

Um modelo matemático para minimizar os custos de distribuição de grãos em uma cooperativa

A mathematical model to minimize the costs of grain distribution in a CO-OP

Fernanda Braz Volpato Czus¹, Inês Barão Ferreira Miyamoto¹, Bruno Alexandre Nascimento de Carvalho¹, Rafael Henrique Palma Lima², Gislaine Camila Lapasini Leal³

RESUMO: A gestão de Cadeias de Suprimentos Alimentares (CSA) é um grande desafio para as empresas do setor, principalmente quando consideramos o contexto global em que a produção de alimentos se encontra. A otimização do desempenho das CSAs envolve a tomada de decisões relacionadas ao transporte, à armazenagem e à produção visando o atendimento das demandas previstas, o que tem sido feito na literatura com o auxílio de técnicas de Pesquisa Operacional (PO). Este trabalho propõe um modelo de otimização para a cadeia de suprimentos de uma cooperativa agroindustrial que atua no setor de grãos, visando a minimização dos custos totais com transporte e armazenagem e, ao mesmo tempo, atender as demandas da fábrica. O problema foi modelado usando Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e resolvido usando o solver Gurobi 9.0. Dados reais da cooperativa foram coletados e as soluções obtidas apontam para uma redução de 1,1% dos custos totais da cooperativa.

Palavras-chave: Armazenagem. Pesquisa operacional. Projeto de redes de suprimentos. Transporte.

ABSTRACT: Food Supply Chain Management (CSA) is a major challenge for companies in the sector, particularly due to global context in which food production is located. The optimization of the performance of CSAs involves decisions on transport, storage and production to meet the expected demands. The latter may be found in the literature by Operational Research (PO) techniques. Current paper proposes an optimization model for the supply chain of a grain agroindustrial cooperative, aiming at minimizing total transportation and storage costs and meeting the plant's demands. Modeling was executed with Mixed Whole Linear Programming (PLIM) and solved by Gurobi 9.0. Data from the cooperative were collected and the solutions revealed a 1.1% decrease in the co-op's total costs.

Keywords: Operational research. Storage. Supply networks. Transport.

Autor correspondente:

Fernanda Braz Volpato Czus: fernanda.brazvolpato@gmail.com

Recebido em: 30/09/2020

Aceito em: 24/03/2021

¹ Mestrandos em engenharia de produção, Programação de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá (PR), Brasil.

² Doutorado em Engenharia de Produção, Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Londrina (PR), Brasil.

³ Doutora em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Ciência da Computação, Universidade Estadual de Maringá (UEM, Maringá (PR), Brasil

INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, a produção agrícola tem sido uma das maiores plataformas de crescimento econômico em diversos países (PRETTY *et al.*, 2011). Apesar disso, fornecer alimentos para a crescente população mundial ainda é considerado um desafio para governos e empresas, principalmente se considerarmos que as projeções indicam que a população mundial chegará a 10 bilhões de pessoas em 2050 (SEARCHINGER *et al.* 2018).

Conforme explicam Ahumada e Villalobos (2009) e Plà, Sandars e Higgins (2014), a globalização da economia fez com que algumas regiões se especializassem em produtos alimentares específicos, o que resulta em diversos desafios do ponto de vista logístico, pois os alimentos são consumidos em localidades distintas de onde foram produzidos.

A estrutura das cadeias de suprimentos alimentares (CSAs) geralmente é complexa, composta por inúmeros atores que desempenham ampla variedade de funções, tais como fornecedores de insumos, produtores rurais, beneficiadores, distribuidores e varejistas (HENSON; REARDON, 2005; MATOPOULOS *et al.* 2007). Do ponto de vista estratégico, o projeto de CSAs envolve a localização de instalações de produção, armazenamento e distribuição. Além disso, as CSAs ainda precisam enfrentar o desafio adicional de lidar com produtos que possuem validade limitada, suprimentos intermitentes e regulamentações complexas, o que torna a resiliência dessas cadeias de suprimentos ainda mais importante (DANI; DEEP, 2010; BEHZADI *et al.*, 2017).

Plà, Sandars e Higgins (2014) argumentam que a complexidade das variáveis envolvidas no projeto e gestão de CSAs abre diversas possibilidades para aplicações de técnicas de Pesquisa Operacional (PO). Técnicas como programação matemática têm sido aplicadas ao setor agroindustrial desde a década de 1950 (BEHZADI *et al.*, 2018), porém tais aplicações têm recebido maior atenção apenas nas últimas duas décadas (SYAHRUDDIN; KALCHSCHMIDT, 2012). Com o aumento do poder computacional, técnicas como programação linear inteira mista (PLIM) (ALBORNOZ; URRUTIA-GUTIÉRREZ, 2018; JONKMAN; BARBOSA-PÓVOA; BLOEMHOF, 2019; BOTTANI *et al.*, 2019), programação não linear (MAIYAR; THAKKAR, 2017), programação multi-objetivo (JOUZDANI; GOVINDAN, 2021) e simulação (ONGGO *et al.*, 2019; GHOLAMI-ZANJANI *et al.*, 2021) vêm sendo aplicadas no projeto de CSAs. Apesar dessa ampla variedade de técnicas, Nematollahi e Tajbakhsh (2020) mostram que a maior parte das aplicações relatadas na literatura utilizam PLIM para a modelagem dos problemas em CSAs.

No contexto nacional, alguns pesquisadores da área de PO têm se dedicado à modelagem de problemas agroindustriais, com destaque para o trabalho de Caixeta-Filho (2004). Também podem ser citados os trabalhos de Junqueira e Morabito (2006), que aplicaram programação matemática à logística de sementes de milho, e Pacheco e Morabito (2010) que propuseram um modelo de planejamento para otimização do fluxo de caixa em empresas

agroindustriais. Apesar desses trabalhos, a literatura nacional ainda possui poucos relatos de aplicações práticas de PO no setor agroindustrial.

Por isso, este trabalho tem como objetivo contribuir com a literatura científica sobre otimização de CSAs ao propor um modelo de minimização dos custos de transporte e armazenagem de grãos em uma cooperativa agroindustrial. No caso estudado, os grãos são provenientes de cooperados e recebidos em entrepostos, para, em seguida, serem transportados aos armazéns e posteriormente para uma fábrica de esmagamento. O modelo proposto também considera a possibilidade de os grãos serem enviados diretamente dos entrepostos para a fábrica, sem a necessidade de armazenagem intermediária. Dessa maneira, a cooperativa pode planejar o transporte e armazenagem de grãos entre todos os pontos de sua cadeia de suprimentos.

Este trabalho contribui para a literatura científica existente ao propor um modelo de PLIM para um caso real de CSA, considerando múltiplos atores na cadeia. Conforme explicam Plà, Sandars e Higgins (2014), a literatura científica ainda precisa de mais aplicações reais de PO ao setor agroindustrial, para reduzir a barreira entre as aplicações teóricas de PO e as reais necessidades das empresas. Além disso, autores como Higgins (2010) e Behzadi (2017) destacam a importância de se levar em consideração a cadeia de suprimento como um todo na tomada de decisões.

Do ponto de vista prático, este trabalho propõe um modelo que trata do problema de armazenagem hoje enfrentado no Brasil. Conforme explicam Coradi *et al.* (2020), o Brasil tem enfrentado graves problemas neste setor, dado que a produção de grãos no país é maior do que a capacidade estática de armazenagem. Por isso, o caso brasileiro requer modelos que lidam com o transporte e armazenagem de grãos de maneira integrada.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 descreve os materiais e métodos, incluindo detalhes da cooperativa estudada e a proposta do modelo matemático de PLIM; a Seção 3 apresenta os resultados da aplicação do modelo usando dados reais e a Seção 4 traz as considerações finais do trabalho, destacando as contribuições, limitações e direcionamentos futuros resultantes desta pesquisa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ESTUDO DE CASO

O modelo proposto é embasado em um estudo de caso para uma cooperativa agroindustrial que recebe grãos dos seus cooperados em vários entrepostos de recebimento, distribuídos geograficamente nos Estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul. Após o recebimento pelo entreposto, o grão vai para um dos armazéns da cooperativa para os procedimentos de limpeza e secagem. A cooperativa possui uma fábrica de esmagamento de

grãos no noroeste do Paraná, que recebe os grãos dos armazéns ou direto dos entrepostos de recebimento. A Figura 1 apresenta os elos da cadeia de suprimentos de grãos da cooperativa, em que (A) representa as propriedades rurais, (B) representa os armazéns e (C) representa a unidade industrial. Assim, os grãos originados em (A) podem ir para qualquer armazém e/ou para mais de um armazém (B) ou direto para a fábrica (C). Quando os grãos são enviados para os armazéns (B), posteriormente, serão transportados para a fábrica (C).

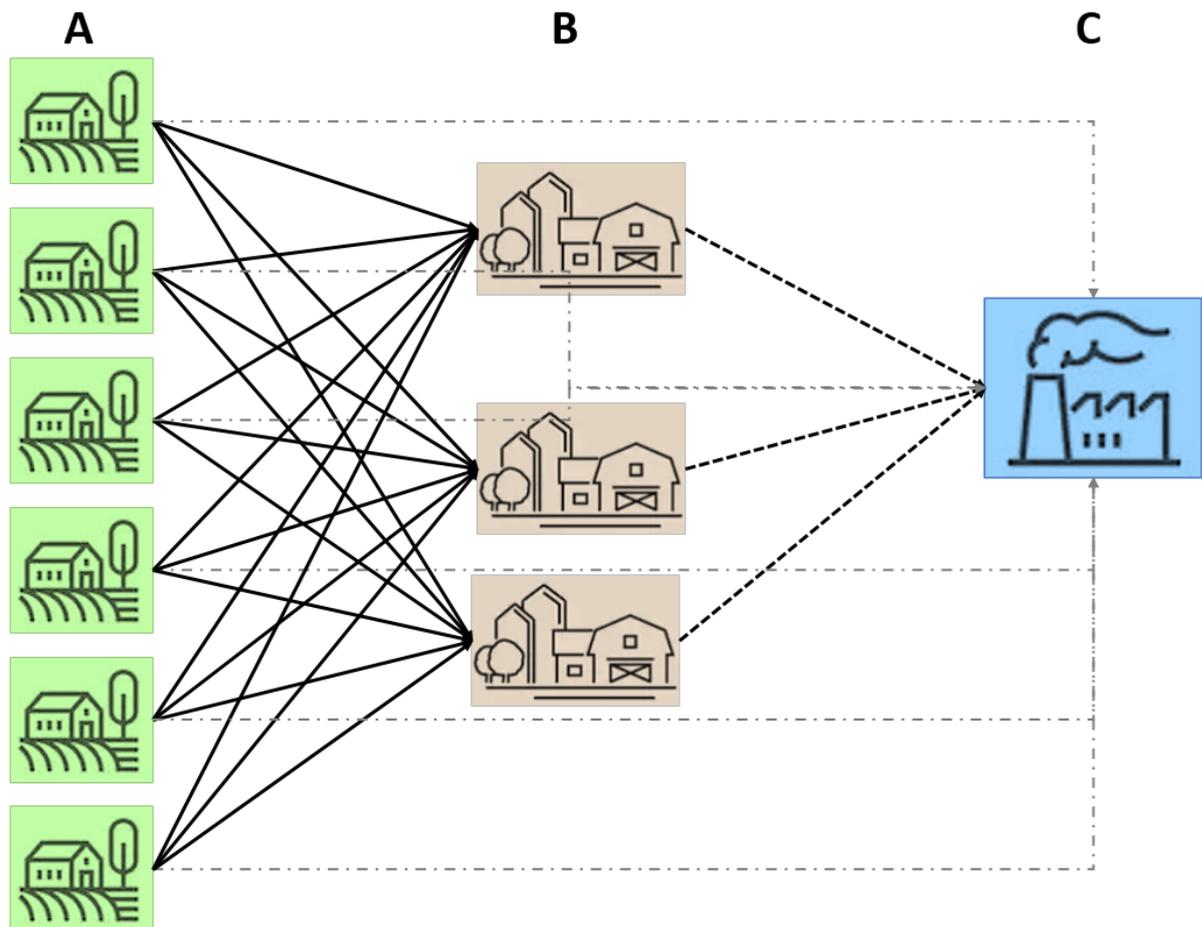


Figura 1. Elos da cadeia de suprimentos de grãos da cooperativa: Propriedades rurais (A), Armazéns (B) e Planta industrial (C)

Na Figura 2 é apresentado em um grafo uma demonstração da complexidade do esquema da rede de distribuição de transporte da cooperativa. Isso porque são 80 entrepostos de originação de grãos de produtores (80 cidades), 41 armazéns de grãos da cooperativa e uma fábrica de esmagamento.

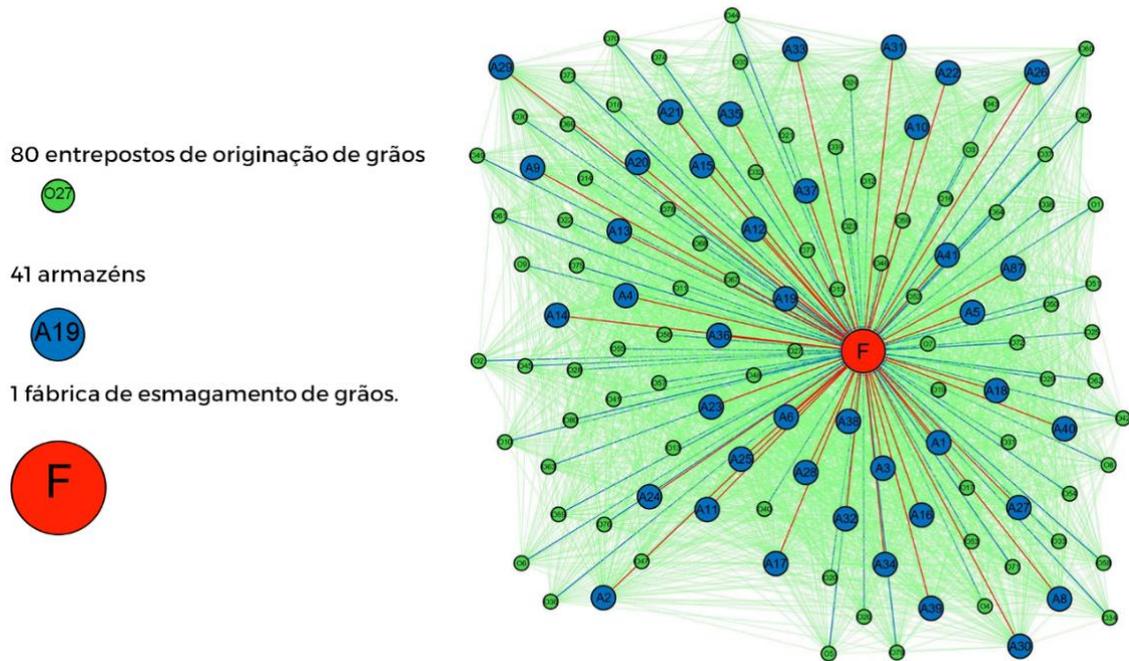


Figura 2. Esquema da rede de transporte de grãos da cooperativa

A colheita dos grãos acontece durante o período de safra, geralmente dura entre três e quatro meses na região de ação da cooperativa. Cada região específica tem um pico de safra de aproximadamente 15 dias, e essa concentração torna a logística da safra complexa, pois existem limitações de capacidade de armazenagem e a cooperativa precisa garantir o abastecimento da fábrica durante todo o ano.

O modelo proposto visa minimizar os custos com transporte e com o estoque de armazenagem dos grãos na cooperativa, por meio da otimização da distribuição da rede de armazenagem e envio para atendimento da demanda da fábrica.

O modelo define as quantidades que devem ser enviadas para os armazéns correspondentes, e as quantidades que devem ser enviadas para a fábrica, a cada período e para todos os entrepostos de origem.

2.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para a modelagem do problema foi usada a Programação Linear Inteira (PLI). A Programação Linear (PL) faz parte do campo de investigação ou Pesquisa Operacional (PO), denominada programação matemática, que também inclui a programação não linear. Tem como objetivo o estudo de operações e sistemas que combinam elementos humanos e materiais, procurando por meio de técnicas quantitativas apoiar a tomada de decisão em níveis macro e microeconômico (CARVALHO, 2014).

Para o modelo proposto foram realizadas as seguintes considerações:

- as localizações e distâncias são conhecidas;
- os volumes enviados para armazenagem e para a fábrica são decisões do modelo;
- o volume originado em cada entreposto é conhecido;
- a capacidade de armazenagem de cada armazém e da fábrica são conhecidos;
- a demanda da fábrica é conhecida;
- para atender a demanda da fábrica podem ser adquiridos grãos de terceiros, que entram diretamente no armazém da fábrica;
- o custo do transporte é composto por um custo relativo a distância percorrida e pelo custo por tonelada transportada, sendo que ambos são conhecidos;
- para a resolução desse modelo, foi considerado um valor médio para o custo relativo a distância percorrida, em razão da disponibilidade de dados;
- o custo do estoque armazenado é conhecido, sendo um percentual em relação ao volume armazenado em cada período;
- foram considerados seis períodos de análise que estão contidos nos períodos de colheita do grão;
- o estoque da fábrica não pode ser menor do que 10.000 toneladas;
- o estoque inicial da fábrica é conhecido e o estoque inicial dos armazéns no início da safra é zero.

O problema da rede de distribuição de armazenagem de grãos pode ser formulado como um modelo de PLIM. Para a formulação matemática do problema foram considerados conjuntos e índices, conforme Quadro 1. As descrições dos parâmetros usados no modelo estão descritas no Quadro 2 e as variáveis utilizadas no modelo estão no Quadro 3.

Quadro 1. Lista de conjuntos e índices do modelo

Símbolo	Descrição
I	Conjunto de todas as unidades de origem
J	Conjunto com todos os armazéns da rede
T	Conjunto de períodos no horizonte de planejamento
i	Índice usado para as unidades de origem
j	Índice usado para referir-se aos armazéns da rede
t	Índice usado para os períodos no horizonte de planejamento

Fonte: Dados da pesquisa.

Quadro 2. Lista de parâmetros do modelo

Símbolo	Descrição
D_{ij}	Distância entre a unidade de origem i e o armazém j
E_j	Distância entre o armazém j para a fábrica
F_i	Distância entre o ponto de origem i para a fábrica
C	Custo por peso transportado
CDO_{ij}	Custo por quilômetro percorrido da origem i ao armazém j
CDA_j	Custo por quilômetro percorrido do armazém j à fábrica
CD_i	Custo por quilômetro percorrido da origem i à fábrica
CE	Custo de manutenção de estoque como porcentagem do valor por período
P	Preço de aquisição da matéria-prima
ε_{j0}	Estoque no armazém j no período 0
W_0	Estoque na fábrica no período 0
V_{i0}	Estoque na origem i no período 0
D_t	Demanda na fábrica no período t
μ_j	Capacidade do armazém j
π	Capacidade de armazenagem na fábrica
M	Um número suficientemente grande

Fonte: Dados da pesquisa.

Quadro 3. Lista de variáveis do modelo

Símbolo	Descrição
X_{ijt}	Volume transportado de i para j no período t
Y_{jt}	Volume transportado de j para a fábrica no período t
Z_{it}	Volume transportado de i para a fábrica no período t
ε_{jt}	Estoque no armazém j no período t
W_t	Estoque na fábrica no período t
V_{it}	Estoque na origem i no período t
TE_t	Volume adquirido de terceiros no período t
α_{ijt}	Variável binária que indica se houve transporte de i para j no período t
β_{jt}	Variável binária que indica se houve transporte do armazém j para a fábrica no período t
γ_{it}	Variável binária que indica se houve transporte da origem i para a fábrica no período t

Fonte: Dados da pesquisa.

2.3 MODELO PROPOSTO

Esta seção descreve o modelo de Programação Linear Inteira Mista proposto. A Eq. (1) corresponde à função objetivo do modelo.

$$\begin{aligned} \min \phi = & \sum_t \sum_i \sum_j X_{ijt} * C + \sum_t \sum_i \sum_j \alpha_{ijt} * D_{ij} * CDO_{ij} + \sum_t \sum_j Y_{jt} * C + \sum_t \sum_j \beta_{jt} \\ & * E_j * CDA_j + \sum_t \sum_i Z_{it} * C + \sum_t \sum_i \gamma_{it} * F_i * CD_i + \sum_t \sum_j \varepsilon_{jt} * P * CE \\ & + \sum_t W_t * P * CE \end{aligned} \quad (1)$$

A função objetivo visa minimizar os custos totais com transporte e com o estoque de armazenagem de grãos. Para calcular o custo do transporte do entreposto de origem para o armazém, multiplica-se o volume transportado pelo custo que é cobrado por tonelada, e é acrescentado o custo fixo cobrado pela distância da origem para o armazém. Para identificar se houve transporte de determinada origem para determinado armazém, é utilizada a variável binária α_{ijt} . Para calcular o custo do transporte do armazém para a fábrica, multiplica-se o volume transportado pelo custo que é cobrado por tonelada, e é acrescentado o custo fixo cobrado pela distância do armazém para a fábrica. Para identificar se houve transporte de determinado armazém para a fábrica, utiliza-se a variável binária β_{jt} . Para calcular o custo do transporte do entreposto de origem para a fábrica, multiplica-se o volume transportado pelo custo que é cobrado por tonelada, e é acrescentado o custo fixo cobrado pela distância do entreposto de origem para a fábrica. Para identificar se houve transporte de determinado entreposto de origem para a fábrica, é utilizada a variável binária γ_{it} .

$$\varepsilon_{jt} = \varepsilon_{j(t-1)} + \sum_i X_{ijt} - Y_{jt}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2)$$

$$W_t = W_{(t-1)} + \sum_j Y_{jt} + \sum_i Z_{it} + TE_t - D_t, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_j X_{ijt} + \sum_i Z_{it} = V_{it}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\varepsilon_{jt} \leq \mu_j, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (5)$$

$$W_t \leq \pi, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$X_{ijt} \leq M\alpha_{ijt}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (7)$$

$$Y_{jt} \leq M\beta_{jt}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8)$$

$$Z_{it} \leq M\gamma_{it}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\varepsilon_{jt} \geq 0, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (10)$$

$$W_t \geq 10.000, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$TE_t \leq 0,1 * D_t, \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$X_{ijt}, Y_{jt}, Z_{it}, TE_t, M \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sigma_{ijt}, \beta_{jt}, \gamma_{it} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (14)$$

A restrição (2) é usada para calcular o estoque de cada armazém em determinado período, sendo esse valor obtido pela adição do volume que o armazém recebeu de todas as origens no período atual ao estoque do período anterior desse armazém, subtraindo o volume que foi transportado dele para a fábrica no período atual.

O estoque da fábrica em determinado período é calculado pela restrição (3), sendo igual ao estoque da fábrica no período anterior, somado ao volume que a fábrica recebeu dos armazéns, das origens e do que foi comprado de terceiros no período atual, subtraindo a demanda da fábrica no período atual.

A restrição (4) garante que o modelo destine toda a originação de cada entreposto para a fábrica ou para algum armazém em determinado período. O volume originado no período de cada entreposto de origem deve ser igual à soma do volume transportado dessa origem para qualquer armazém mais a soma do que foi dessa origem para a fábrica no período em questão.

A restrição (5) garante que o estoque de determinado armazém não exceda sua capacidade em determinado período. A restrição (6) garante que o estoque da fábrica não exceda a capacidade de armazenagem da fábrica em determinado período.

As restrições (7), (8) e (9) determinam se houve ou não transporte de determinada origem para determinado armazém, de determinado armazém para a fábrica e de determinada origem para a fábrica, sucessivamente, através da multiplicação de uma variável de decisão binária por um número suficientemente grande. Sendo o volume transportado menor ou igual a essa multiplicação, se a variável for igual a 1 houve transporte, mas se a variável binária for igual a 0, não houve transporte.

A restrição (10) permite que não haja estoque negativo em determinado armazém em qualquer período e a restrição (11) determina um estoque mínimo de 10.000 toneladas na fábrica para quaisquer períodos. A restrição (12) garante que o volume de grãos adquirido de terceiros não exceda 10% da demanda da fábrica. Finalmente, as restrições (13) e (14) representam o domínio das variáveis.

2.4 COLETA DE DADOS

Para desenvolvimento do estudo, foram coletados dados reais da cooperativa objeto do estudo de caso. Vale ressaltar que existe um compromisso de confidencialidade com a empresa, sendo assim, os dados foram descaracterizados. Assim, foram considerados 80 entrepostos de originação de grãos e 41 armazéns por seis períodos, além de uma fábrica de esmagamento de grãos.

A partir dos dados reais, foi construída uma instância ilustrativa, com o objetivo de validar o modelo matemático proposto. O modelo foi resolvido em 0,34 segundos de processamento computacional com gap de 0,0001%. Foi usada a linguagem de programação Python e o solver Gurobi 9.0.2, em um computador com 8 GB de memória RAM, processador Core Intel i5 e sistema operacional Windows 10.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo respeita todas as restrições, mas não sugere transporte da origem direto para a fábrica e o estoque dos armazéns permanecem zerados em todos os períodos, diferente do que acontece na prática na empresa, porém pode ser uma alternativa para redução de custos da cooperativa.

Tabela 1. Grãos recebidos na fábrica

(i) Período	(ii) Modelo	(iii) Real	(iv) Demanda da fábrica
1	11.737	55.561	14.928
2	77.790	201.667	71.616
3	267.291	167.957	87.503
4	27.785	38.132	84.340
5	1.572	82.343	57.895
6	122	50.835	86.734

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 1 mostra a quantidade de grãos em toneladas (iii) recebida pela fábrica por período (i). O modelo propõe um volume menor de transferência para a fábrica (ii), priorizando armazenar mais próximo da origem a fim de diminuir o custo com transporte. Na prática, é priorizado enviar o máximo possível de grãos direto para a fábrica, com intuito de garantir o abastecimento no período de entressafra, diminuindo a necessidade de armazéns intermediários.

Sendo assim, na prática o custo do estoque de armazenagem acaba sendo maior do que o custo do estoque proposto pelo modelo, conforme apresentado na Figura 3.

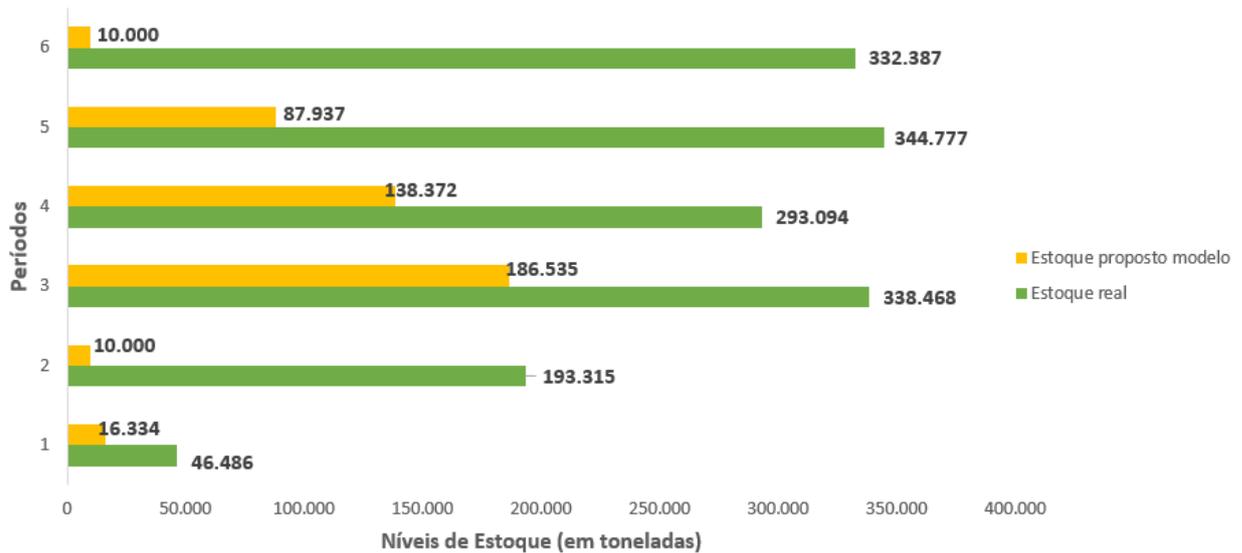


Figura 3. Estoque de armazenagem de grãos na fábrica

Outra diferença relevante entre a proposta do modelo e a prática, é que o modelo propõe a compra de terceiros menos do que acontece na prática, conforme apresentado na Figura 4. Isso se dá porque na prática a empresa precisa aproveitar o período da colheita e adquirir o que for necessário para o abastecimento, pois os grãos da região acabam sendo enviados para exportação pelos terceiros na entressafra. Outro motivo significativo é que na prática os grãos originados em outros Estados acabam sendo vendidos e compensados pela compra de terceiros na região da fábrica para minimizar custos com transporte e com impostos, por atravessar a fronteira interestadual. Além disso, como o modelo não considera períodos futuros, foi necessário limitar a compra de terceiro para 10% da demanda da fábrica, isso porque sem essa restrição, o modelo acaba sugerindo o envio da originação para os armazéns e a aquisição de terceiros para abastecimento da fábrica.

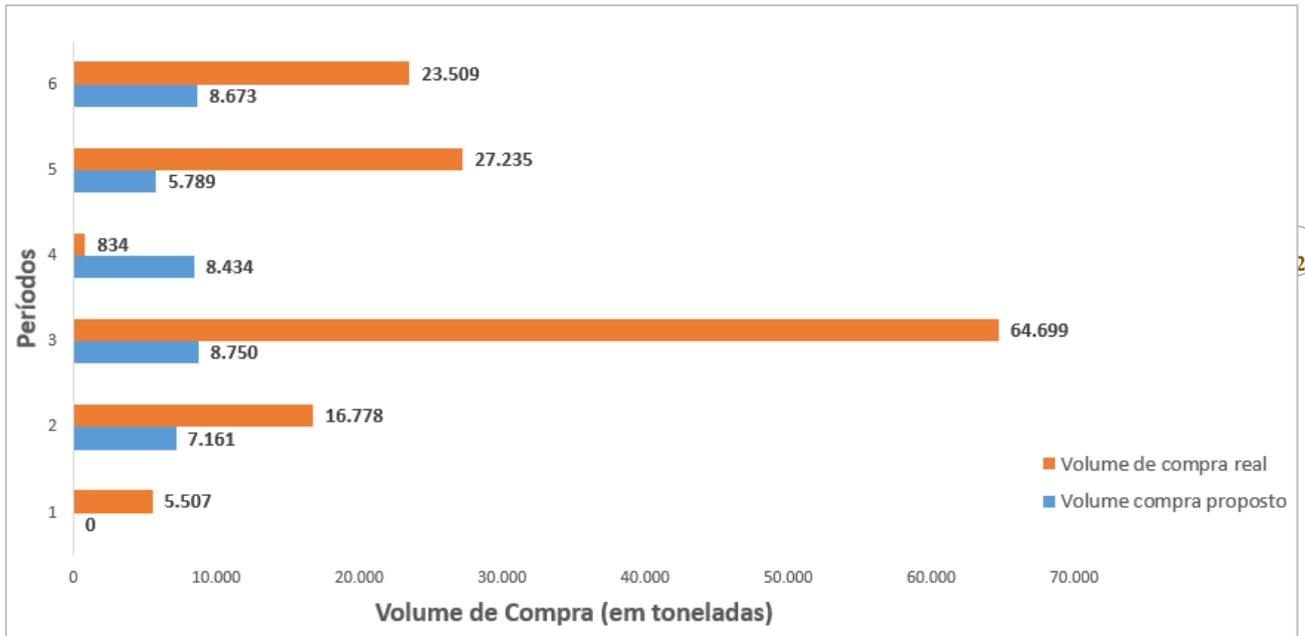


Figura 4. Compra de terceiros

O modelo proposto teve um custo total com transportes e estoques de R\$ 32.647.300,00. Contudo, a rede de transportes atual da cooperativa apresentou custo real de R\$ 32.995.063,00 no período analisado, apontando uma economia de R\$ 347.763,00 caso a solução do modelo seja adotada, o que representa uma economia de 1,1%.

A solução obtida pelo modelo revelou novas estratégias que podem ser adotadas pela cadeia de suprimentos da cooperativa. O modo de trabalho atual da empresa prioriza o envio da origem para os armazéns, pois a demanda na fábrica é relativamente baixa frente ao volume de originação. Isso resulta em estoques mais baixos na fábrica. Por outro lado, a solução do modelo proposto minimiza os custos de transporte levando grande parte dos grãos diretamente para a fábrica, o que acaba minimizando os custos totais da rede de suprimentos. A Figura 5 ilustra as abordagens usadas pela empresa e a solução obtida pelo modelo.

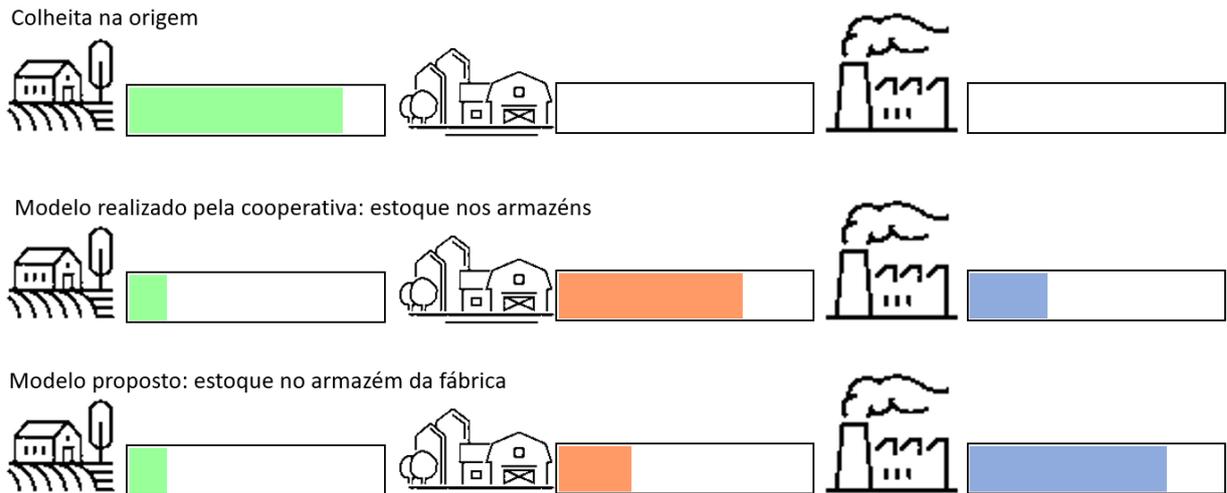


Figura 5. Comparação entre os modelos de estoque

Uma possível desvantagem da abordagem revelada pelo modelo é que o excesso de estoques na fábrica pode gerar um novo gargalo na descarga e secagem dos grãos da fábrica, o que indica a necessidade de aumento da capacidade dessas operações.

O segundo ponto que mostra diferença relevante é a aquisição de grãos de terceiros, isso porque o modelo não considera outros custos. Na prática existem algumas estratégias não consideradas pelo modelo, como vender o estoque regionalmente em locais mais distantes da fábrica e comprar o grão de terceiro perto da fábrica para compensar. Outra estratégia não considerada é que em locais de armazéns fora do Estado, o grão é vendido para evitar impostos interestaduais e são comprados grãos de terceiros mais próximos da fábrica.

O terceiro fator a ser considerado é que o período analisado é em torno do período da colheita dos grãos. Por se tratar de uma cultura sazonal, tudo o que é originado nesse período de colheita deve atender a demanda da fábrica para o ano todo. Isso impacta diretamente no estoque da fábrica e na compra de terceiros. Na prática, a compra de terceiros também se concentra no período da colheita pela disponibilidade do grão no mercado interno. Esse trabalho avaliou apenas o período da colheita em que a disponibilidade de grãos é bem maior do que a demanda da fábrica, porém esse cenário é invertido nos próximos períodos posteriores à colheita.

Ainda considerando a sazonalidade da cultura do grão, que não é considerada no modelo, na prática os armazéns da cooperativa devem estar com estoque zerado do período 6 para o período 7, pelo recebimento da safra de outra cultura de grãos que precisa ser originada e armazenada. Isso não foi informado no modelo e, além disso, foram analisados apenas seis períodos.

O modelo proposto neste artigo busca atender as características operacionais da cooperativa estudada. Por essa razão, o modelo de PLIM incorpora parâmetros, variáveis de

decisão e restrições de uma forma nova na literatura científica. Isso é comum em trabalhos relacionados à otimização de redes de suprimentos de grãos, com diversos artigos propondo modelos para situações específicas e visando à otimização de diferentes funções objetivo sujeitas a variados conjuntos de restrições. Além disso, trabalhos relacionados a este tema também utilizam diferentes técnicas de otimização além da PLIM.

Para ilustrar a variedade existente na literatura, alguns trabalhos podem ser destacados. Por exemplo, Bilgen e Ozkarahan (2007) desenvolveram um modelo de PLIM para otimizar a cadeia de suprimentos de grãos de trigo, considerando carregamentos em portos marítimos e a definição dos navios de transporte. Maiyar *et al.* (2015) trataram a otimização dos custos de transporte de grãos considerando a flexibilidade do modal ferroviário. Mogale *et al.* (2017) desenvolveram um modelo multiperíodo usando programação não linear inteira para otimizar os custos de transporte de grãos na Índia, visando satisfazer regiões deficitárias e incorporando decisões sobre tipos de veículos e demandas sazonais. Maiyar e Thakkar (2017) utilizaram programação não linear inteira e otimização por enxame de partículas para otimizar o transporte de grãos entre pontos de originação e os locais de armazenagem. Trabalhos mais recentes lidaram com a otimização do transporte de grãos visando à minimização das perdas (NOURBAKHSI *et al.*, 2018), incertezas nas quantidades de suprimentos e demandas (HOSSEINI-MOTLAGH; SAMANI; SAADI, 2019), rotação de culturas (MEHRBANFAR; BOZORGI-AMIRI; NASIRI, 2020) e emissão de gases de efeito estufa (DWIVEDI *et al.*, 2020).

Assim, pode-se concluir que o presente trabalho consiste em uma nova abordagem para modelagem do problema de otimização em redes de suprimentos de grãos, com a proposta de novos conjuntos de parâmetros, variáveis de decisão, restrições e função objetivo. A vantagem da diversidade da literatura existente sobre o tema é que há grande quantidade de trabalhos que apresentam abordagens distintas para a otimização no setor de grãos, aumentando a diversidade de opções para consulta por parte de empresas ou cooperativas interessadas em otimizar seus objetivos específicos. Contudo, a desvantagem dessa diversidade é que não há outros trabalhos compatíveis, que possam ser usados como *benchmark* para testar o desempenho de novos modelos. Isso se deve aos diferentes conjuntos de índices, parâmetros e variáveis de decisão, o que impacta na compatibilidade dos dados usados entre modelos diferentes.

O modelo se mostra eficiente e aplicável à medida que propõe uma nova estratégia para a movimentação e armazenagem de grãos da cooperativa que obteve um custo menor se comparado à estratégia aplicado atualmente. Apesar do modelo tratar de um caso específico para a cooperativa objeto do estudo, ele pode ser aplicável para outras cooperativas e demais empresas que possuem um sistema logístico equivalente para diferentes cadeias de grãos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo propor um modelo de programação linear cuja função objetivo busca minimizar os custos com transporte e com o estoque de armazenagem de grãos de uma cooperativa agroindustrial, definindo as quantidades que deveriam ser enviadas entre os 80 entrepostos, 41 armazéns e a fábrica que compõem a rede logística da cooperativa. Assim, o trabalho conseguiu propor um modelo que, dentro dos parâmetros colocados, conseguiu minimizar custos com transporte e com estoque de armazenagem. É conhecido que a logística da safra de grãos é um grande gargalo no Brasil, e esse trabalho auxilia a tomada de decisão dentro desse tema de forma planejada, sendo que esse modelo pode ser usado para o planejamento antecipado da logística da safra antes e durante o período da colheita.

O modelo proposto atendeu ao objetivo de minimizar os custos com transporte e armazenagem de grãos, sendo testado com uma instância de dados reais. Foram simulados seis períodos, os quais respeitaram todas as restrições propostas. Ele apresentou algumas estratégias factíveis e diferentes das adotadas pela cooperativa, como a redução do volume transferido para a fábrica priorizando o armazenamento dos grãos mais próximos de sua origem. Assim, o custo de transporte e armazenagem do modelo no período analisado foi significativamente menor que o custo real no mesmo período.

Porém, é preciso ressaltar que foi utilizado um custo médio geral por quilômetro percorrido, não sendo consideradas possíveis diferenças de custos para diferentes trechos, que podem ocorrer por fatores como pedágio. Ainda, por se tratar de uma cultura sazonal, os seis períodos analisados não refletem todo o período da cultura, assim sendo, o volume originado de grãos deve não só atender a demanda da fábrica no período analisado, mas sim até a próxima safra, assim este trabalho pode não ser o suficiente para validar o modelo proposto. Outra questão não considerada por esse modelo e que deve ser apontada para que ele seja validado é que ao final do período analisado os estoques dos armazéns deverão estar zerados para receber a cultura complementar que ocorre no inverno.

Por fim, sugere-se a realização de trabalhos futuros que se considerem valores reais de custo pela distância percorrida, junto com os demais custos que podem afetar a rede de distribuição e não foram abordados neste trabalho, além da avaliação de maior número de períodos, de forma que a sazonalidade da originação seja considerada e que a necessidade de liberação dos armazéns para as próximas culturas também seja incluída. Ainda se sugere abordar questões de sustentabilidade dentro deste tema, como minimizar o impacto ambiental do transporte e da armazenagem dos grãos.

REFERÊNCIAS

AHUMADA, O.; VILLALOBOS, R. Application of Planning Models in the Agri-Food Supply Chain: A Review. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 1, p. 1–20, jul. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>.

ALBORNOZ, V. M.; URRUTIA-GUTIÉRREZ, C. A Mixed-Integer Linear Optimization Model for a Two-Echelon Agribusiness Supply Chain. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, v. 69, p. 253–260, ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.07.033>.

BEHZADI, G.; O’SULLIVAN, M. J.; OLSEN, T. L.; ZHANG, A. Agribusiness Supply Chain Risk Management: a review of quantitative decision models. **Omega**, v. 79, p. 21–42, set. 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.005>.

BILGEN, B.; OZKARAHAN, I. A Mixed-Integer Linear Programming Model for Bulk Grain Blending and Shipping. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 2, p. 555–571, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.008>.

BOTTANI, E.; MURINO, T.; SCHIAVO, M.; AKKERMAN, R. Resilient Food Supply Chain Design: Modelling Framework and Metaheuristic Solution Approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 135, p. 177–198, set. 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.011>.

CAIXETA-FILHO, J. V. **Pesquisa operacional**: técnicas de otimização aplicadas à sistemas agroindustriais. São Paulo: Atlas, 2004.

CARVALHO, J. M. S. **Programação Linear**: algoritmos simples primal, dual, transporte e afetação. Porto: Vida Económica, 2014. 112 p.

CORADI, P. C.; BOFF DE OLIVEIRA, M.; CARNEIRO, L. O.; SOUZA, G. A. C.; ELIAS, M. C.; BRACKMANN, A.; TEODORO, P. E. Technological and sustainable strategies for reducing losses and maintaining the quality of soybean grains in real production scale storage units. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, p. 101624, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101624>.

DANI, S.; DEEP, A. Fragile Food Supply Chains: Reacting to Risks. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 13, n. 5, p. 395–410, out. 2010, DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2010.518564>.

DWIVEDI, A.; JHA, A.; PRAJAPATI, D.; SREENU, N.; PRATAP, S. Meta-heuristic algorithms for solving the sustainable agro-food grain supply chain network design problem. **Modern Supply Chain Research and Applications**, v. 2, n. 3, p. 161–177, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/MS CRA-04-2020-0007>.

GHOLAMI-ZANJANI, S. M.; KLIBI, W.; JABALAMELI, S.; PISHVAEE, M. S. The Design of Resilient Food Supply Chain Networks Prone to Epidemic Disruptions. **International Journal of Production Economics**, v. 233, p. 108001, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.108001>

HENSON, S.; REARDON, T. Private agri-food standards: Implications for food policy and the agri-food system. **Food Policy**, v. 30, p. 241–253, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2005.05.002>.

HIGGINS, A.; MILLER, C. J.; ARCHER, A. A.; TON, T.; FLETCHER, C.; MCALLISTER, R. Challenges of Operations Research Practice in Agricultural Value Chains. **Journal of the Operational Research Society**, v. 61, n. 6, p. 964–973, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.57>.

HOSSEINI-MOTLAGH, SM.; SAMANI, M.R.G.; ABBASI SAADI, F. Strategic optimization of wheat supply chain network under uncertainty: a real case study. **Operational Research**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00515-y>.

JONKMAN, J.; BARBOSA-PÓVOA, A. P.; BLOEMHOF, J. Integrating Harvesting Decisions in the Design of Agro-Food Supply Chains. **European Journal of Operational Research**, v. 276, n. 1, p. 247–258, jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.024>.

JOUZDANI, J.; KANNAN, G. On the Sustainable Perishable Food Supply Chain Network Design: A Dairy Products Case to Achieve Sustainable Development Goals. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123060, jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123060>.

JUNQUEIRA, R. A. R.; MORABITO, R. Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho. **Production**, v. 16, n. 3, p. 510–525, dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132006000300012>.

MAIYAR, M. L.; THAKKAR, J. J. A combined tactical and operational deterministic food grain transportation model: Particle swarm based optimization approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 110, p. 30-42, ago. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.023>.

MAIYAR, M. L.; THAKKAR, J.J.; AWASTHI, A.; TIWARI, M. K. Development of an Effective Cost Minimization Model for Food Grain Shipments. **IFAC-Papers On Line**, v. 48, 3, p. 881-886, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.194>.

MATOPOULOS, A.; VLACHOPOLOU, M.; MANTHOU, V. A conceptual framework for supply chain collaboration: empirical evidence from the agri-food industry. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 12, n. 3, p. 177-186, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1108/13598540710742491>.

MEHRBANFAR, M.; AMIRI, A. B.; NASIRI, M. M. A Mathematical Programming Model for Sustainable Agricultural Supply Chain Network Design Under Uncertainty. **Journal of Quality Engineering and Production Optimization**, v. 5, n. 1, p. 189-220, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22070/JQEPO.2020.5666.1164>.

MOGALE, D.G.; DOLGUI, A.; KANDHWAY, R.; KUMAR, S.K.; TIWARI, M.K., A multi-period inventory transportation model for tactical planning of food grain supply chain,

Computers & Industrial Engineering, 2017. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.008>

NEMATOLLAHI, M., TAJBAKSH, A. Past, Present, and Prospective Themes of Sustainable Agricultural Supply Chains: A Content Analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 122201, out. 2020. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122201>.

NOURBAKSH, S. M.; BAI, Y.; MAIA, G. D. N.; OUYANG, Y.; RODRIGUEZ, L. Grain Supply Chain Network Design and Logistics Planning for Reducing Post-Harvest Loss. **Biosystem Engineering**, v. 151, n. 216, p. 105-115. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.011>

ONGGO, B. S.; PANADERO, J.; GORLU, C. G.; JUAN, A. A. Agri-Food Supply Chains with Stochastic Demands: A Multi-Period Inventory Routing Problem with Perishable Products. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 97, p. 101970, dez. 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101970>.

PACHECO, J. V. A.; MORABITO, R. Otimização de fluxos em rede na gestão financeira do caixa: aplicação em uma empresa agroindustrial. **Production**, v. 20, n. 2, p. 251–264, abr. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132010005000019>.

PLÀ, L. M.; SANDARS, D. L.; HIGGINS, A. J. A Perspective on Operational Research Prospects for Agriculture. **Journal of the Operational Research Society**, v. 65, n. 7, p. 1078–1089, jul. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.2013.45>.

PRETTY, J.; TOULMIN, C.; WILLIAMS, S. Sustainable Intensification in African Agriculture. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 9, n. 1, p. 5–24, fev. 2011. DOI: <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0583>.

SEARCHINGER, T.; WAITE, R.; HANSON, C.; RANGANATHAN, J.; DUMAS, P.; MATTHEWS, E. **Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050**. World Resource Institute, 2019. Open WorldCat, DOI: https://wrr-food.wri.org/sites/default/files/2019-07/WRR_Food_Full_Report_0.pdf.

SYAHRUDDIN, N.; KALCHSCHMIDT, M. Sustainable supply chain management in the agricultural sector: a literature review. **International Journal of Engineering Management and Economics**, v. 3, n. 3, p. 237-258, 2012. DOI:
<https://EconPapers.repec.org/RePEc:ids:ijemec:v:3:y:2012:i:3:p:237-258>.