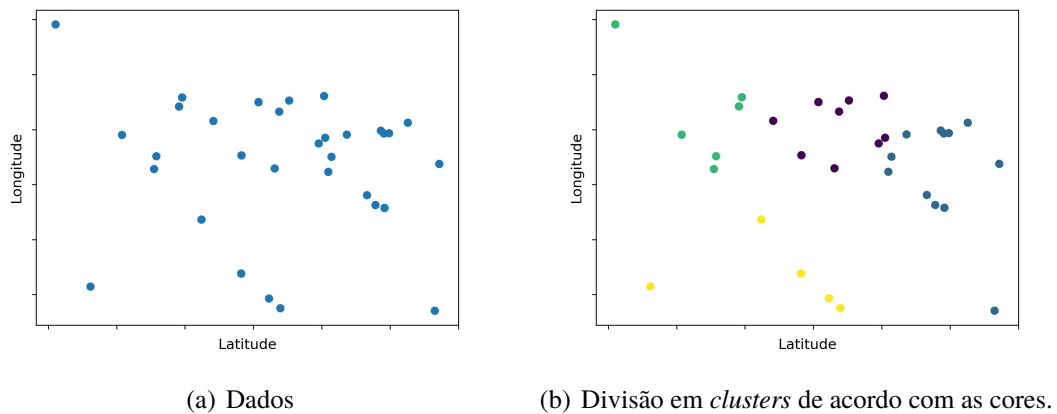


Figura 17 – Clusterização dos dados de localização das instituições atendidas pelo BA.

Em sequência, foram numerados os quatro *clusters* para definição das notações utilizadas para os pesos. A notação foi feita de forma que os *clusters* de 1 a 4 foram associados a pesos v_1 , v_2 , v_3 e v_4 , respectivamente. A disposição das instituições em cada *cluster* está descrita na Tabela 17.

Tabela 17 – Descrição dos clusters considerados para os Casos 1 e 2.

Cluster	Descrição	Tamanho
Cluster 1	Instituições 1, 2, 26, 32, 33, 35 e 37	7
Cluster 2	Instituições 3, 4, 6, 11, 12, 18, 22, 23, 24, 38 e 39	11
Cluster 3	Instituições 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 21, 27, 29, 34, 36, 40 e 41	14
Cluster 4	Instituições 5, 16, 17, 19, 20, 25, 28, 30 e 31	9

Considerando os pesos das instituições que pertencem ao mesmo *cluster* encontrado pelo método AHP, estes foram somados. Sendo assim, o conjunto inicial de pesos utilizado para a implementação do algoritmo de análise de sensibilidade dos pesos no caso em que há desertos alimentares, foi: $v^A = [0,1535 \quad 0,2449 \quad 0,3750 \quad 0,2264]$. E então, as instituições pertencentes ao mesmo cluster passam a ter o mesmo valor de peso, uma vez que o peso associado a cada cluster é dividido igualmente entre todas as instituições pertencentes.

A Figura 18 apresenta os resultados do modelo WGP obtidos utilizando o conjunto de pesos dado por v^A . Podemos verificar que utilizando a técnica de Programação por Metas Ponderadas não são encontrados resultados equitativos, uma vez que sua formulação não é favorável para a obtenção de resultados balanceados, porém, deve ser investigada para incorporar o conceito de eficiência no modelo.

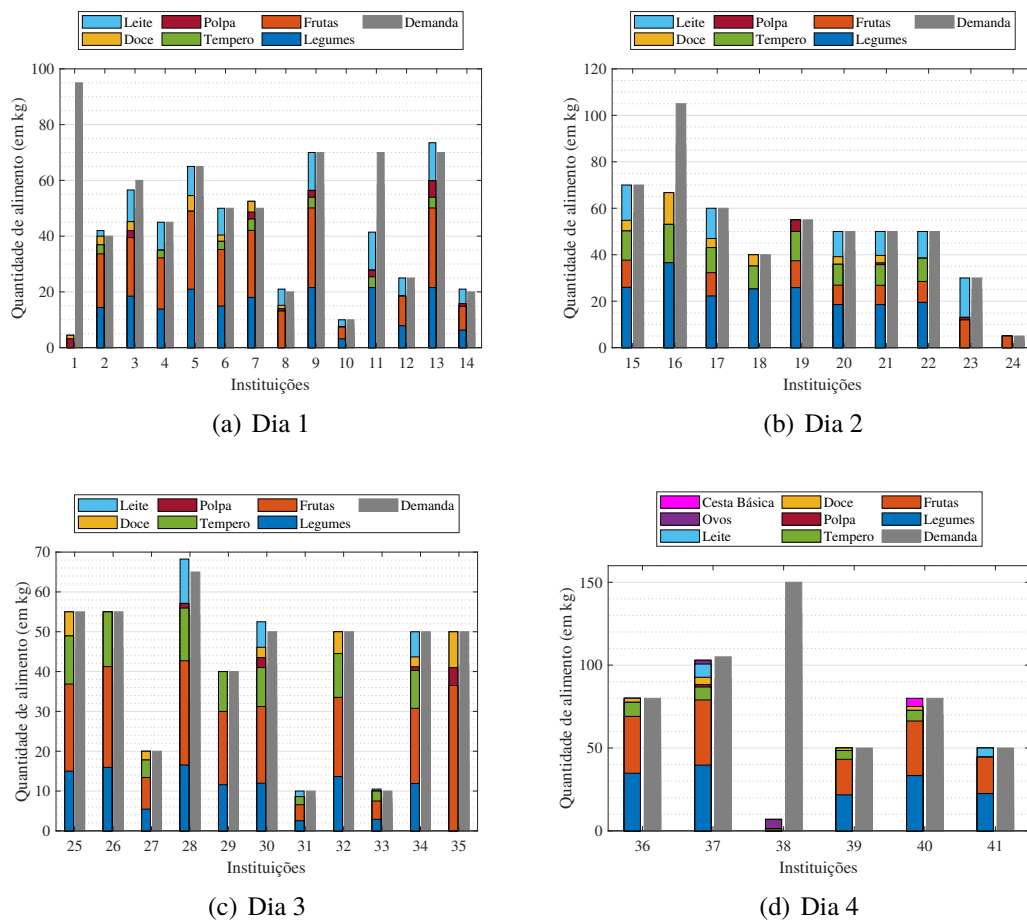


Figura 18 – Resultados do modelo WGP usando o conjunto de pesos v^A .

O algoritmo proposto por Jones (2011) foi implementado e a Tabela 18 apresenta os conjuntos analisados durante a exploração do espaço de pesos.

Tabela 18 – Conjuntos de pesos analisados pelo algoritmo utilizando o conjunto inicial v^A .

Conjunto de pesos	v_1	v_2	v_3	v_4
A1	0,1535	0,2449	0,3750	0,2264
A2	0,2303	0,2227	0,3411	0,2059
A3	0,1919	0,2338	0,3411	0,2162
A4	0,1072	0,3674	0,3674	0,1581
A5	0,1303	0,3061	0,3712	0,1923
A6	0,1075	0,1715	0,5625	0,1585
A7	0,1305	0,2082	0,4688	0,1925
A8	0,1236	0,1972	0,3396	0,3396
A9	0,1386	0,2210	0,3573	0,2830
A10	0,2303	0,2956	0,2956	0,1785
A11	0,1919	0,2703	0,3353	0,2024
A12	0,2303	0,1225	0,5341	0,1132
A13	0,1919	0,1837	0,4546	0,1698
A14	0,2303	0,1895	0,2901	0,2901
A15	0,1919	0,2172	0,3326	0,2583
A16	0,0767	0,3674	0,4427	0,1132
A17	0,1151	0,3061	0,4089	0,1698
A18	0,1504	0,3674	0,3674	0,1149
A19	0,1519	0,3061	0,3712	0,1707
A20	0,0768	0,1224	0,5625	0,2383
A21	0,1151	0,1837	0,4688	0,2324

De modo geral, a análise dos resultados obtidos por meio da resolução do modelo M2 utilizando apenas a técnica WGP na função objetivo, ou seja, $\alpha = 0$, considerando cada conjunto de pesos disposto na Tabela 18, indica que os desvios encontrados não foram balanceados como no caso do uso da técnica de CGP. Neste caso, foi encontrado um número menor de desvios associados às metas, porém, os desvios apresentaram maior amplitude se comparados aos apresentados nos casos estudados anteriormente.

Considerando o conjunto de pesos A1, temos quatro desvios significativos que devem ser evidenciados. Como podemos verificar na Figura 18, as Instituições 1, 11, 16 e 38 apresentaram desvios faltantes de alimentos que representam de forma aproximada, respectivamente, 95%, 40%, 36% e 95% das demandas. Uma situação semelhante foi encontrada analisando os resultados obtidos com o conjunto de pesos A9, em que estas mesmas instituições apresentaram desvios faltantes de aproximadamente 95%, 58%, 24% e 95% das respectivas demandas.

Os resultados obtidos considerando os conjuntos de pesos A2 e A12 também apresentaram determinadas semelhanças. Com o conjunto A2, os resultados indicaram resultados com desvios significativos faltantes das demandas das Instituições 1, 3, 11, 16 e 38, sendo, respectivamente, 25%, 46%, 71%, 58% e 95%, de forma aproximada. Já os resultado considerando o conjunto de pesos A12 indicaram desvios faltantes de aproximadamente 46%, 71%, 58% e 95% associados às Instituições 3, 11, 16 e 38.

Com o conjunto de pesos A18 foram encontrados sete desvios significativos associados ao atendimento das demandas, porém, com amplitude máxima menor do que 95% da respectiva demanda, caso encontrado nos demais conjuntos de pesos avaliados. As Instituições 1, 5, 16, 17, 28, 37 e 38 apresentaram os respectivos desvios faltantes das demandas, aproximadamente: 15%, 78%, 90%, 16%, 18%, 64% e 16%.

Os resultados obtidos neste estudo confirmam as preferências implementadas no método, explicadas na Seção 4.3, indicando que o cluster v_3 foi priorizado no atendimento, uma vez que nenhuma instituição discutida com desvios faltantes significativos pertencia a este cluster.

Apesar dos resultados apresentarem comportamento consoante às preferências impostas na implementação do método, em um cenário de Bancos de Alimentos brasileiros, além da eficiência na priorização, também é necessário considerar o conceito de equidade. Sendo assim, buscamos um equilíbrio entre as técnicas de WGP e CGP.

Utilizando a métrica de distância Euclidiana, as diferenças entre os resultados do modelo M2 utilizando apenas a técnica de WGP na função objetivo, ou seja, $\alpha = 0$ e os resultados obtidos utilizando outros valores de α pertencentes ao intervalo entre 0 e 1 foram calculadas e a Figura 19 apresenta os resultados considerando o espaço objetivo.

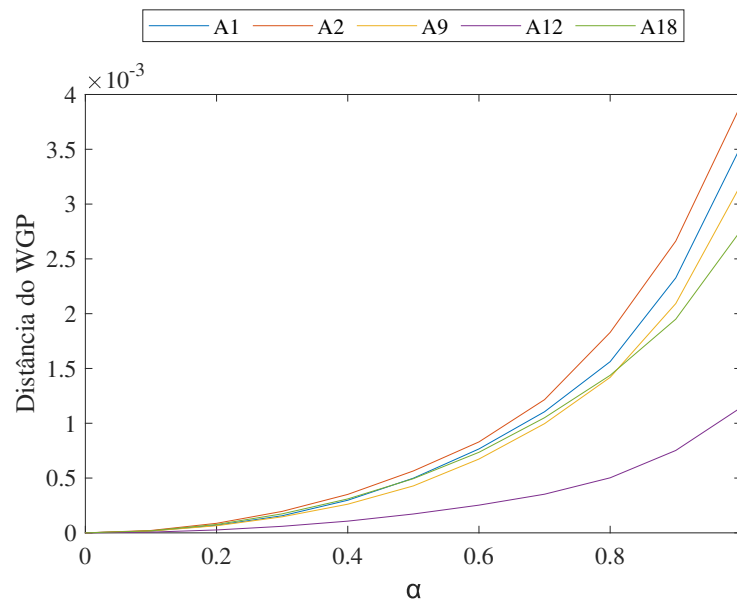


Figura 19 – Distância entre resultados do modelo M2 usando $\alpha \in [0, 1]$ e WGP ($\alpha = 0$) para o Caso 1.

O comportamento verificado na Figura 19 indicou uma função monotônica e os resultados foram semelhantes mesmo considerando diferentes conjuntos de pesos para a resolução do modelo M2. Para considerar os conceitos de eficiência e equidade na distribuição de alimentos obtida pela resolução do modelo M2, o valor escolhido para α deve indicar resultados balanceados, para que haja equidade, mas também considerando as diferentes priorizações, para que seja

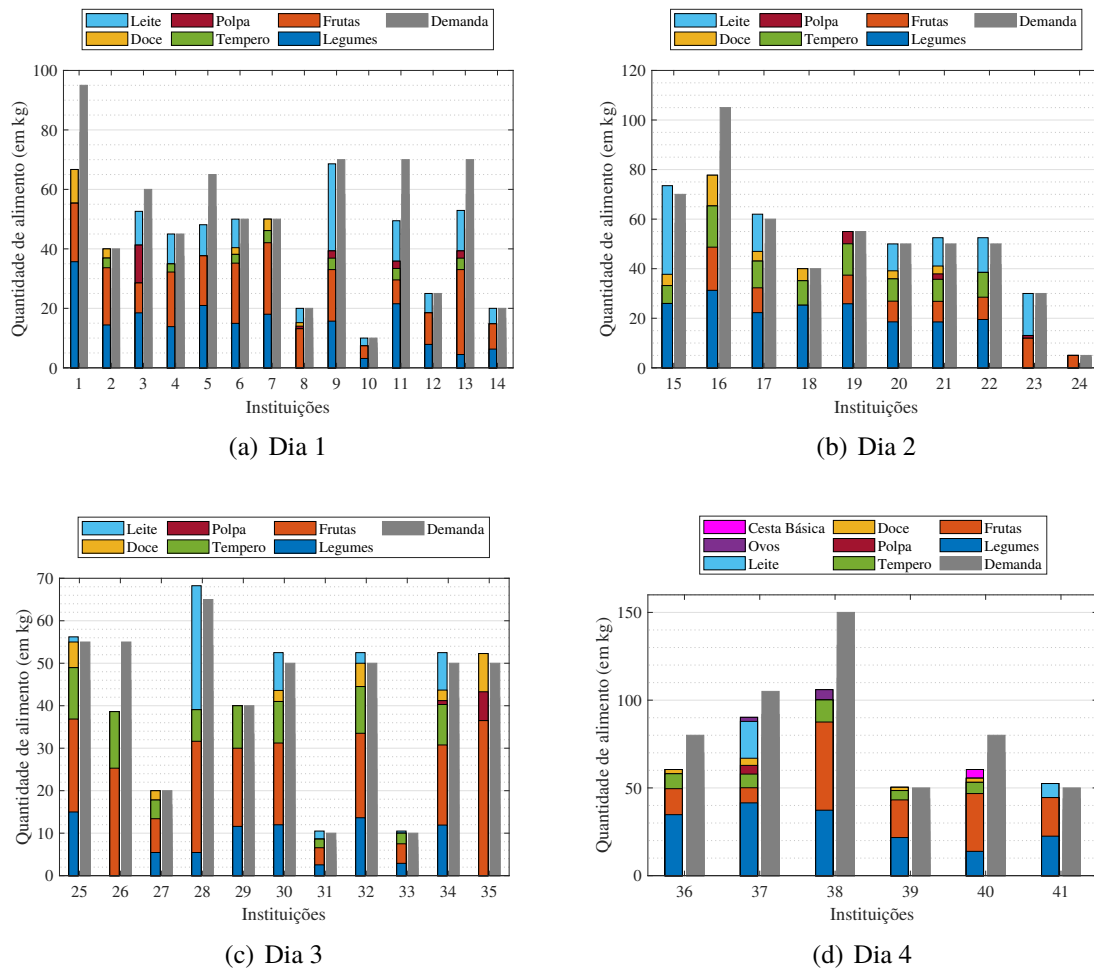


Figura 20 – Resultados do modelo M2 com $\alpha = 0,85$ usando o conjunto de pesos A1.

eficiente. Dessa forma, o valor escolhido para α foi de 0,85, de modo que as diferenças entre o WGP e o modelo M2 estivessem próximos ou abaixo de 2×10^{-3} . A Figura 20 apresenta os resultados do modelo M2 nesta configuração, com o conjunto de pesos A1.

Com os resultados apresentados na Figura 20 podemos verificar que com a alteração no valor de α temos uma diminuição significativa dos desvios faltantes das demandas se comparados aos resultados apresentados na Figura 18 utilizando $\alpha = 0$. O número de desvios indesejados foi maior, porém, todos os desvios indesejados das demandas das instituições foram abaixo de 30%, o que correspondia a 95% quando utilizado apenas WGP, indicando que a combinação das duas técnicas pode favorecer uma distribuição de alimentos eficiência e equitativa.

5.3.2 Caso 2

No Caso 2, a mesma configuração de clusters foi utilizada, porém, o esquema de pesos iguais foi considerado para o conjunto inicial. Sendo assim, pesos iguais foram associados à todas as instituições e então somados de acordo com a distribuição das instituições em cada cluster, de forma que o conjunto inicial de pesos no esquema de pesos iguais foi:

$v^E = [0,1708 \quad 0,2684 \quad 0,3416 \quad 0,2196]$. Com o novo conjunto de pesos inicial v^E , os pesos associados a cada cluster foram divididos igualmente entre todas as instituições pertencentes ao mesmo cluster, assim como no caso anterior.

A Figura 21 apresenta os resultados obtidos na resolução do modelo M2 utilizando $\alpha = 0$, ou seja, utilizando apenas a técnica de WGP na função objetivo.

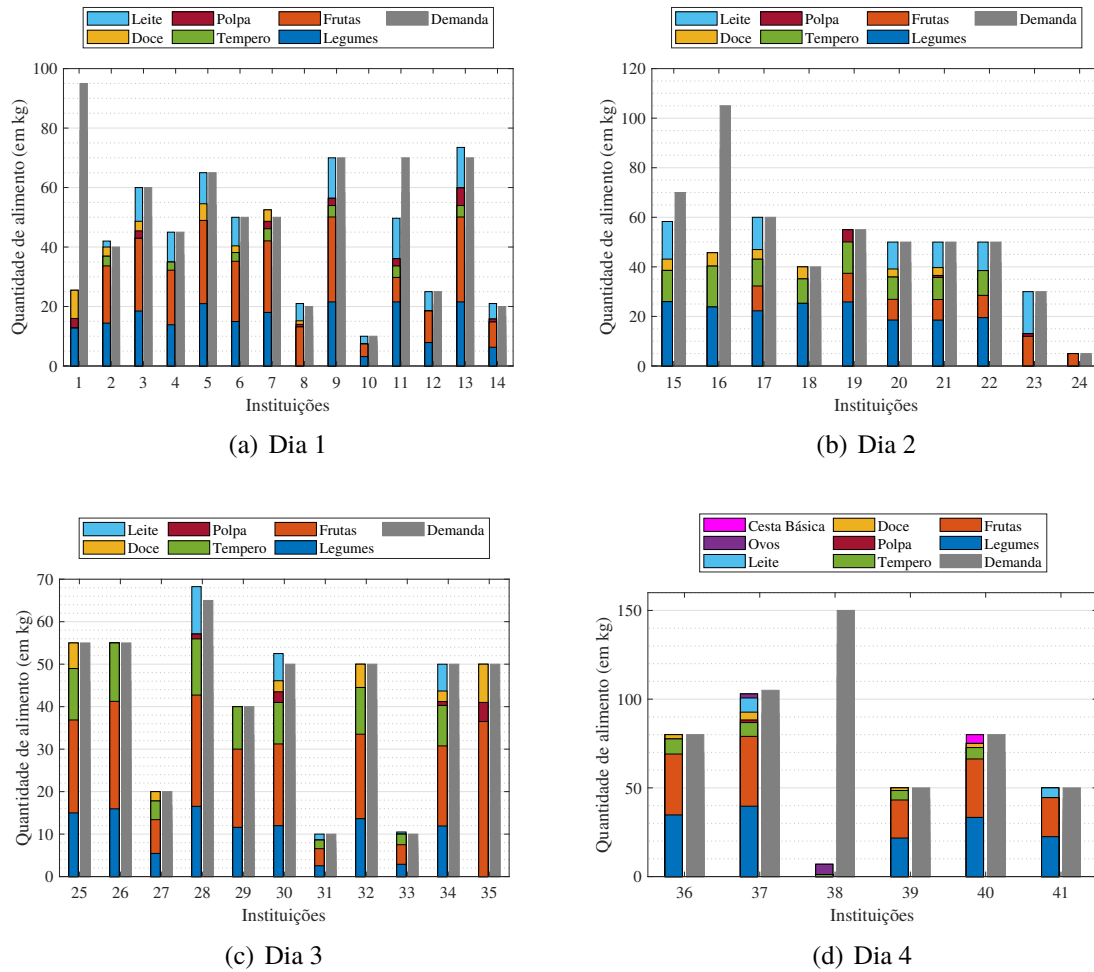


Figura 21 – Resultados do modelo WGP usando o conjunto de pesos v^E .

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos pela implementação do algoritmo de análise de sensibilidade dos pesos, utilizando o conjunto inicial v^E .

Tabela 19 – Conjuntos de pesos analisados pelo algoritmo utilizando o conjunto inicial v^E .

Conjunto de pesos	v_1	v_2	v_3	v_4
E1	0,1708	0,2684	0,3416	0,2196
E2	0,2562	0,2406	0,3063	0,1969
E3	0,2135	0,2545	0,3239	0,2082
E4	0,0854	0,4024	0,4024	0,1098
E5	0,1281	0,3354	0,3720	0,1647
E6	0,1264	0,1987	0,5124	0,1625
E7	0,1486	0,2335	0,4270	0,1911
E8	0,1327	0,2085	0,3294	0,3294
E9	0,1517	0,2385	0,3355	0,2745
E10	0,2562	0,2814	0,2814	0,1809
E11	0,2135	0,2749	0,3115	0,2003
E12	0,2562	0,1342	0,4998	0,1098
E13	0,2135	0,2013	0,4207	0,1647
E14	0,2562	0,2098	0,2670	0,2670
E15	0,2135	0,2391	0,3043	0,2433
E16	0,0854	0,4024	0,4024	0,1098
E17	0,1281	0,3354	0,3720	0,1647
E18	0,0854	0,4024	0,4024	0,1098
E19	0,1281	0,3354	0,3720	0,1647
E20	0,0854	0,1342	0,5124	0,2680
E21	0,1281	0,2013	0,4270	0,2438

Assim como no caso anterior, foram destacados alguns conjuntos de pesos na Tabela 19 que indicam diferentes ponderações para os quatro clusters considerados a fim de discutir semelhanças e divergências no atendimento das instituições.

Considerando o resultado obtido com o conjunto de pesos E1, que está apresentado na Figura 21, podemos verificar cinco desvios faltantes significativos associados às demandas, que referem-se às Instituições 1, 11, 15, 16, e 38, sendo de forma aproximada, respectivamente, 73%, 29%, 16%, 56% e 95%. Estes resultados indicam que mesmo em um cenário com pesos iguais, o uso da técnica de WGP não apresenta uma distribuição equitativa, uma vez que as instituições não foram atendidas de maneira balanceada.

Os resultados obtidos com o uso do conjunto de pesos E6 apresentou semelhanças no atendimento das instituições, com exceção da Instituição 15, as demais instituições discutidas no conjunto E1 também apresentaram desvios significativos, ou seja, as Instituições 1, 11, 16 e 38 apresentaram desvios faltantes referentes a 73%, 40%, 58% e 95% de suas respectivas demandas.

Assim como no caso estudado anteriormente, podemos verificar que os desvios faltantes podem chegar a 95% das respectivas demandas, indicando um resultado não aplicável na realidade, uma vez que não há equidade considerada no processo. Sendo assim, foi calculada a diferença no valor da função objetivo do modelo M2 com diferentes valores de α e o modelo

M2 com $\alpha = 0$, os resultados estão apresentados na Figura 22.

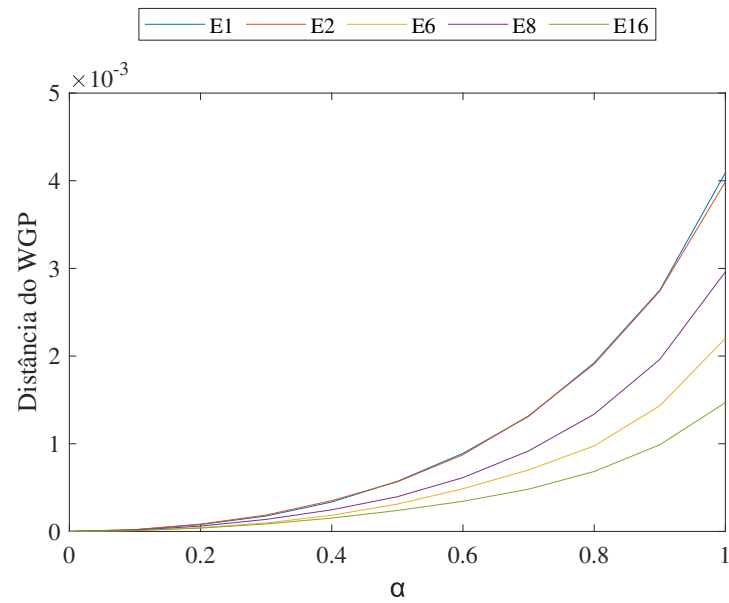


Figura 22 – Distância entre resultados do modelo M2 usando $\alpha \in [0, 1]$ e WGP ($\alpha = 0$) para o Caso 2.

O comportamento apresentado foi semelhante ao encontrado no Caso 1. Sendo assim, o modelo M2 foi resolvido utilizando $\alpha = 0,85$ para sua implementação, e a Figura 23 apresenta os resultados.

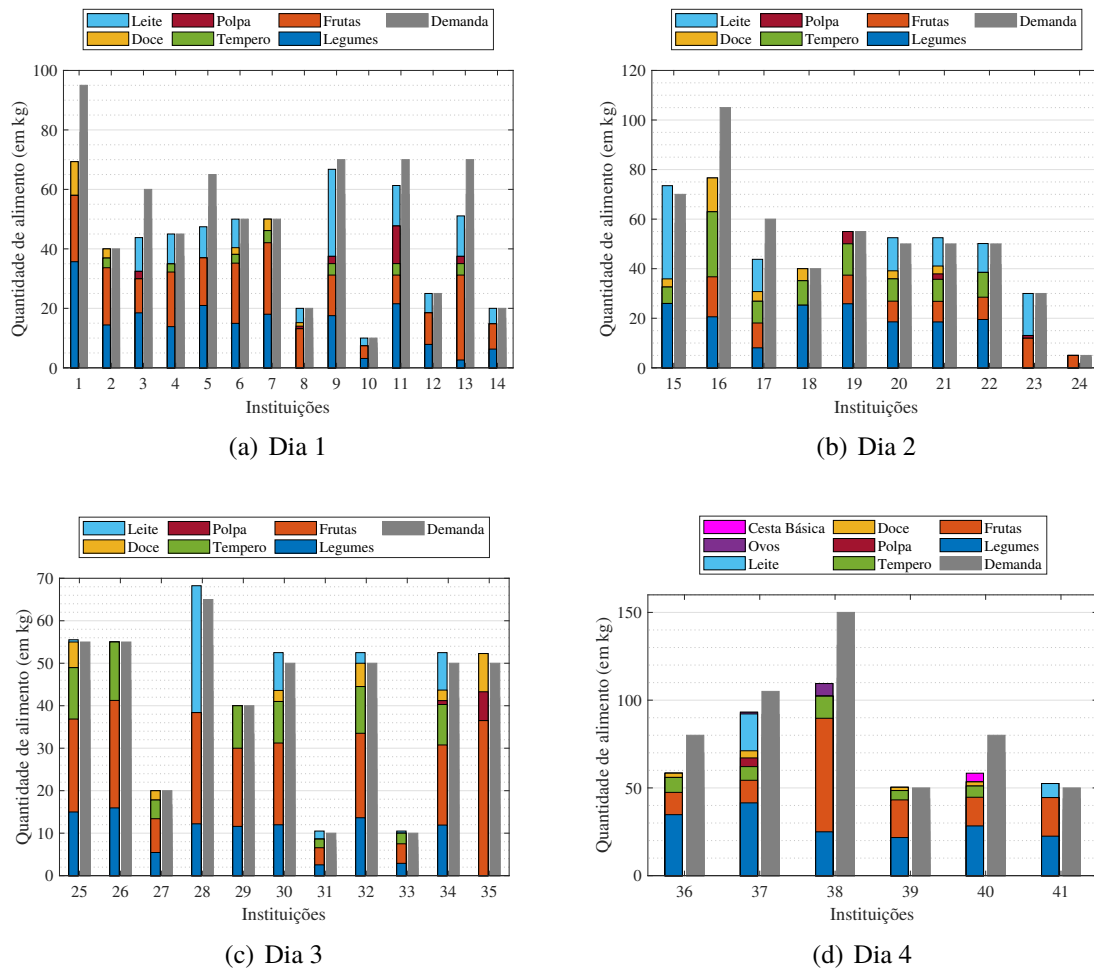


Figura 23 – Resultados do modelo M2 com $\alpha = 0,85$ usando o conjunto de pesos E1.

Podemos verificar que a amplitude dos desvios indesejados reduziu significativamente se comparado aos resultados apresentados na Figura 21, indicando o aumento da equidade nos resultados encontrados pela ponderação das duas técnicas de Programação por Metas. O aumento no número de desvios foi observado, porém, o máximo representa apenas 27% da respectiva demanda.

5.3.3 Caso 3

Para a implementação do Caso 3, na determinação do conjunto inicial de pesos v^N , um tomador de decisão classificou as instituições com pontuações de 1 a 9, sendo 1 aquelas com menor prioridade de atendimento e 9 aquelas instituições com maior prioridade de atendimento. Dessa forma, foi construída uma matriz com comparações em pares utilizando as pontuações indicadas. O método AHP foi aplicado utilizando a matriz e o índice de consistência foi igual a 0, indicando um resultado satisfatório.

Assim como no Caso 1, foram agrupadas instituições para reduzir o número de pesos

avaliados pelo processo. Sendo assim, para a clusterização foram utilizadas as preferências do tomador de decisão, de forma que todas as instituições classificadas com a mesma pontuação, foram alocadas em um mesmo cluster. A nova disposição de clusters está disposta na Tabela 20.

Tabela 20 – Descrição dos clusters considerados para o Caso 3.

Cluster	Descrição	Tamanho
Cluster 1	Instituições 1, 2, 5, 16, 17, 24, 25, 26, 30, 31, 37 e 40	12
Cluster 2	Instituições 3, 4, 6, 15, 18, 19, 20, 23, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 38 e 41	17
Cluster 3	Instituições 7, 8 e 21	3
Cluster 4	Instituições 9, 10, 11, 12, 13, 14, 22, 36 e 39	9

Neste terceiro caso, mais informações de preferência do tomador de decisão foram adicionadas para a implementação do método, sendo uma delas a ordem prioritária dos clusters. Como indicado na Seção 4.3, estas informações foram implementadas em conjunto com o método de análise de sensibilidade dos pesos para a real análise dos resultados. Segundo estas informações, o Cluster 1 deve ser priorizado na distribuição de alimento, seguido pelos Clusters 2, 3 e 4, respectivamente.

Os pesos encontrados pelo método AHP e as informações adicionais de preferência do tomador de decisão foram somados considerando instituições em um mesmo cluster, e o conjunto inicial de pesos foi $v^N = [0,4152 \quad 0,4573 \quad 0,0576 \quad 0,0693]$. Os resultados obtidos pela resolução do modelo M2 considerando $\alpha = 0$ e o conjunto de pesos v^N estão dispostos na Figura 24.

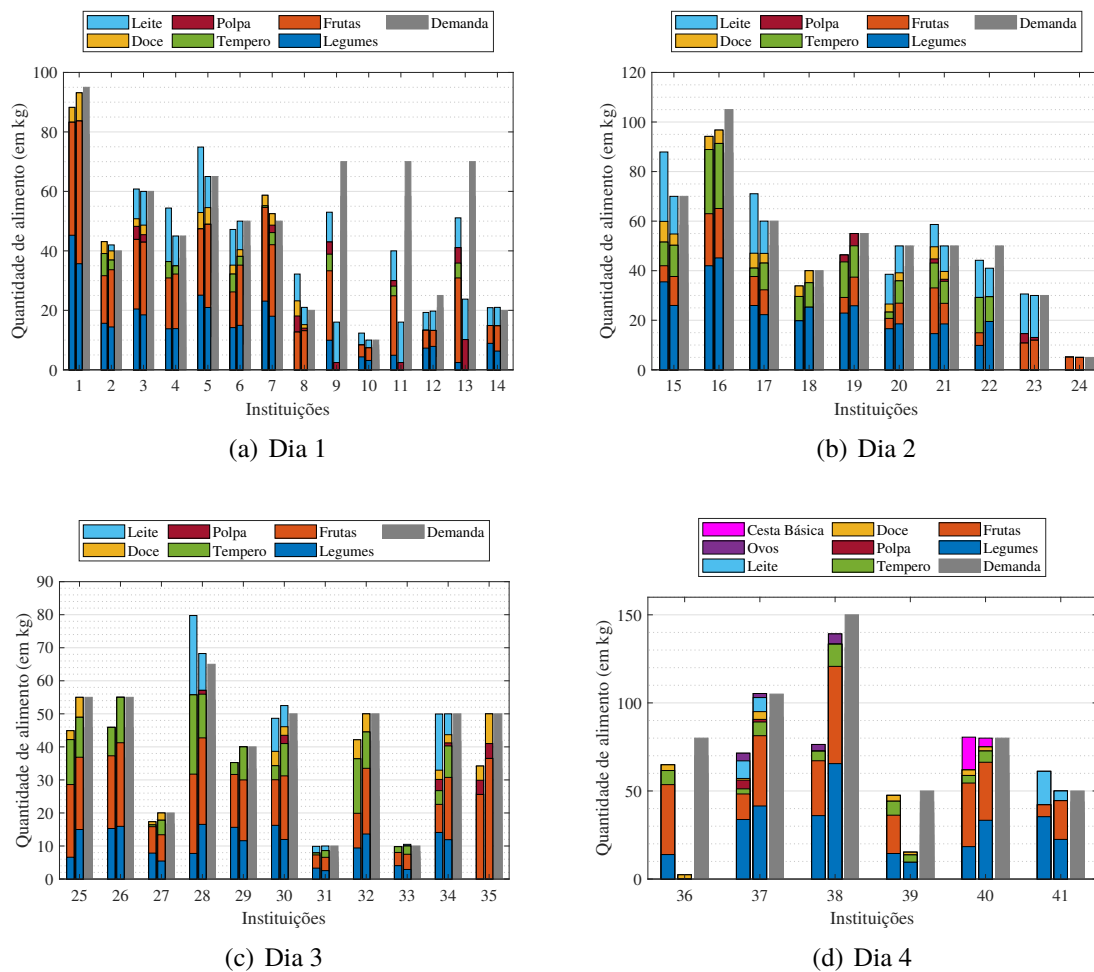


Figura 24 – Comparação da distribuição de alimentos, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M2 com $\alpha = 0$ e conjunto de pesos N1, e demanda.

O algoritmo proposto por Jones (2011) foi implementado e a Tabela 21 apresenta os conjuntos analisados durante a exploração do espaço de pesos.

Tabela 21 – Conjuntos de pesos analisados pelo algoritmo utilizando o conjunto inicial v^N .

Conjunto de pesos	v_1	v_2	v_3	v_4
N1	0,4152	0,4573	0,0576	0,0693
N2	0,6228	0,2953	0,0372	0,0447
N3	0,5190	0,3763	0,0474	0,0570
N4	0,3875	0,5490	0,0288	0,0347
N5	0,4014	0,5031	0,0432	0,0520
N6	0,3634	0,4896	0,0864	0,0606
N7	0,3893	0,4735	0,0720	0,0650
N8	0,4000	0,4405	0,0555	0,1040
N9	0,4076	0,4489	0,0565	0,0866
N10	0,6228	0,3137	0,0288	0,0347
N11	0,5190	0,3855	0,0432	0,0520
N12	0,6228	0,2840	0,0501	0,0430
N13	0,5190	0,3707	0,0539	0,0562
N14	0,6228	0,2508	0,0316	0,0948
N15	0,5190	0,3541	0,0446	0,0820
N16	0,3875	0,5490	0,0288	0,0347
N17	0,4014	0,5031	0,0432	0,0520
N18	0,3875	0,5490	0,0288	0,0347
N19	0,4014	0,5031	0,0432	0,0520
N20	0,3893	0,4896	0,0864	0,0347
N21	0,4023	0,4735	0,0720	0,0520

Os resultados obtidos por meio da resolução do modelo utilizando apenas a técnica de WGP na função objetivo mostraram uma aderência significativa às preferências indicadas pelo tomador de decisão. Seguindo a informação de que as instituições do Cluster 4 apresentam menor prioridade de atendimento, podemos verificar na Figura 24 que os maiores desvios faltantes das respectivas demandas estão associados às instituições pertencentes ao Cluster 4. Os maiores desvios foram associados às Instituições 9, 11, 12, 13 e 22 e foram, respectivamente, 77%, 77%, 21%, 66% e 18%, de forma aproximada.

Considerando os resultados obtidos com os conjuntos de pesos N2, N4, N8 e N20, os quais apresentam diferentes ponderações para os clusters considerados, o comportamento foi semelhante aos resultados obtidos com o conjunto de pesos N1, uma vez que todos os desvios faltantes que excedem 15% das demandas das instituições atendidas estão associados às instituições pertencentes ao Cluster 4. Em todos os resultados avaliados foram encontrados desvios associados à determinadas instituições que podem chegar a 97%, indicando a necessidade de considerar a ponderação das técnicas de Programação por Metas na função objetivo.

Ainda avaliando os resultados com os diferentes conjuntos de pesos, os resultados obtidos com a resolução do modelo M2 utilizando $\alpha = 0$ e o conjunto de pesos N14 apresentou, semelhante aos demais conjuntos de pesos avaliados, seis desvios indesejados significativos que podem ser evidenciados, sendo as Instituições 9, 11, 13, 21, 22 e 38 com os desvios aproxima-

damente, 77%, 77%, 39%, 16%, 18% e 95% faltantes das respectivas demandas.

Assim como nos Casos 1 e 2, o estudo de diferenças entre os valores das funções objetivos do modelo M2 com os diferentes valores de α foi realizado e a Figura 25 apresenta os resultados.

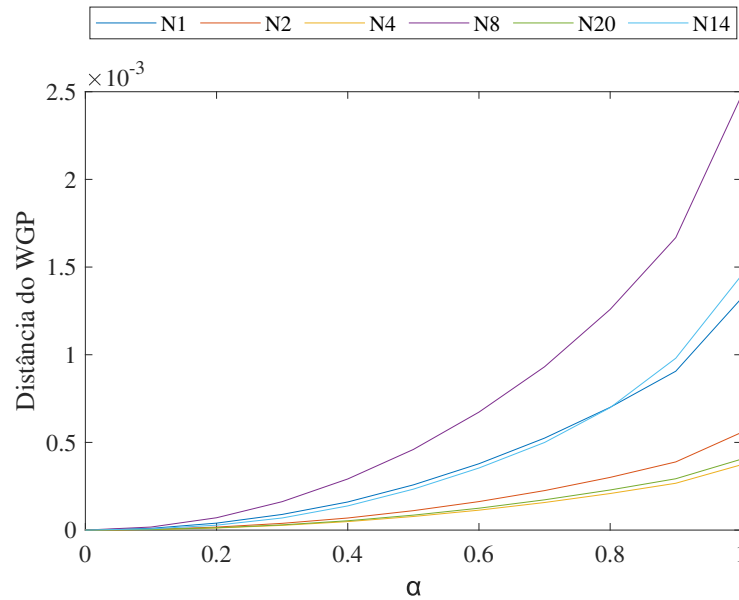


Figura 25 – Distância entre resultados do modelo M2 usando $\alpha \in [0, 1]$ e WGP ($\alpha = 0$) para o Caso 3.

O comportamento verificado na Figura 25 apresentou semelhança aos resultados encontrados nos casos anteriores. Sendo assim, para considerar a eficiência e a equidade nos resultados obtidos para a distribuição de alimentos em um cenário real, a Figura 26 apresenta os resultados do modelo M2 com $\alpha = 0,85$ e o conjunto de pesos N14.

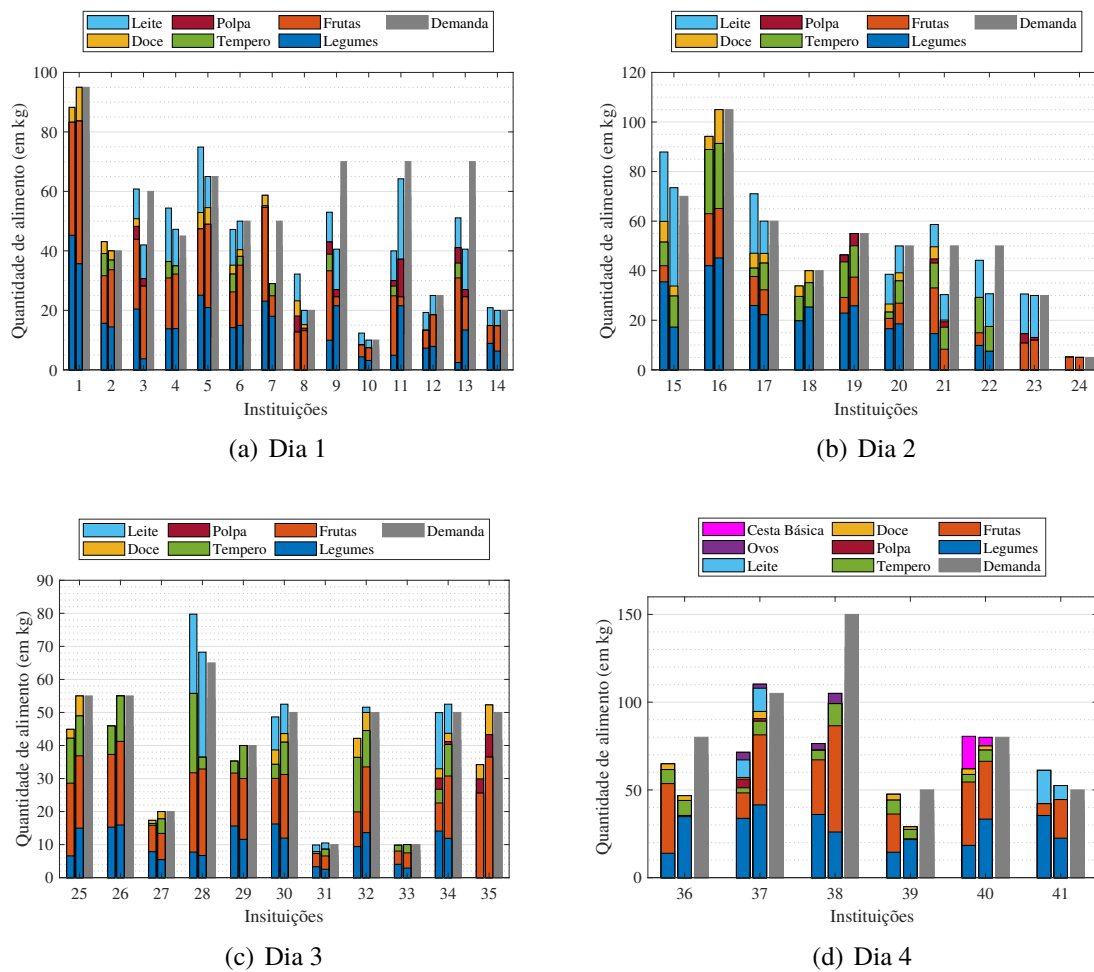


Figura 26 – Comparação da distribuição de alimentos, em que cada instituição está associada a três barras que representam, respectivamente, os dados reais, resultados do modelo M2 com $\alpha = 0,85$ e conjunto de pesos N14, e demanda.

O conjunto N14 foi escolhido para a discussão uma vez que apresentou resultados mais próximos dos dados reais. Na Figura 26, podemos verificar que diferente do modelo M2 apenas com a técnica de WGP, estes resultados indicaram maior equidade. Os desvios indesejados foram significativamente reduzidos em amplitude, além de se apresentarem consoantes às preferências do tomador de decisão.

6 Ferramenta para Distribuição Equitativa de Alimentos

A aumento da necessidade por soluções tecnológicas eficientes para a distribuição de alimentos, especialmente no contexto das políticas públicas, tem sido um dos principais impulsionadores do desenvolvimento de novas ferramentas. No cenário atual, existe uma lacuna significativa no processo de planejamento da distribuição de alimentos realizado pelos Bancos de Alimentos, particularmente quando se trata de uma distribuição equitativa desses recursos. Esse contexto revela a necessidade de uma ferramenta que possa não apenas facilitar o planejamento, mas também aprimorar a eficiência e a justiça social na prática.

A ferramenta *web* desenvolvida neste trabalho surge como resposta a essa demanda. Ela foi projetada para atender tanto às necessidades práticas de otimização do processo de distribuição quanto ao desafio de garantir a equidade na alocação dos alimentos, considerando as especificidades de diferentes comunidades e o planejamento mais eficiente. Além disso, a implementação dessa ferramenta resulta em uma economia de tempo significativo para os gestores, permitindo um planejamento mais ágil e uma execução mais eficaz das políticas alimentares.

Disponível online, a aplicação foi projetada em R com o uso do pacote Shiny, sendo seu acesso público por meio do endereço:

[<https://leticia-godoi.shinyapps.io/DistribuicaoEquitativaApp/>](https://leticia-godoi.shinyapps.io/DistribuicaoEquitativaApp/).

A solução digital foi desenvolvida para facilitar a análise e o planejamento de processos de distribuição em Bancos de Alimentos brasileiros, oferecendo uma interface intuitiva e funcional. A ferramenta é composta por cinco páginas principais, cada uma com funcionalidades específicas que são discutidas a seguir. Essas páginas incluem painéis para visualização de dados, configuração de parâmetros, execução de modelos de otimização, apresentação de resultados e estatísticas para a produção de relatórios, proporcionando aos usuários uma experiência completa e prática para apoiar a tomada de decisões.

A primeira página apresenta instruções para uso. São disponibilizados para *download* três arquivos em formato “.xlsx” para que o usuário possa identificar como os dados devem ser inseridos na ferramenta na forma de planilhas. O formato escolhido para os arquivos foi baseado em observações da realidade brasileira, tendo em vista recursos tecnológicos muitas vezes já

utilizados no cotidiano da organização. A Figura 27 apresenta uma vista geral da primeira página da ferramenta.



Figura 27 – Visão geral da primeira página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.

O arquivo referente às informações das instituições sociais atendidas deve ser em formato de planilha e a Figura 28 apresenta um exemplo de como devem estar dispostos os dados.

	A	B	C	D	E
1	Instituição	Demanda	Capacidade		
2	Instituição 1	80	84		
3	Instituição 2	105	110,25		
4	Instituição 3	150	157,5		
5	Instituição 4	50	52,5		
6	Instituição 5	80	84		
7	Instituição 6	50	52,5		
8					
9					
10					

Figura 28 – Exemplo de arquivo com informações sobre as instituições sociais atendidas.

Podemos verificar que as informações referentes às instituições são: nome da instituição, ou outra informação utilizada para identificação, demanda total de alimentos (em kg) e capacidade de recebimento de alimentos (em kg).

A Figura 29 apresenta um exemplo para o arquivo com informações sobre os tipos de alimentos disponíveis para o processo de distribuição. Os dados também são fornecidos em

planilha, porém, agora contendo as diferentes classificações de alimentos consideradas, além de suas quantidades totais (em kg) disponíveis para a distribuição diária.

	A	B	C	D
1	Tipos	Quantidades		
2	Vegetais	152		
3	Frutas	150,05		
4	Tempero	29,2		
5	Polpa	4,95		
6	Doce	10,65		
7	Leite	29		
8	Ovos	8,15		
9	Cesta	18,6		
10				

Figura 29 – Exemplo de arquivo com informações sobre os tipos de alimentos disponíveis para o processo de distribuição.

Já a Figura 30 apresenta a disposição dos dados na planilha referentes às informações sobre a preferência de recebimento de cada tipo de alimento pelas instituições atendidas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	Instituição	Vegetais	Frutas	Tempero	Polpa	Doce	Leite	Ovos	Cesta	
2	Instituição 1	1	1	1	0	1	0	0	0	
3	Instituição 2	1	1	1	1	1	1	1	0	
4	Instituição 3	1	1	1	0	0	0	1	0	
5	Instituição 4	1	1	1	0	1	0	0	0	
6	Instituição 5	1	1	1	0	1	0	0	1	
7	Instituição 6	1	1	0	0	0	1	0	0	
8										
9										

Figura 30 – Exemplo de arquivo com informações sobre as preferências de recebimento de cada tipo de alimento em relação à cada instituição atendida.

Neste arquivo, todas as instituições devem apresentar um valor de 0 ou 1 para cada tipo de alimento disponível para o processo. Os valores dependem da preferência no recebimento do alimento, sendo 0 quando a instituição não gostaria de receber o alimento em questão e 1 caso a instituição aceite o recebimento do respectivo alimento. Estas informações são utilizadas para o cálculo da proporção de cada tipo de alimento aceito pela instituição, parâmetro g_{ai} dos modelos propostos.

Esta proporção é calculada automaticamente pela aplicação, a fim de tornar mais simples a utilização pelo usuário. Sendo assim, primeiramente é calculada a proporção de cada tipo de alimento disponível de acordo com a quantidade total. Os valores de proporção encontrados para cada tipo de alimento são multiplicados pelos dados fornecidos pelo usuário. Em sequência, é

calculado o valor faltante para cada instituição e esta proporção encontrada é multiplicada pelos valores anteriormente calculados. Para finalizar os valores encontrados são somados, de forma que cada instituição tem como soma das proporções de todos os tipos de alimento igual a 1, respeitando as preferências de acordo com o arquivo carregado.

Navegando pela barra superior, a segunda página disponível na versão atual da ferramenta é chamada **Distribuição Simples**, e tem a finalidade de planejamento de uma distribuição de alimentos equitativa, porém, que não distingue os diferentes tipos de alimentos. O modelo implementado para a construção desta funcionalidade foi o modelo proposto M1 com $\alpha = 1$ e pesos iguais para as instituições. Além disso, foi realizada a adaptação para a consideração de apenas um tipo de alimento, tornando o problema mais simples. A Figura 31 apresenta a visão geral da página, e para a obtenção de resultados referentes à distribuição de alimentos equitativa é necessário o carregamento de um documento, seguindo o modelo disponível na página anterior da ferramenta, como exemplificado na Figura 28, indicando quais são as instituições atendidas pela organização, suas respectivas demandas e capacidade total de recebimento de alimentos. Além disso, é necessária a atualização da quantidade total de alimento disponível para o processo (em kg). Os resultados do modelo são apresentados em um gráfico de barras para facilitar a visualização pelo usuário.



Figura 31 – Visão geral da segunda página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.

Considerando o modelo implementado, não há priorização no atendimento de instituições, sendo assim, todas as demandas são atendidas de maneira equitativa e com o mesmo grau de importância.

A terceira página da ferramenta é chamada **Distribuição Completa**, e sua vista geral está apresentada na Figura 32. Como o nome indica, este processo aborda o processo de distribuição de alimentos com mais detalhes se comparado ao caso anterior. O modelo proposto M1 foi implementado, considerando $\alpha = 1$ e, assim como no caso anterior, pesos iguais associados ao atendimento de todas as metas. Para a utilização desta funcionalidade, devem ser carregados três arquivos com informações necessárias para a resolução do modelo, que correspondem aos exemplos disponíveis nas Figuras 28, 29 e 30.



Figura 32 – Visão geral da terceira página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.

Com a finalidade de auxiliar o gestor do Banco de Alimentos na obtenção de informações relevantes para a escrita de relatórios de transparência, a quarta página da ferramenta, como o título sugere, é sobre estatísticas. Esta página, quando carregado pelo usuário um documento referente aos alimentos disponíveis para o processo, providencia informações relevantes, que são apresentados por textos e gráfico de pizza. As informações são referentes aos alimentos disponíveis para o processo e suas respectivas porcentagens. A Figura 33 apresenta uma visão geral desta opção.

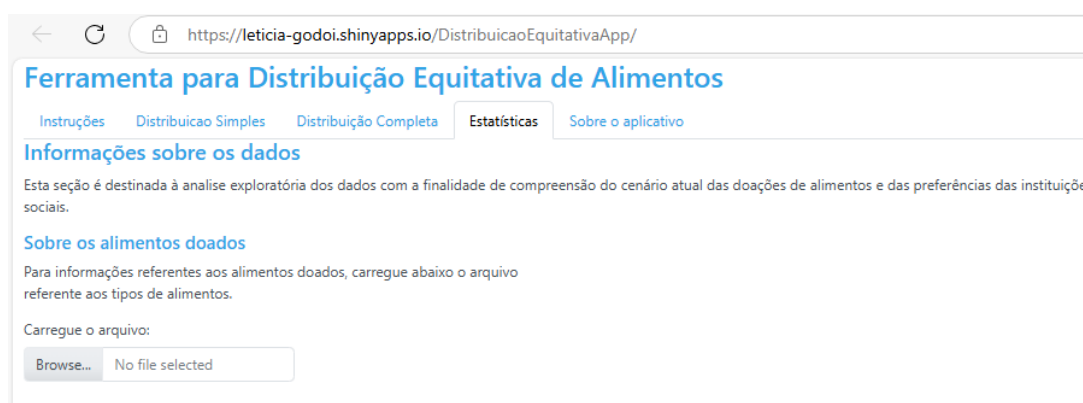


Figura 33 – Visão geral da quarta página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.

A quinta, e última, página é referente às informações e autoria da construção da ferramenta, sua visão geral está disposta na Figura 34.



Figura 34 – Visão geral da quinta página da aplicação desenvolvida em R com o pacote Shiny.

7 Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo central o estudo do processo de distribuição de alimentos realizado por Bancos de Alimentos, a fim de propor uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão aos gestores. A ferramenta foi proposta por meio de um modelo de otimização com uso da técnica de Programação por Metas, uma vez que este processo configura numa importante estratégia para facilitar o acesso das pessoas que se encontram em insegurança alimentar e nutricional aos alimentos. O principal enfoque do trabalho foi no funcionamento dos Bancos de Alimentos brasileiros, que apresentam suas particularidades em relação a sua operação e também aos alimentos recebidos por meio de doações.

Por meio das visitas realizadas ao Banco de Alimentos do município de Botucatu – SP foi possível observar a realidade local no que diz respeito ao seu funcionamento, assim como a demanda por uma ferramenta de auxílio no processo de distribuição de alimentos para que este seja realizado de forma ágil, uma vez que a quantidade de alimentos varia conforme o dia da semana e a sazonalidade. Foi observada também a necessidade de, em alguns casos, utilizar diferentes critérios e ponderações para o atendimento das demandas, uma vez que existem famílias cujos únicos alimentos acessíveis são aqueles disponibilizados pelos Bancos de Alimentos.

Foram propostos dois modelos que compartilham os mesmos fundamentos conceituais, mas diferem na quantidade de detalhes incorporados. O primeiro modelo foi desenvolvido para a distribuição diária de alimentos, enquanto o segundo se destina ao planejamento de períodos mais longos de distribuição, desde que a quantidade diária de alimentos recebida seja conhecida. Portanto, os modelos se distinguem pela consideração de estoques, pois enquanto o primeiro não aborda o armazenamento, o segundo permite estocar alimentos para distribuição nos dias seguintes, buscando tornar o processo o mais equitativo possível ao longo do período considerado.

Os resultados obtidos com a resolução dos modelos foram relevantes, mostrando que as técnicas de Programação por Metas utilizadas na formulação dos modelos foram eficazes. A técnica de Programação por Metas Chebyshev destacou-se por produzir resultados altamente equitativos, enquanto a Programação por Metas Estendida, que combina as abordagens de Programação por Metas Ponderadas e Chebyshev, proporcionou um equilíbrio entre os conceitos de eficiência e equidade.

Foram avaliados diferentes cenários, todos com resultados promissores. Na análise de

sensibilidade dos pesos, foram considerados cenários que incluíram desertos alimentares, um esquema de pesos iguais e as preferências de um tomador de decisão. Em todas essas situações, os modelos mostraram sua capacidade de obter soluções que promovem tanto a equidade quanto a eficiência, confirmando sua robustez e aplicabilidade em diversos contextos.

Como último ponto, podemos destacar a ferramenta desenvolvida para promover a distribuição equitativa de alimentos, que pode ser utilizada por gestores de Bancos de Alimentos como um recurso prático e eficiente. Essa ferramenta não apenas torna o planejamento mais ágil, como também contribui para que o processo de distribuição seja conduzido de forma mais equitativa, considerando diferentes cenários e demandas. Assim, ela se apresenta como uma solução promissora para o aprimoramento dos processos operacionais realizados pelos Bancos de Alimentos, fortalecendo seu impacto social e sua capacidade de atender às populações em situação de vulnerabilidade.

Como pesquisas futuras, ficam os estudos voltados para o roteamento de veículos para a coleta das doações aos Bancos de Alimentos. As rotas podem ser otimizadas de forma a se tornarem mais sustentáveis, considerando a esfera ambiental, além de mais econômicas e eficientes no atendimento de todos os doadores no horário previsto.

Referências

- ABRANDH. *O direito humano à alimentação adequada e o sistema nacional de segurança alimentar e nutricional*. [S.l.], 2013. ABRANDH – Ação Brasileira pela Nutrição e Direitos Humanos. Brasília. 4
- Ahire, S. L.; Pekgun, P. Harvest hope food bank optimizes its promotional strategy to raise donations using integer programming. *Interfaces*, INFORMS, v. 48, n. 4, p. 291 – 306, 2018. 23
- Araújo, M. L. de *et al.* Condições de vida de famílias brasileiras: estimativa da insegurança alimentar. *Revista Brasileira de Estudos de População*, SciELO Brasil, v. 37, 2020. 4, 6
- Arenales, M. *et al.* *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011. 14
- Balcik, B.; Iravani, S.; Smilowitz, K. Multi-vehicle sequential resource allocation for a nonprofit distribution system. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 46, n. 12, p. 1279 – 1297, 2014. 22
- Bazaraa, M. S.; Jarvis, J. J.; Sherali, H. D. *Linear Programming and Network Flows*. Fourth. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1952. 14
- Beaulac, J.; Kristjansson, E.; Cummins, S. A systematic review of food deserts, 1966 – 2007. *Preventing chronic disease*, v. 6, n. 3, 2009. 7
- Belik, W. A política brasileira de segurança alimentar e nutricional: concepção e resultados. *Segurança Alimentar e Nutricional*, v. 19, n. 2, 2012. 8
- Belik, W.; Cunha, A. R. A. de A.; Costa, L. A. Crise dos alimentos e estratégias para a redução do desperdício no contexto de uma política de segurança alimentar e nutricional no Brasil. *Planejamento e Políticas Públicas*, n. 38, 2012. 9
- Brasil. Lei n 11.346, de 15 de setembro de 2006. Cria o sistema nacional de segurança alimentar e nutricional – SISAN com vistas em assegurar o direito humano à alimentação adequada e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2006. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11346.htm>. 4
- Brasil. *Estudo Técnico n. 01/2014. Escala Brasileira de Insegurança Alimentar – EBIA: análise psicométrica de uma dimensão da Segurança Alimentar e Nutricional*. Brasília, DF, 2014. 5
- Brasil. *Guia de avaliação de alimentos doados aos Bancos de Alimentos*. Brasília, 2018. Ministério do Desenvolvimento Social. Secretaria Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional. 11
- Brasil. *Guia Operacional e de Gestão para Bancos de Alimentos*. Brasília, 2020. Ministério da Cidadania. 9, 10, 12
- Brasil. *MapaSAN - Diretório*. 2023. Ministério do Desenvolvimento Social. Secretaria Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional. Disponível em: <<https://aplicacoes.mds.gov.br/sagi/mapasan/index.php>>. 32

- CAISAN. *Mapeamento dos desertos alimentares no Brasil*. [S.l.], 2018. Relatório Técnico, Câmara Interministerial de Segurança Alimentar e Nutricional. 6
- Castanon, R.; Campos, F. A.; Martinez, S. D. The food bank of madrid: A linear model for optimal nutrition. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 21, 2020. 23
- Cattaneo, A. *et al.* Reducing food loss and waste: Five challenges for policy and research. *Food Policy*, v. 98, 2021. 7
- Cui, M. Introduction to the k-means clustering algorithm based on the elbow method. *Accounting, Auditing and Finance*, v. 1, n. 1, p. 5 – 8, 2020. 20, 21
- Davis, L. B. *et al.* Scheduling food bank collections and deliveries to ensure food safety and improve access. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier, v. 48, n. 3, p. 175–188, 2014. 22
- Donegan, H. A.; Dodd, F. J. A note on saaty’s random indexes. *Mathematical and computer modelling*, v. 15, n. 10, p. 135 – 137, 1991. 20
- Emrouznejad, A.; Marra, M. The state of the art development of ahp (1979 – 2017): A literature review with a social network analysis. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 55, n. 22, p. 6653 – 6675, 2017. 19
- FAO *et al.* *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all*. [S.l.]: Food & Agriculture Org., 2021. 6
- FAO *et al.* *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022: repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable*. [S.l.]: Food & Agriculture Org., 2022. 7
- FAO *et al.* *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum*. [S.l.]: Food & Agriculture Org., 2023. 1, 2
- FAO *et al.* *The State of Food Security and Nutrition in the World 2024: financing the end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms*. [S.l.]: Food & Agriculture Org., 2024. 1
- França, F. C. O. de *et al.* Deserts swamps and food oases: Mapping around the schools in Bahia, Brazil and implications for ensuring food and nutritional security. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 21, n. 11, 2024. 6
- Freire Junior, M.; Soares, A. G. Food loss and waste. In: *Responsible consumption and production*. Brasília, DF: EMBRAPA, 2020. cap. 4, p. 31–39. 7
- Galindo, E. *et al.* Efeitos da pandemia na alimentação e na situação da segurança alimentar no brasil. *Food for Justice Working Paper Series*, Berlin: Food for Justice: Power, Politics, and Food Inequalities in a Bioeconomy, n. 4, 2021. 6
- Ghahremani-Nahr, J.; Ghaderi, A.; Kian, R. A food bank network design examining food nutritional value and freshness: A multi objective robust fuzzy model. *Expert systems with applications*, Elsevier, v. 215, 2023. 24

- Godoi, L. F. *et al.* Optimization of the food distribution process using the goal programming technique. *OPSEARCH*, 2025. 41
- Godoi, L. F. *et al.* A multi-objective approach for strategic resource allocation in brazilian food banks. *Journal of the Operational Research Society*, 2025. 41
- Goldbarg, M. C.; Luna, H. P. L. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. [S.l.]: Elsevier, 2005. 13
- Gomez-Pantoja, J. Álvaro; Salazar-Aguilar, M. A.; Gonzalez-Velarde, J. L. The food bank resource allocation problem. *Top*, v. 29, 2021. 23
- Griffith, P. *AHPy*. 2021. <https://github.com/PhilipGriffith/AHPy>. 57
- Hasnain, T.; Orgut, I. S.; Ivy, J. S. Elicitation of preference among multiple criteria in food distribution by food banks. *Production and Operations Management*, v. 30, n. 12, p. 4475–4500, 2021. 23
- Henz, G. P.; Porpino, G. Food losses and waste: how Brazil is facing this global challenge? *Horticultura Brasileira*, v. 35, n. 4, 2017. 8, 9
- Honorio, O. S. *et al.* Social inequalities in the surrounding areas of food deserts and food swamps in a brazilian metropolis. *International Journal for Equity in Health*, Springer, v. 20, p. 1 – 8, 2021. 7
- IBGE. *Pesquisa de orçamentos familiares 2017-2018: análise da segurança alimentar no Brasil*. [S.l.], 2020. IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento. - Rio de Janeiro. 5
- IBGE. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: Segurança alimentar 2023*. Rio de Janeiro, 2024. 1
- Ishangulyyev, R.; Kim, S.; Lee, S. H. Understanding food loss and waste – why are we losing and wasting food? *Foods*, v. 8, n. 8, 2019. 7
- Islam, M. H.; Ivy, J. S. Modeling the role of efficiency for the equitable and effective distribution of donated food. *OR Spectrum*, v. 44, p. 485–534, 2021. 24
- Jones, D. A practical weight sensitivity algorithm for goal and multiple objective programming. *European Journal of Operational Research*, v. 213, n. 1, p. 238 – 245, 2011. 17, 18, 19, 27, 28, 57, 60, 69
- Jones, D.; Tamiz, M. *Practical goal programming*. [S.l.]: Springer, 2010. 15, 17
- Kaviyani-Charati, M. *et al.* Sustainable network design for a non-profit food bank supply chain with a heterogeneous fleet under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 171, 2022. 24
- Mahmoudi, M.; Shirzad, K.; Verter, V. Decision support models for managing food aid supply chains: A systematic literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier, v. 82, 2022. 22
- Martins, C. L.; Melo, M. T.; Pato, M. V. Redesigning a food bank supply chain network in a triple bottom line context. *International Journal of Production Economics*, v. 214, p. 234–247, 2019. 23

- Morissette, L.; Chartier, S. General considerations and implementation in mathematica. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, v. 9, n. 1, p. 15 – 24, 2013. 20, 21
- ONG. Banco de Alimentos. 2023. <<https://bancodealimentos.org.br/>>. 8
- Organização das Nações Unidas. *Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. 2022. [internet]. Acesso em 17 de março de 2022. Disponível em: <brasil.un.org/pt-br/sdgs>. 1
- Orgut, I. S.; Ivy, J.; Uzsoy, R. Modeling for the equitable and effective distribution of food donations under stochastic receiving capacities. *IIE Transactions*, v. 49, n. 6, 2017. 23
- Orgut, I. S. *et al.* Modeling for the equitable and effective distribution of donated food under capacity constraints. *IIE Transactions*, v. 48, n. 3, 2016. 12, 23, 54
- Orgut, I. S. *et al.* Robust optimization approaches for the equitable and effective distribution of donated food. *European Journal of Operational Research*, v. 269, n. 2, 2018. 23
- Pant, S. *et al.* Consistency indices in analytic hierarchy process: A review. *Mathematics*, v. 10, n. 8, 2022. 20
- Pérez-Escamilla, R.; Segall-Corrêa, A. M. Food insecurity measurement and indicators. *Revista de Nutrição*, SciELO Brasil, v. 21, 2008. viii, 4, 5
- Philippi, S. T. *Nutrição e Técnica Dietética*. 3. ed. Barueri, SP: Manole, 2014. 11
- Rede PENSSAN. Insegurança alimentar e covid-19 no Brasil. *Rede Brasileira de Pesquisa em Soberania e Segurança Alimentar e Nutricional. Relatório de pesquisa*, 2021. 6
- Rede PENSSAN. Insegurança alimentar e covid-19 no Brasil. *Rede Brasileira de Pesquisa em Soberania e Segurança Alimentar e Nutricional. Relatório de pesquisa*, 2022. 6
- Rivera, A. F.; Smith, N. R.; Ruiz, A. A systematic literature review of food banks' supply chain operations with a focus on optimization models. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, v. 13, n. 1, p. 10 –25, 2023. 22
- Romero, C. Extended lexicographic goal programming: a unifying approach. *Omega*, v. 29, n. 1, 2001. 16
- Santos, K. L. dos *et al.* Perdas e desperdícios de alimentos: reflexões sobre o atual cenário brasileiro. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 23, 2020. 7, 8
- SESC. Mesa Brasil. 2023. <<https://www2.sesc.com.br/portal/site/mesabrasilsesc/home/>>. 8
- Solak, S.; Scherrer, C.; Ghoniem, A. The stop-and-drop problem in nonprofit food distribution networks. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 221, n. 1, p. 407–426, 2014. 22
- Tenuta, N. *et al.* Brazilian food banks: Overview and perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 23, 2021. 11
- Vaidya, O. S.; Kumar, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, v. 169, n. 1, p. 1 – 29, 2006. 20