

Caderno Pedagógico

License

Autores que publicam nesta revista concordam com os seguintes termos:

- a. Autores mantêm os direitos autorais e concedem à revista o direito de primeira publicação, com o trabalho simultaneamente licenciado sob a [Licença Creative Commons Attribution](#) que permite o compartilhamento do trabalho com reconhecimento da autoria e publicação inicial nesta revista.
- b. Autores têm autorização para assumir contratos adicionais separadamente, para distribuição não-exclusiva da versão do trabalho publicada nesta revista (ex.: publicar em repositório institucional ou como capítulo de livro), com reconhecimento de autoria e publicação inicial nesta revista.
- c. Autores têm permissão e são estimulados a publicar e distribuir seu trabalho online (ex.: em repositórios institucionais ou na sua página pessoal) a qualquer ponto antes ou durante o processo editorial, já que isso pode gerar alterações produtivas, bem como aumentar o impacto e a citação do trabalho publicado (Veja [O Efeito do Acesso Livre](#)).

Fonte: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/3525>. Acesso em: 27 ago. 2024.

Referência

ROSA, Artur Guerra et al. Revisão sistemática de modelos matemáticos para o planejamento operacional de produção de atividades agrícolas. **Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n. 3, p. e3525, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n3-242>. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/3525>. Acesso em: 27 ago. 2024.

Revisão sistemática de modelos matemáticos para o planejamento operacional de produção de atividades agrícolas

Systematic review of mathematical models for the operational planning of the production of agricultural activities

Revisión sistemática de modelos matemáticos para la planeación operativa de la producción de actividades agropecuarias

DOI: 10.54033/cadpedv21n3-242

Originals received: 02/23/2024

Acceptance for publication: 03/15/2024

Artur Guerra Rosa

Mestrando em Agronegócio

Instituição: Universidade de Brasília (UNB)

Endereço: Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF,
CEP: 70910-900

E-mail: arturguerra921@hotmail.com

Silvia Araújo dos Reis

Doutora em Engenharia de Produção

Instituição: Universidade de Brasília (UNB)

Endereço: Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF,
CEP: 70910-900

E-mail: silviareis@unb.br

Fabricio Oliveira Leitão

Doutor em Transportes

Instituição: Universidade de Brasília (UNB)

Endereço: Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF,
CEP: 70910-900

E-mail: fabricioleitoadm@unb.br

Andréia Alves Rosa

Mestre em Agronegócio

Instituição: Universidade de Brasília (UNB)

Endereço: Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF,
CEP: 70910-900

E-mail: arrosalves@gmail.com

RESUMO

O planejamento operacional na agricultura é vital para traduzir estratégias em ações de curto prazo, otimizando a alocação de recursos e auxiliando no processo de tomada de decisão. A gestão eficaz inclui o uso de modelos matemáticos para enfrentar desafios como alocação de mão de obra, cronograma de plantio e outras atividades. Neste ramo, existe uma lacuna de um levantamento dos modelos utilizados no planejamento operacional de produção, o que possibilitaria o reaproveitamento de equações e inspiração para modelagens mais avançadas. O presente estudo teve como objetivo identificar os trabalhos mais relevantes na área, identificando as práticas matemáticas mais utilizadas e quais suas funções para atender as demandas dos interessados. Foi utilizada uma revisão sistemática para a seleção dos artigos, que posteriormente foram codificados e discutidos sobre suas particularidades e relações com seus respectivos temas. Os trabalhos selecionados foram de diversas áreas, focando nas áreas de logística, agendamento do uso de maquinário e planejamentos intrínsecos ao trabalho, como culturas na área agrícola. Os principais modelos utilizados foram lineares, mistos inteiros e heurísticas, com algumas vertentes de outras metodologias, como algoritmos específicos de economia que não se encaixam nestas classificações. O levantamento realizado evidenciou que uma variedade de técnicas de programação pode ser empregada para abordar problemas similares, possibilitando a seleção ou integração de diferentes equações e métodos para resolver novas demandas específicas no contexto do planejamento operacional na produção de atividades agrícolas. Essa flexibilidade na escolha e combinação de abordagens oferece uma ampla gama de opções para enfrentar desafios e otimizar processos nesse campo.

Palavras-chave: Logística. Linear. MIP. Heurísticas. Tomada de Decisão.

ABSTRACT

Operational planning in agriculture is vital to translate strategies into short-term actions, optimizing resource allocation and assisting in the decision-making process. Effective management includes using mathematical models to address challenges such as labor allocation, planting schedules, and other activities. In this branch, there is a gap in a survey of the models used in the operational planning of production, which would make possible the reuse of equations and inspiration for more advanced modeling. The present study aimed to identify the most relevant works in the area, identifying the most used mathematical practices and what their functions are to meet the demands of the interested parties. A systematic review was used for the selection of the articles, which were later codified and discussed about their particularities and relations with their respective themes. The works selected were from several areas, focusing on the areas of logistics, scheduling the use of machinery and planning intrinsic to the work, such as crops in the agricultural area. The main models used were linear, mixed integer and heuristic, with some strands of other methodologies, such as specific algorithms of economics that do not fit these classifications. The survey showed that a variety of programming techniques can be employed to address similar problems, allowing the selection or integration of different equations and methods to solve new specific demands in the context of operational planning in

the production of agricultural activities. This flexibility in the choice and combination of approaches offers a wide range of options for facing challenges and optimizing processes in this field.

Keywords: Logistics. Linear. MIP. Heuristics. Decision Making.

RESUMEN

La planificación operativa en la agricultura es vital para traducir las estrategias en acciones a corto plazo, optimizando la asignación de recursos y ayudando en el proceso de toma de decisiones. El manejo efectivo incluye el uso de modelos matemáticos para abordar desafíos como la asignación de mano de obra, los horarios de siembra y otras actividades. En esta rama, existe una brecha en una encuesta de los modelos utilizados en la planeación operativa de la producción, lo que posibilitaría la reutilización de ecuaciones e inspiración para la modelación más avanzada. El presente estudio tuvo como objetivo identificar los trabajos más relevantes en el área, identificando las prácticas matemáticas más utilizadas y cuáles son sus funciones para satisfacer las demandas de los interesados. Para la selección de los artículos se utilizó una revisión sistemática, que posteriormente fue codificada y discutida sobre sus particularidades y relaciones con sus respectivos temas. Los trabajos seleccionados fueron de varias áreas, centrándose en las áreas de logística, programación del uso de maquinaria y planificación intrínseca al trabajo, como cultivos en el área agrícola. Los principales modelos utilizados fueron lineales, enteros mixtos y heurísticos, con algunas hebras de otras metodologías, como algoritmos específicos de economía que no se ajustan a estas clasificaciones. La encuesta mostró que se puede emplear una variedad de técnicas de programación para abordar problemas similares, lo que permite la selección o integración de diferentes ecuaciones y métodos para resolver nuevas demandas específicas en el contexto de la planificación operativa en la producción de actividades agrícolas. Esta flexibilidad en la elección y combinación de enfoques ofrece una amplia gama de opciones para enfrentar desafíos y optimizar procesos en este campo.

Palavras chave: Logística. Lineal. MIP. Heurística. Toma de Decisiones.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento operacional na agricultura desempenha um papel crucial na gestão das atividades agrícolas, se concentrando em traduzir as estratégias de médio e longo prazo em ações concretas e detalhadas no curto prazo. Envolve a elaboração de planos específicos para cada estação do ano, ciclo de cultivo ou atividade agrícola, com o objetivo de otimizar a alocação de recursos,

como mão de obra, máquinas, insumos e capital (Bochtis, Sorensen e Kateris, 2018).

A gestão eficaz das operações e atividades em diversos sistemas produtivos requer um processo fundamental conhecido como planejamento de produção, ou production scheduling. Este processo desempenha um papel central na organização e otimização das atividades e cargas de trabalho em ambientes de produção, reduzindo o tempo e os custos de produção, garantindo a máxima eficiência na determinação do que, quando e onde as tarefas devem ser executadas. Para atingir esse objetivo, uma ampla gama de métodos, desde os mais básicos até os mais avançados, é utilizada para enfrentar desafios complexos relacionados à alocação de maquinários, à gestão das culturas e ao agendamento preciso das atividades em diferentes janelas de tempo (Lopez e Roubellat, 2013).

Dentre as ferramentas que conseguem ajudar nestes problemas, estão os modelos matemáticos de apoio à decisão, que podem ser particularmente valiosos em um cenário agrícola em constante evolução. Esses modelos podem incorporar informações sobre as mudanças climáticas e suas projeções, permitindo aos agricultores adaptarem suas estratégias de plantio e colheita em cada área com base em cenários futuros de temperatura, precipitação e até mesmo mão de obra disponível. Em um contexto financeiro, a integração de dados de mercado em modelos matemáticos pode ajudar os agricultores a determinarem o momento ideal para vender seus produtos, levando em consideração as flutuações de preços e a demanda do mercado (Gilli e Schumann, 2012; Osaki e Batalha, 2014).

As possibilidades são variadas, mas o uso de modelagem resulta em decisões mais informadas que não apenas aumentam a eficiência, mas também contribuem para a sustentabilidade a longo prazo da agricultura. A capacidade de adaptar-se rapidamente às mudanças nas demandas do produtor e de tomar decisões fundamentadas é essencial para o sucesso na agricultura moderna, e, nestes casos, os modelos matemáticos são a ferramenta ideal para auxiliar neste processo (Ahumada *et al.*, 2023).

No entanto, a modelagem matemática exige conhecimento avançado e específico para que consiga representar corretamente e eficientemente as dificuldades e casos propostos, de forma quantitativa que os computadores entendam. Neste processo de modelagem, problemas complexos são traduzidos em equações, restrições e variáveis que podem ser manipuladas e resolvidas e interpretadas por algoritmos e solvers de otimização. A escolha das abordagens de modelagem, tipo de modelos (heurísticas, lineares, não-lineares, mistos), solvers e linguagens é essencial para determinar a eficácia na resolução de problemas específicos, pois se forem escolhidos erroneamente, o modelo pode demorar semanas ou meses para encontrar a solução, inviabilizando sua eficácia (Floudas e Lin, 2005; Neth e Gigerenzer, 2015).

Nesse contexto, a compreensão da modelagem matemática e das diversas técnicas associadas a ela assume um papel de suma importância na resolução dos desafios enfrentados no âmbito agrícola. Isso se deve ao fato de que esse setor é caracterizado por uma série de dificuldades e variáveis em constante mutação, influenciadas pelo clima, pelas flutuações do mercado e diversos outros. Portanto, a aplicação correta das técnicas de modelagem matemática proporciona uma ferramenta valiosa para enfrentar essas complexidades e para otimizar as operações agrícolas (Ahumada *et al.*, 2023).

Além disso, é fundamental compreender que o desenvolvimento de um modelo é uma atividade criativa e singular, na qual diferentes abordagens podem ser empregadas para alcançar a mesma solução, utilizando metodologias completamente diferentes. Portanto, é de suma importância buscar técnicas e formas de modelagem de trabalhos semelhantes, compreendendo o estado atual das pesquisas e buscando inspiração, mesmo em áreas distintas (Ahumada e Villalobos, 2009). A área não precisa ser exatamente a mesma porque as equações e métodos de outros campos podem servir como fonte de inspiração para a criação de abordagens inovadoras, o importante é como a restrição alcançou seu objetivo (Fowler, 1997).

Para identificar essas fontes de inspiração, é fundamental conduzir uma revisão sistemática sobre o tema, identificando trabalhos da área que tenham realizado a modelagem ou aplicado técnicas de otimização para o planejamento

de produção (Lacey, Matheson e Jesson, 2011). Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a busca de insights valiosos e inspiração de diversas fontes através de uma revisão sistemática para solucionar problemas operacionais de agendamento de atividades agrícolas que foram modelados matematicamente.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PLANEJAMENTO DE ATIVIDADES AGRÍCOLAS

O planejamento operacional na agricultura está inserido em um ciclo mais amplo de planejamento agrícola que abrange três níveis distintos, cada um com suas próprias metas, prazos e escopos específicos. Esses níveis de planejamento estão interconectados e influenciam uns aos outros de maneira significativa, formando o ciclo de planejamento agrícola, o qual é projetado para ajudar os agricultores e gestores agrícolas a tomar decisões informadas e estruturadas ao longo do tempo (Ahumada e Villalobos, 2009). Estes ciclos podem ser divididos em três níveis principais de planejamento:

Planejamento Estratégico: é o nível mais alto do ciclo de planejamento agrícola e se concentra em metas de longo prazo, geralmente abrangendo um horizonte de cinco a dez anos ou até mais. Neste estágio, os agricultores e gestores agrícolas definem a direção estratégica da fazenda ou operação agrícola, estabelecendo sua visão, missão e valores fundamentais; juntamente com a direção, devem ser pesquisados fatores externos e internos que afetam a fazenda, como tendências de mercado, mudanças climáticas, regulamentações governamentais e recursos disponíveis (Peart e Shoup, 2004).

Com base nessa análise, são desenvolvidas estratégias gerais para atingir os principais objetivos de longo prazo, podendo incluir a diversificação de culturas, a expansão dos negócios, a entrada em novos mercados, a adoção de tecnologias inovadoras e a definição de metas financeiras e de crescimento, fornecendo uma visão abrangente do futuro desejado e estabelecendo o quadro para a tomada de decisões táticas e operacionais (Olson, 2004).

Planejamento Tático: é o segundo nível do ciclo de planejamento agrícola e representa uma etapa intermediária entre o planejamento estratégico (de longo prazo) e o planejamento operacional (de curto prazo). Ele normalmente abrange um período de um a três anos e tem como objetivo traduzir as metas e estratégias de longo prazo em ações mais concretas e específicas; os objetivos são mais detalhados e focados na implementação quando comparados com a fase estratégica. Exemplos de decisões tomadas neste nível incluem: a escolha das culturas a serem plantadas, analisando dados atualizados de previsões climáticas e as demandas do mercado alvo; a alocação de recursos financeiros para diferentes atividades, sendo distribuídos de acordo com as prioridades estabelecidas e as atividades planejadas, visando maximizar a eficiência e a produtividade; seleção das práticas agrícolas específicas que serão utilizadas, com decisões sobre maquinário, insumos e mão de obra especializada (Ahumada, Rene Villalobos e Nicholas Mason, 2012).

O planejamento tático também envolve a análise de riscos e a elaboração de estratégias para lidar com eventos imprevistos que possam afetar as operações agrícolas, como condições climáticas adversas ou flutuações de mercado. Ele é flexível o suficiente para permitir ajustes conforme as circunstâncias mudam ao longo do período de planejamento; por exemplo, se uma praga de insetos recente ameaça uma cultura específica que está planejada, os agricultores podem ajustar suas táticas de manejo de pragas ou realocar recursos para minimizar o impacto, podendo até mesmo escolher outra cultura (Ahumada *et al.*, 2023).

Planejamento Operacional: é o último nível de planejamento, sendo a etapa mais prática e imediata do ciclo. Envolve a tradução das metas planejamento tático em ações específicas e detalhadas que ocorrem no dia a dia da fazenda; costumam cobrir um período de semanas, podendo chegar à meses e anos em certas atividades. Aqui, os agricultores definem como, quando e onde as atividades agrícolas serão realizadas, incluindo decisões detalhadas sobre plantio, irrigação, uso de insumos, colheita e gestão da força de trabalho. A alocação eficiente de recursos, incluindo tempo, dinheiro e equipamentos, é

fundamental nesta fase, pois caso sejam feitos de forma insatisfatória podem diminuir os benefícios que os planejamentos táticos e estratégicos puderam proporcionar; isso não significa que as decisões são imutáveis, ao contrário, elas devem ser adaptadas para a situação no momento de execução, muitas vezes utilizando outras ferramentas de apoio à tomada de decisão (Bochtis, Sorensen e Kateris, 2018).

Juntos, todos os níveis de planejamento fornecem uma estrutura abrangente que auxilia na gestão eficaz de recursos, na mitigação de riscos, na adaptação a mudanças e na busca da sustentabilidade agrícola. Essa abordagem assegura que as estratégias de longo prazo se traduzam em ações práticas no campo, promovendo o sucesso geral das operações agrícolas, aumentando a resiliência e a eficiência, além de poder contribuir para a sustentabilidade em um ambiente agrícola em constante mudança (Borodin *et al.*, 2016).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo empregou uma revisão sistemática da literatura, seguindo o procedimento metodológico proposto por Cronin, Ryan e Coughlan (2008), com o objetivo de identificar o estado atual da arte das possíveis soluções para desafios relacionados ao planejamento de produção agrícola. Dos trabalhos selecionados será realizada a coleta de informações sobre a área de aplicação, a natureza da função objetivo, a classificação, a complexidade e a linguagem em que os modelos dos estudos utilizaram.

De acordo com o protocolo estabelecido por Cronin, Ryan e Coughlan (2008), para a revisão sistemática, as etapas podem ser descritas da seguinte maneira: (a) formulação da pergunta de pesquisa; (b) desenvolvimento de uma estratégia de pesquisa e definição de critérios de inclusão e exclusão; (c) seleção e obtenção de literatura relevante; (d) avaliação da qualidade dos estudos incluídos na revisão; e (e) análise, síntese e disseminação dos resultados.

As etapas do protocolo da revisão sistemática da literatura foram abordadas da seguinte forma para alcançar o objetivo deste trabalho:

- a) **Formulação da questão de pesquisa:** Quais problemas operacionais de agendamento de atividades agrícolas que foram modelados e como foram solucionados?
- b) **Estratégia de pesquisa e estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão:** Para abranger todo tema proposto de forma clara, a estratégia de busca de palavras-chave foi dividida em três partes para melhor entendimento, que serão unidas posteriormente na busca das bases:
 1. Para a primeira parte da busca, foram selecionadas as seguintes palavras-chave: *scheduling, production, task, allocation, resource* e *algorithm*. Essas palavras-chave foram combinadas de várias maneiras usando o operador "OR", permitindo abranger uma ampla gama de estudos relacionados à programação de produção e relacionados (Lopez e Roubellat, 2013).
 2. Para a segunda parte da estratégia de busca, foi escolhida a palavra-chave *operational*, que se refere ao nível estratégico em que os modelos devem estar localizados. Como este termo é bem estabelecido na literatura, não foram consideradas outras combinações, uma vez que os trabalhos focados neste tema já estarão utilizando esta palavra (Ahumada e Villalobos, 2011).
 3. Na última parte da busca, foram selecionadas as palavras-chave relacionadas a soluções voltadas para produtores ou interessados finais, incluindo: *producer, farmer, holder*. Novamente, essas palavras-chave foram combinadas usando o operador "OR" para garantir que não fossem excluídos trabalhos que se aproximam do tema de forma ligeiramente diferente (Bettany-Saltikov, 2016).
- c) **Seleção e acesso de literatura:** As bases de artigos utilizadas foram a Scopus e Web of Science (Clarivate), por serem uma ampla e confiável fonte de informações acadêmicas abrangentes e de alta qualidade, além de possuírem ferramentas avançadas de busca, com filtros e operadores

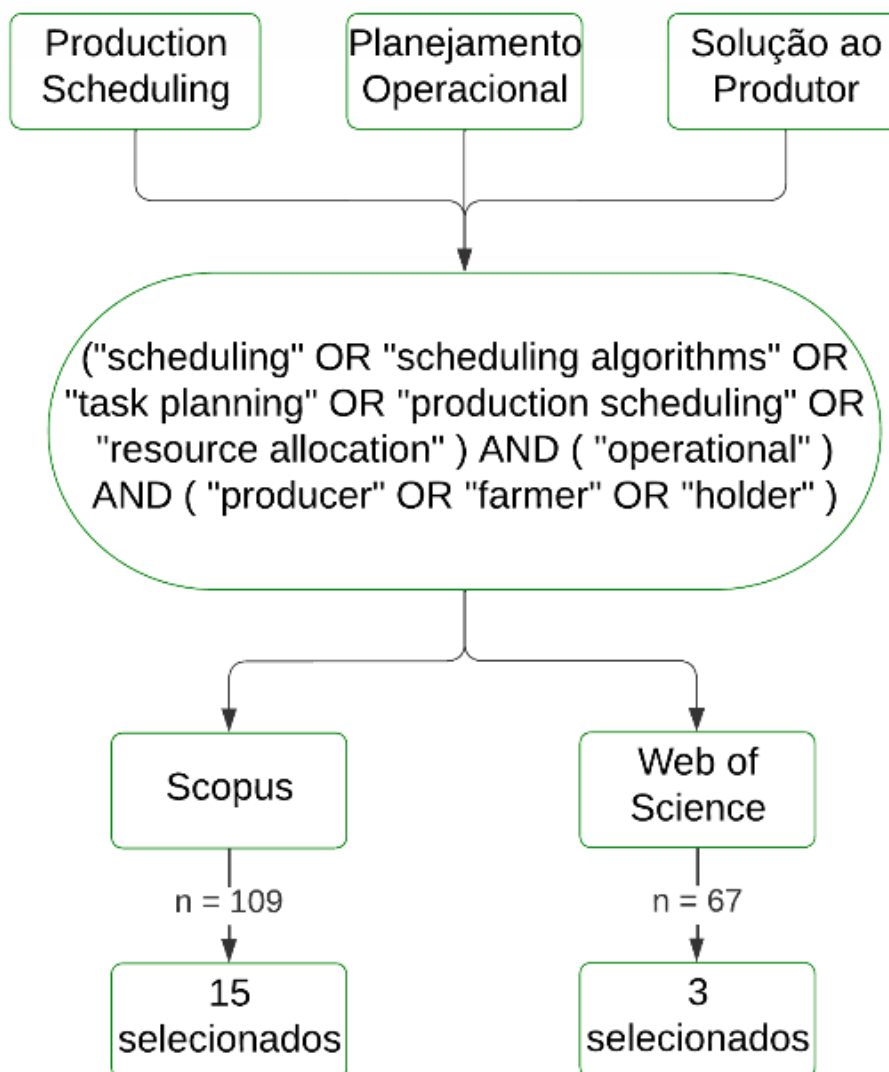
lógicos específicos que permitem identificar os artigos mais pertinentes na revisão.

Com todas as considerações e metodologias citadas, os termos da busca avançada na plataforma ficaram da seguinte forma: TITLE-ABS-KEY (("scheduling" OR "scheduling algorithms" OR "task planning" OR "production scheduling" OR "resource allocation") AND ("operational") AND ("producer" OR "farmer" OR "holder")). Também foram selecionados apenas artigos, excluindo capítulos de livro, trabalhos de congressos e relacionados.

d) **Avaliação da qualidade da literatura incluída na revisão:** Na busca inicial foram retornados 109 na Scopus, 67 na Web of Science. Foram lidos os títulos e abstracts de cada um dos artigos encontrados, assim mantendo apenas aqueles pertinentes ao tema proposto.

Os artigos removidos faziam parte de desenvolvimento de produto ou eram de temas completamente diferentes, como análises matemáticas de dimensões físicas de produtos, ou realizaram trabalhos não relacionados com otimização, desta forma não se encaixando no eixo temático proposto. Após essa filtragem, 18 trabalhos pertinentes à pergunta de pesquisa foram encontrados, sem duplicados, sendo mostrada na Figura 1 a esquematização de todo este processo separado por cada base.

Figura 1 – Ilustração do processo de escolha dos artigos da revisão sistemática.



Fonte: elaborado pelos autores

Adicionalmente, foi conduzida uma revisão narrativa na base Science Direct com o intuito de complementar e enriquecer o referencial teórico do estudo. Essa abordagem possibilitou a identificação e análise de artigos relevantes que, embora não tenham se encaixado nos critérios estritos da revisão sistemática, contribuíram significativamente para uma compreensão mais abrangente do tópico em questão, conforme sugerem (Lacey, Matheson e Jesson, 2011). Como resultado desse processo, quatro artigos foram

selecionados com base em sua relevância, fornecendo insights valiosos que complementaram e enriqueceram o quadro conceitual do estudo.

e) **Análise, síntese e disseminação dos resultados:** Com os 22 artigos finais, foram realizadas três tabelas que detalham o título, autores, revistas, citações, ano, objetivo principal e as características técnicas dos modelos matemáticos utilizados: natureza, função objetivo, classificação, solver e linguagem. Também será apresentada uma análise de coocorrência com todas as palavras chaves, possibilitando uma visão agrupada dos temas que foram encontrados.

Com o intuito de facilitar a compreensão e categorização dos artigos selecionados, elaborou-se um quadro de classificação contendo combinações de números e letras (Tabela 1). Essa estratégia é adaptada de Amui et al. (2017), que propôs a estrutura e possibilitou a organização eficiente desses materiais.

Tabela 1. Classificação e códigos dos artigos selecionados na revisão.

Classificação		Códigos
Nível de Planejamento	Estratégico	1A
	Tático	1B
	Operacional	1C
Aplicação Prática	Não Aplicado	2A
	Aplicado em Estudo de Caso	2B
	Aplicado no Mundo Real	2C
Área de Aplicação	Agrícola	3A
	Indústria	3B
	Energia	3C
	Outros	3D
Tipo de Modelo	Linear	4A
	Misto Inteiro Linear	4B
	Misto Inteiro Não-Linear	4C
	Heurística	4D
	Outros métodos	4E

Fonte: elaborado pelos autores

4 RESULTADOS DA ANÁLISE DA LITERATURA

A seguir, serão apresentados os trabalhos selecionados, juntamente com informações bibliométricas sobre suas origens, acompanhados de resumos que descrevem seus objetivos, aplicações e posteriormente aspectos técnicos sobre a otimização utilizada. A Tabela 2 apresenta as informações completas sobre

cada artigo selecionado, com título, revista, autores, citações e ano de publicação.

Tabela 2. Artigos selecionados na revisão sistemática

Título	Revista	Autores	Citações	Ano	Base
A comparative study on resource allocation and energy efficient job scheduling strategies in large-scale parallel computing systems	Cluster Comput	Chandio A.A., Bilal K., Tziritas N., Yu Z., Jiang Q., Khan S.U., Xu C.-Z.	40	2014	Scopus
A decision support system for land use planning at farm enterprise level	Agricultural Systems	Sharifi, M. A., Van Keulen, H.	59	1994	Science Direct
A Mathematical Approach to Optimize Crop Allocation – A Linear Programming Model	International Journal of Design & Nature and Ecodynamics	Bhatia, M., Rana, A.	19	2020	Scopus
A mixed–integer linear optimization model for a two–echelon agribusiness supply chain	Electronic Notes in Discrete Mathematics	Albornoz, V. M., Urrutia-Gutiérrez, C.	8	2018	Science Direct
A planning model of crop maintenance operations inspired in lean manufacturing	Computers and Electronics in Agriculture	Caicedo Solano N.E., García Llinás G.A., Montoya-Torres J.R., Ramirez Polo L.E.	5	2020	Scopus
A strong integer programming formulation for hybrid flowshop scheduling	Journal of the Operational Research Society	Ünal, A. T., Agrali, S., Taskin, Z.C.	11	2020	Web of Science
A two-step framework for dispatching shared agricultural machinery with time windows	Computers and Electronics in Agriculture	Wang Y.-J., Huang G.Q.	8	2022	Scopus
Coordinating harvest planning and scheduling in an agricultural supply chain through a stochastic bilevel programming	International Transactions in Operational Research	Albornoz, V.M., Vera, P.I.	3	2023	Web of Science
Crop production scheduling for revenue inequality reduction among smallholder farmers in an agricultural cooperative	Journal of the Operational Research Society	Pakawanich, P., Udomsakdigool, A., Khompatraporn, C.	3	2022	Web of Science

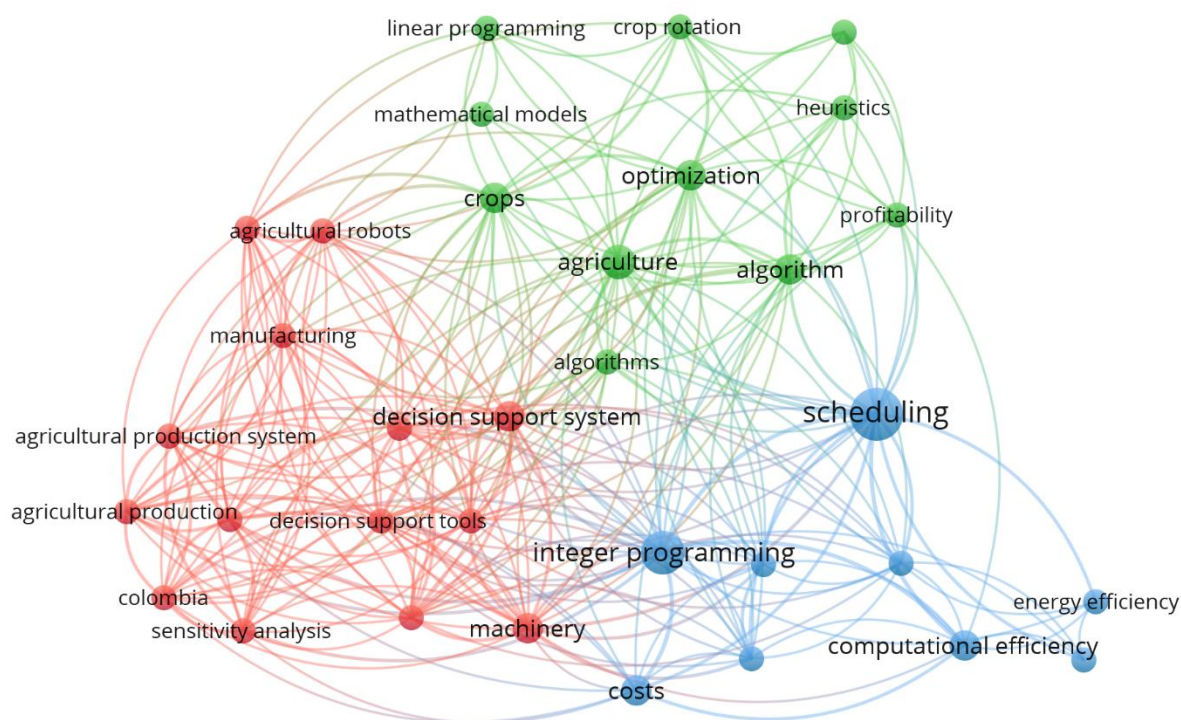
Título	Revista	Autores	Citações	Ano	Base
Crop rotation model for contract farming with constraints on similar profits	Computers and Electronics in Agriculture	Li J., Rodriguez D., Zhang D., Ma K.	26	2015	Scopus
Exact algorithms for production planning in mining considering the use of stockpiles and sequencing of power shovels in open-pit mines	Operational Research	Flores-Fonseca C., Linfati R., Escobar J.W.	5	2022	Scopus
Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming	European Journal of Operational Research	Jena, S. D., Poggi, M.	99	2013	Science Direct
Improving Local Food Systems through the Coordination of Agriculture Supply Chain Actors	Sustainability	Anggraeni E.W., Handayati Y., Novani S.	4	2022	Scopus
Integrated Stochastic Optimal Self-Scheduling for Two-Settlement Electricity Markets	INFORMS Journal on Computing	Pan K., Guan Y.	1	2022	Scopus
Migrating the fair share algorithm from a distribution to a production planning environment	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	Van den Broecke F., Aghezzaf E.-H., Van Landeghem H.	0	2008	Scopus
Operational model for minimizing costs in agricultural production systems	Computers and Electronics in Agriculture	Caicedo Solano N.E., García Llinás G.A., Montoya-Torres J.R.	3	2022	Scopus
Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron- and steel-making process under uncertainties	Computers and Chemical Engineering	Pena J.G.C., de Oliveira V.B., Junior, Salles J.L.F.	17	2019	Scopus
Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tabu Search method	Computers and Electronics in Agriculture	Edwards G., Sørensen C.G., Bochtis D.D., Munkholm L.J.	49	2015	Scopus
Optimization model of agricultural production system in grain farms under risk, in Sorriso, Brazil	Agricultural Systems	Osaki, M., Batalha, M. O.	67	2014	Science Direct
Orange harvesting scheduling management: a case study	Journal of the Operational Research Society	Caixeta-Filho, J. V.	103	2006	Scopus
Scheduling in-house transport vehicles to	European Journal of	Emde S., Gendreau M.	66	2017	Scopus

Título	Revista	Autores	Citações	Ano	Base
feed parts to automotive assembly lines	Operational Research				
Virtual-build-to-order as a mass customization order fulfilment model	CONCURRENT ENGINEERING: Research and Applications	Brabazon P.G., MacCarthy B.	37	2004	Scopus

Fonte: elaborado pelos autores

Para melhor visualização dos temas foi realizada uma análise de coocorrência de todas as palavras chaves dos artigos seleccionados, separando os temas em três clusters, separados pelas cores (Figura 2).

Figura 2. Análise de coocorrência com todas as palavras chaves.



Fonte: Desenvolvido pelos autores utilizando o software VosViewer®

O cluster azul corresponde à esfera da logística que engloba o agendamento de produção (scheduling), com um foco específico na otimização da eficiência e dos custos envolvidos; esse agrupamento concentra-se, sobretudo, na utilização de modelos matemáticos mistos, notadamente os de programação inteira (mistos). Entretanto, é importante ressaltar que modelos

mistos não são os únicos utilizados segundo a análise, a aplicação de heurísticas também é considerada devido à flexibilidade do modelo, que não necessita ser estritamente linear e inteiro, permitindo a divisão em componentes que podem ser resolvidos por meio de heurísticas (Pena, Oliveira, de e Salles, 2019).

O referido agrupamento azul não ficou direcionado para o setor agrícola, mas sim para o planejamento da produção, permitindo a adaptação das técnicas de modelagem a produtos similares ou relacionados às ciências agrárias. Um trabalho que exemplifica este caso é o modelo matemático misto desenvolvido para representar produtos de uma atividade de mineração, que são expressos por meio de blocos; embora esses itens não façam parte do âmbito específico deste estudo, a estrutura física dos blocos pode ser identificada também na agricultura, tornando-se passível de adaptação e no contexto desta pesquisa (Flores-Fonseca, Linfati e Escobar, 2022).

Por outro lado, o cluster vermelho concentra-se predominantemente na temática da utilização de maquinário agrícola, relacionando-se estreitamente com as relações entre: agricultura, o suporte à tomada de decisões e aos tipos de algoritmos. Este âmbito de estudo está associado ao planejamento do uso de máquinas e a produção em si, fornecendo conjuntos de ferramentas que abrangem desde a gestão do despacho dos veículos até o planejamento da contratação de pessoal para atender a demanda (Wang e Huang, 2022).

Uma particularidade que não foi explicitamente destacada nas palavras-chave deste agrupamento diz respeito ao fato de que uma parcela significativa destes trabalhos incorpora a janela de tempo como um componente essencial da otimização. Isso implica na necessidade de programar uma quantidade específica de tarefas e atividades dentro de dias e semanas que possuem restrições quanto ao número de horas de trabalho disponíveis; essa abordagem não apenas facilita a criação de um cronograma que direciona os gerentes responsáveis pelas atividades em questão, mas também pode fornecer orientações sobre a necessidade de contratação de mão de obra adicional ou a viabilidade de adiar a execução de uma atividade em um momento específico (Broecke, Van den, Aghezzaf e Landeghem, Van, 2008).

Por fim, o cluster verde se concentra no aspecto agrônômico, com um enfoque nas culturas agrícolas e nos sistemas de produção, abrangendo desde modelagens matemáticas até as relações na cadeia de suprimentos. É relevante destacar a palavra-chave da programação não linear, o qual difere dos modelos mistos (programação inteira) mencionados no cluster azul: nos modelos não lineares, pelo menos uma das equações incorpora termos como exponenciação ou funções trigonométricas. Portanto, ambos os modelos lineares e não lineares podem ser do tipo misto, variando de acordo com a natureza das equações empregadas; é importante ressaltar que os modelos não lineares tendem a ser mais complexos e desafiadores do ponto de vista computacional, mas são utilizados devido à sua capacidade de representar problemas com maior flexibilidade de abordagem de problemas (Klanšek, 2015).

O planejamento operacional de produção apresenta desafios complexos na alocação de recursos e otimização de processos, sendo assim, as representações técnicas desses problemas por meio de modelagens matemáticas e exemplificações formais são essenciais para definir os objetivos, restrições e metodologias de forma precisa. A diversidade dos desafios no mundo agrícola requer a aplicação de diferentes técnicas, como modelos mistos, heurísticas e programação não linear, conforme a complexidade e a natureza específica de cada problema (Sørensen e Bochtis, 2010).

A Tabela 3 apresenta os principais objetivos de cada estudo selecionado, oferecendo uma visão clara dos enfoques de cada pesquisa.

Tabela 3. Trabalhos selecionados com seus respectivos objetivos principais.

Título	Objetivo principal
A comparative study on resource allocation and energy efficient job scheduling strategies in large-scale parallel computing systems	Comparar e analisar diferentes políticas de escalonamento de tarefas para sistemas de computação paralela de grande escala, considerando várias métricas de desempenho e características de carga de trabalho.
A Decision Support System for Land Use Planning at Farm Enterprise Level	Desenvolver um sistema de apoio à decisão para o planejamento do uso da terra no nível da empresa agrícola, integrando informações biofísicas, socioeconômicas e espaciais em um modelo de planejamento que gera planos táticos e operacionais.
A Mathematical Approach to Optimize Crop Allocation – A Linear Programming Model	Otimizar a alocação de culturas em diferentes distritos de Rajasthan, na Índia, considerando a disponibilidade limitada de água e terra. Foi utilizada programação linear

Título	Objetivo principal
A mixed–integer linear optimization model for a two–echelon agribusiness supply chain	para determinar o padrão de cultivo ideal que maximiza os retornos da fazenda e minimiza o custo de entrada Propor uma nova abordagem matemática para um problema de delimitação de zonas de gestão com uma alocação de planejamento de rotação de culturas, como parte de uma cadeia de abastecimento agroindustrial de dois níveis.
A planning model of crop maintenance operations inspired in lean manufacturing	Proposição de um modelo matemático para otimizar as operações de manutenção de culturas, minimizando custos e desperdícios, enquanto mantém a qualidade e a produtividade das colheitas.
A strong integer programming formulation for hybrid flowshop scheduling	Desenvolver um modelo de programação inteira para minimizar o atraso das atividades de uma indústria, que inclui máquinas de produção discreta e de processamento em lote em diferentes estágios.
A two-step framework for dispatching shared agricultural machinery with time windows	Criação de uma estrutura de duas etapas para despachar máquinas agrícolas compartilhadas com janelas de tempo, considerando a localização, o tamanho, a cultura e o tempo de processamento das terras agrícolas.
Coordinating harvest planning and scheduling in an agricultural supply chain through a stochastic bilevel programming	Propor um modelo de programação bilevel estocástica que apoia a tomada de decisão do ponto de vista da agricultura de precisão, integrando o problema de delimitação de zonas de gestão com o problema de planejamento da colheita no contexto de uma cadeia de abastecimento agrícola hierárquica.
Crop production scheduling for revenue inequality reduction among smallholder farmers in an agricultural cooperative	Utilizar heurística para determinar o cronograma de produção de culturas para uma cooperativa agrícola, considerando um objetivo social de receitas semelhantes para todos os pequenos agricultores membros
Crop rotation model for contract farming with constraints on similar profits	Proposição de um modelo operacional para o planejamento da rotação de culturas de vegetais em contratos agrícolas na China, com as metas de maximizar os lucros e proporcionar lucros semelhantes para todos os pequenos agricultores.
Exact algorithms for production planning in mining considering the use of stockpiles and sequencing of power shovels in open-pit mines	Criação de um modelo matemático para planejamento da produção e sequenciamento de escavadeiras em minas a céu aberto, considerando o uso de pilhas de estoque e maximizando o valor presente líquido (VPL).
Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming	Desenvolver modelos matemáticos para o planejamento tático e operacional da colheita de cana-de-açúcar no Brasil, visando maximizar o lucro em termos de quantidade e qualidade da cana cortada, respeitando certas restrições industriais, sociais e ambientais.
Improving Local Food Systems through the Coordination of Agriculture Supply Chain Actors	Construir um modelo conceitual que descreve as atividades e a coordenação dos atores envolvidos em um food hub para alcançar um sistema alimentar local
Integrated Stochastic Optimal Self-Scheduling for Two-Settlement Electricity Markets	Propor um modelo de programação estocástica para produtores independentes de energia (IPPs) que participam de mercados de eletricidade com liquidação em dois estágios, considerando as incertezas dos preços e da geração renovável
Migrating the fair share algorithm from a distribution to a production planning environment	Adaptar um modelo integrado de planejamento e programação para um sistema de produção híbrido de dois estágios, utilizando um algoritmo de compartilhamento justo para determinar as quantidades

Título	Objetivo principal
	de produtos finais que atendem à demanda do mercado, usando o plano de volume do produto intermediário como uma restrição de entrada
Operational model for minimizing costs in agricultural production systems	Desenvolver um modelo matemático MINLP para otimizar o planejamento de sistemas de produção agrícola nas etapas de semeadura, manutenção da cultura e colheita.
Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron- and steel-making process under uncertainties	Resolver o problema de programação do fornecimento de gás residual em uma indústria siderúrgica integrada com incerteza nos fluxos de gás residual, realizando previsões dos fluxos de produção e consumo de gases no processo siderúrgico.
Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tabu Search method	Desenvolver uma ferramenta para o agendamento de máquinas agrícolas para operações de colheita e manuseio de biomassa em vários campos geograficamente dispersos, levando em conta a prontidão do campo de cada local.
Optimization model of agricultural production system in grain farms under risk, in Sorriso, Brazil	Propor um modelo de apoio à decisão (modelo matemático) focado no planejamento da produção em fazendas multiprodutos sob condições de risco, utilizando a pesquisa operacional para entender as diferentes alocações de recursos produtivos em fazendas que se dedicam à produção de grãos.
Orange harvesting scheduling management: a case study	Proposição de um modelo matemático linear para o planejamento da colheita de laranja utilizando dados de 320 fazendas sobre maturação dos frutos, como índices como sólidos solúveis totais e a sua proporção.
Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines	Resolver o problema de programação e carregamento de veículos de transporte interno que levam peças para as linhas de montagem automotiva, utilizando modelagem matemática
Virtual-build-to-order as a mass customization order fulfilment model	Descrever e desenvolver os conceitos operacionais que sustentam o VBTO, um modelo de atendimento de pedidos de personalização em massa que permite ao produtor buscar em todo o pipeline de estoque, produtos em produção e produtos no plano de produção, a fim de encontrar o melhor produto para um cliente.

Fonte: elaborado pelos autores

Os trabalhos selecionados envolvem a aplicação de métodos matemáticos e técnicas de otimização em uma variedade de contextos, abordando desafios específicos em áreas como computação paralela, agricultura, produção industrial e cadeias de abastecimento. Embora a natureza e os domínios de aplicação variem, grande parte compartilha a abordagem de modelagem matemática para melhorar a eficiência, maximizar o desempenho e resolver complexos problemas de tomada de decisão; quando não utilizam destes, são metodologias, ferramentas ou conceitos que visam aumentar a eficiência, tendo a mesma meta de otimizar algo (Chandio *et al.*, 2014; Edwards *et al.*, 2015).

Estas pesquisas demonstram a versatilidade e utilidade da pesquisa operacional em diferentes setores, destacando a busca por soluções que resultem em benefícios econômicos, sociais e ambientais. Em setores industriais, como a produção em massa e a gestão de cadeias de abastecimento, a pesquisa operacional é usada para planejar e otimizar as operações. Isso inclui agendamento de máquinas, carregamento de veículos, alocação de recursos e carga da linha de produção; onde os modelos matemáticos auxiliam na minimização de atrasos, maximização de lucros e coordenação eficaz das atividades (Broecke, Van den, Aghezzaf e Landeghem, Van, 2008; Emde e Gendreau, 2017; Pena, Oliveira, de e Salles, 2019).

Já na agricultura, vários estudos concentram-se em otimizar os processos de plantio, colheita e manutenção das culturas. Os modelos matemáticos são desenvolvidos para determinar os melhores padrões de cultivo, minimizando custos e desperdícios, ao mesmo tempo em que garantem a qualidade e a produtividade das colheitas (Li *et al.*, 2015; Solano *et al.*, 2020). Também possuem uma aplicação especialmente relevante em regiões com recursos limitados, como água e terra, onde a alocação adequada é fundamental e o uso consciente destes bens são essenciais (Bhatia e Rana, 2020).

Na Tabela 4 são apresentados os trabalhos categorizados e codificados com a metodologia e base proposta na Tabela 1, contendo os códigos correspondentes de cada um dos artigos selecionados na revisão.

Tabela 4. Artigos selecionados na revisão sistemática

Título	Nível de Planejamento	Aplicação Prática	Área de Aplicação	Tipo de Modelo
A comparative study on resource allocation and energy efficient job scheduling strategies in large-scale parallel computing systems	1C	2C	3C	4E
A decision support system for land use planning at farm enterprise level	1B,1C	2B	3A	4A
A Mathematical Approach to Optimize Crop Allocation – A Linear Programming Model	1C	2A	3A	4A
A mixed–integer linear optimization model for a two–echelon agribusiness supply chain	1A,1C	2C	3A	4B

Título	Nível de Planejamento	Aplicação Prática	Área de Aplicação	Tipo de Modelo
A planning model of crop maintenance operations inspired in lean manufacturing	1C	2B	3A	4B,4D
A strong integer programming formulation for hybrid flowshop scheduling	1B,1C	2A	3B	4B
A two-step framework for dispatching shared agricultural machinery with time windows	1C	2B	3A	4B
Coordinating harvest planning and scheduling in an agricultural supply chain through a stochastic bilevel programming	1A,	2B	3A	4B
Crop production scheduling for revenue inequality reduction among smallholder farmers in an agricultural cooperative	1C	2C	3A	4D
Crop rotation model for contract farming with constraints on similar profits	1B,1C	2C	3A	4D
Exact algorithms for production planning in mining considering the use of stockpiles and sequencing of power shovels in open-pit mines	1C	2C	3D	4B
Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming	1C	2C	3A	4B
Improving Local Food Systems through the Coordination of Agriculture Supply Chain Actors	1B	2C	3A	4E
Integrated Stochastic Optimal Self-Scheduling for Two-Settlement Electricity Markets	1C	2A	3C	4C, 4E
Migrating the fair share algorithm from a distribution to a production planning environment	1B	2A	3B	4E
Operational model for minimizing costs in agricultural production systems	1C	2C	3A	4C
Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron- and steel-making process under uncertainties	1C	2B	3B, 3D	4C, 4D
Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tabu Search method	1C	2C	3A	4D
Optimization model of agricultural production system in grain farms under risk, in Sorriso, Brazil	1C	2C	3A	4A
Orange harvesting scheduling management: a case study	1C	2C	3A	4A

Título	Nível de Planejamento	Aplicação Prática	Área de Aplicação	Tipo de Modelo
Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines	1C	2B	3B	4B, 4D
Virtual-build-to-order as a mass customization order fulfilment model	1A, 1B	2A	3B	4E

Fonte: elaborado pelos autores

Sobre os diversos níveis de planejamento, observa-se que, apesar da inclusão da palavra "operacional" nos termos de busca dos artigos, não era garantido que tal especificação determinasse o nível de planejamento abordado pelo modelo ou a problemática que visava solucionar (Ahumada e Villalobos, 2009). Em muitas instâncias, os modelos apresentavam a capacidade de integrar mais de um nível de planejamento, ou, em alguns casos, mencionavam exclusivamente aspectos do âmbito operacional (Li *et al.*, 2015).

Dado que a maioria dos modelos estava contextualizada nas atividades operacionais, é observável que esses modelos também tinham uma propensão para abordar problemas específicos com aplicação real; muitas vezes, apresentando casos práticos ou estudos de caso para ilustrar e solucionar os desafios propostos (Osaki e Batalha, 2014; Solano, García Llinás e Montoya-Torres, 2022). Por outro lado, os modelos desprovidos de aplicação real baseavam-se frequentemente na adaptação de algoritmos previamente utilizados, contribuindo assim com uma nova fundamentação teórica, porém sem incorporar uma aplicação e validação direta no artigo (Bhatia e Rana, 2020; Brabazon e MacCarthy, 2004).

Os demais tópicos serão comentados na seção 4.1, com uma visão mais técnica e detalhada sobre os aspectos específicos das modelagens e como foram desenvolvidos.

4.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

A modelagem matemática desempenha um papel fundamental na otimização, pois fornece a estrutura matemática necessária para representar problemas do mundo real de forma quantitativa. E, por meio deste processo, os

problemas complexos são traduzidos em equações, restrições e variáveis que podem ser manipuladas e resolvidas por algoritmos de otimização. As escolhas das abordagens de modelagem, tipo de modelos (heurísticas, lineares, não-lineares, mistos), solvers e linguagens, são essenciais para determinar a eficácia na resolução de problemas específicos. Portanto, compreender a modelagem matemática e suas diversas técnicas é um passo crucial na resolução de desafios em áreas tão variadas quanto agricultura, indústria, energia e cadeia de suprimentos (Fowler, 1997).

Na Tabela 5 são apresentados os trabalhos da revisão com foco na modelagem matemática, descrevendo o título, a área de aplicação, o objetivo, a classificação do modelo, os solvers e a linguagem (ou softwares).

Tabela 5. Artigos classificados em área de aplicação, objetivo, classificação, solver utilizado e linguagem dos modelos.

Título	Área	Objetivo	Classificação	Solvers	Linguagem
A comparative study on resource allocation and energy efficient job scheduling strategies in large-scale parallel computing systems	Energia	Minimizar tempo de fila, resposta e consumo de energia (computacional)	Algoritmo de alocação de tarefas computacional (variados)	Não citado	Não citado
A decision support system for land use planning at farm enterprise level	Agrícola	Estimar produtividade da terra	Linear	Não se aplica	Não se aplica
A Mathematical Approach to Optimize Crop Allocation – A Linear Programming Model	Agrícola	Maximizar os retornos da fazenda e minimizar os custos que entram	Linear	Simplex	LINGO
A mixed-integer linear optimization model for a two-echelon agribusiness supply chain	Agrícola	Maximizar lucro de acordo com valor de venda de cultivar determinada cultura em certa zona	Misto inteiro linear	Não citado	Não citado
A planning model of crop maintenance operations inspired in lean manufacturing	Agrícola	Minimizar lixo gerado por operações agrícolas.	Misto inteiro linear. Heurísticas	Couenne	GAMS

Título	Área	Objetivo	Classificação	Solvers	Linguagem
A strong integer programming formulation for hybrid flowshop scheduling	Indústria	Minimizar atraso das atividades de uma linha de produção industrial	Misto inteiro linear	CPLEX	ICRON e Java
A two-step framework for dispatching shared agricultural machinery with time windows	Agrícola	Minimizar custos de transporte	Misto inteiro linear	CPLEX	Java
Coordinating harvest planning and scheduling in an agricultural supply chain through a stochastic bilevel programming	Agrícola	Maximizar lucro, utilizando preços de venda e custos da colheita e transporte	Misto inteiro linear	Gurobi	AMPL
Crop production scheduling for revenue inequality reduction among smallholder farmers in an agricultural cooperative	Agrícola	Minimizar o desvio padrão da receita entre as estufas dos produtores	Heurística	Não citado	Python
Crop rotation model for contract farming with constraints on similar profits	Agrícola	Maximizar preços e minimizar diferença de lucro entre pequenos produtores	Heurística	Não citado	Java
Exact algorithms for production planning in mining considering the use of stockpiles and sequencing of power shovels in open-pit mines	Mineração	Maximizar Valor Presente Líquido e eficiência das pás de escavação	Misto inteiro linear	CPLEX, Gurobi	AMPL
Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming	Agrícola	Maximizar lucro pelo açúcar total recuperável	Misto inteiro linear	CPLEX	C++
Improving Local Food Systems through the Coordination of Agriculture Supply Chain Actors	Agrícola	Criar um modelo das relações dentro de uma cadeia de suprimento	Soft System Methodology (SSM) e CATWOE	Não se aplica	Não se aplica
Integrated Stochastic Optimal Self-Scheduling for	Energia	Maximizar lucro de venda de energia	Misto inteiro não linear. TMS (Two-stage	CPLEX	Não citado

Título	Área	Objetivo	Classificação	Solvers	Linguagem
Two-Settlement Electricity Markets			Multistage Self-scheduling)		
Migrating the fair share algorithm from a distribution to a production planning environment	Indústria	Otimizar todo o Sistema de produção	Fair Share Algorithm (Econômico)	Não citado	Não citado
Operational model for minimizing costs in agricultural production systems	Agrícola	Minimizar custo total	Misto inteiro não linear.	Couenne	GAMS
Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron- and steel-making process under uncertainties	Química e Indústria	Minimizar desbalanceamento de subprodutos e maximizar eficiência energética	Misto inteiro não linear e Heurística	CPLEX	MATLAB
Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tabu Search method	Agrícola	Minimizar tempo da operação do maquinário	Heurística (Tabu Search Method)	Não citado	Java
Optimization model of agricultural production system in grain farms under risk, in Sorriso, Brazil	Agrícola	Maximizar margem de contribuição bruta	Linear	Não citado	LINDO
Orange harvesting scheduling management: a case study	Agrícola	Maximização dos sólidos solúveis totais na colheita de laranjas	Linear	Não citado	Não citado
Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines	Rotas e Indústria	Minimizar inventário durante o processo de fabricação	Misto inteiro linear. Heurística (Tabu Search Method).	CPLEX	Não citado
Virtual-build-to-order as a mass customization order fulfilment model	Indústria	Preencher pedidos para clientes de produção em massa	Virtual-build-to-order (VBTO). Abordagem estratégica-operacional	Não se aplica	Não se aplica

Fonte: elaborado pelos autores

Entre as diversas áreas de aplicação, foram identificadas as seguintes: energia, agricultura, indústria, mineração, cadeia de suprimentos agrícola e química. A inclusão de trabalhos que não se inserem diretamente no campo

agrícola é justificada pela metodologia de criação dos modelos matemáticos, que muitas vezes apresentam técnicas e ideias transferíveis e aplicáveis a outros setores (Ahumada e Villalobos, 2009). Dessa forma, esses estudos oferecem um valioso referencial teórico que pode ser adaptado e utilizado de maneira eficaz em diferentes contextos, ampliando o conhecimento e as possibilidades de solução na área agrícola (Cronin, Ryan e Coughlan, 2008).

No que diz respeito à classificação dos modelos utilizados, observou-se uma abordagem equilibrada, abrangendo tanto heurísticas quanto modelos lineares e mistos inteiros: lineares e não-lineares. Essa diversidade de abordagens ressalta a adaptabilidade das técnicas de otimização, que são aplicadas de acordo com as necessidades específicas de cada problema em questão. Além disso, fora dessas categorias, foram identificadas outras abordagens, como algoritmos econômicos e de planejamento, que embora abordem escopos diferentes, ainda oferecem uma visão aberta das vastas possibilidades que a otimização pode proporcionar na resolução de problemas. Essa diversidade reflete a riqueza das ferramentas disponíveis para abordar desafios de otimização e ilustra a importância da escolha da técnica mais adequada a cada contexto (Fowler, 1997).

Heurísticas são uma classe de métodos de otimização que se destacam pela sua eficiência na resolução de problemas complexos em um tempo relativamente curto, embora não garantam soluções ótimas. Elas são particularmente úteis quando se enfrentam problemas para os quais não existe viabilidade computacional para uma solução exata prática, como é frequentemente o caso em situações do mundo real. As heurísticas baseiam-se em estratégias de busca e na aplicação de regras empíricas, tentando encontrar soluções aproximadas que sejam aceitáveis em termos de qualidade e viabilidade. Em muitas áreas, como agricultura e logística, as heurísticas desempenham um papel fundamental na viabilização da tomada de decisões eficientes e na resolução de problemas de otimização de maneira pragmática (Edwards *et al.*, 2015).

Modelos lineares de otimização são uma abordagem matemática amplamente utilizada para resolver problemas nos quais as relações entre as

variáveis podem ser representadas de forma linear. Essa abordagem se destaca especialmente em problemas nos quais a representação das restrições não requer elevada complexidade ou, quando possível, pode ser linearizada e simplificada sem a necessidade de lidar com variáveis inteiras. Os modelos lineares são conhecidos por sua eficiência computacional e capacidade de fornecer soluções ótimas para muitos problemas, desde que as suposições de linearidade se apliquem ao cenário em questão (Caixeta-Filho, 2006).

Por outro lado, os modelos mistos inteiros combinam elementos de modelos lineares com restrições relacionadas ao intervalo dos valores das variáveis, assim mudando significativamente o processo de resolução computacional. Esses modelos são aplicados quando as variáveis de decisão podem tomar tanto valores inteiros quanto contínuos, tornando-se particularmente adequados para abordar problemas que envolvem escolhas discretas, como a autorização ou proibição de certas ações e até mesmo a, aparentemente simples, possibilidade de dizer sim ou não dentro do problema (Floudas e Lin, 2005). A capacidade de resolver problemas que englobam escolhas tanto discretas quanto contínuas faz dos modelos mistos inteiros uma ferramenta versátil para a otimização em diversos cenários complexos (Albornoz e Urrutia-Gutiérrez, 2018).

Nos três tipos de resolução apresentados, a eficiência do processamento é um aspecto crítico para atingir seus objetivos, e a sua aplicação depende em grande parte da capacidade de obter soluções ótimas ou quase ótimas em tempo viável. A eficiência é especialmente relevante em cenários do mundo real, onde os problemas podem ser muito complexos e o tempo de resolução é uma preocupação prática que decidirá seu uso ou não (Smith e Taskin, 2008).

No caso específico das heurísticas isso não chega a ser um problema pois a sua própria categoria já visa este propósito: encontrar um método alternativo que resolva o problema em tempo viável, mesmo que a solução não seja exatamente a ótima. Por este motivo, cada problema pode exigir uma técnica heurística diferente, indo da adaptação até a criação de novos algoritmos; o importante é encontrar uma solução próxima da ótima em tempo hábil (Neth e Gigerenzer, 2015).

Em modelos mistos inteiros, a busca por soluções ótimas pode ser particularmente desafiadora, pois exige a exploração de todas as combinações possíveis das variáveis inteiras, o que pode levar a um crescimento exponencial do espaço de busca e potencialmente resultando na inviabilidade operacional do modelo. Nesses casos, as técnicas de branch-and-bound e branch-and-cut são frequentemente empregadas para reduzir o espaço de busca e identificar soluções ótimas de maneira mais eficiente (Lawler e Wood, 1966).

Já os modelos lineares, devido à sua natureza mais simples, geralmente oferecem tempos de resolução mais rápidos; isso ocorre porque a otimização linear envolve a busca por soluções em um espaço convexo, que é computacionalmente mais eficiente de explorar. Algoritmos como o método simplex viabilizam resolver problemas de grande porte em pouquíssimo tempo com o poder computacional acessível hoje, podendo ser escalonados muito mais facilmente do que modelos mistos (Ficken, 2015).

Idealmente, a representação dos problemas na forma linear seria a abordagem preferencial; no entanto, a modelagem inteiramente linear apresenta limitações em comparação com abordagens mistas e heurísticas. Em muitos casos, a total linearização não é capaz de capturar integralmente a complexidade da realidade ou considerar todos os aspectos de um problema, o que inviabiliza sua aplicação exclusiva e torna necessária a utilização de técnicas mistas e heurísticas para abordar desafios de otimização de maneira mais abrangente e eficaz (Vanderbei, 2020).

Nesse contexto, foi desenvolvida a estratégia híbrida, que consiste na integração de modelos lineares, modelos mistos e técnicas heurísticas em diferentes fases do problema, capitalizando as respectivas vantagens de cada abordagem sempre que viável. Essa estratégia é frequentemente adotada em situações em que uma única técnica não é suficiente para alcançar soluções de alta qualidade; um exemplo comum envolve a combinação de heurísticas com modelos inteiros mistos, possibilitando a geração rápida de soluções iniciais que servem como ponto de partida para a otimização exata. Essa abordagem híbrida se revela altamente eficaz na resolução de problemas complexos,

proporcionando uma combinação equilibrada entre eficiência e precisão (Emde e Gendreau, 2017; Wolsey, 1980).

Em todos os cenários, solvers comerciais especializaram-se na integração dessas diversas técnicas, notáveis exemplos sendo o CPLEX e o Gurobi, reconhecidos por sua eficiência e capacidade de lidar com a resolução de problemas complexos de grande escala. Essas poderosas ferramentas oferecem versatilidade ao abordar modelos lineares, mistos inteiros e não lineares: o pré-processamento, que simplifica o modelo de otimização antes do processo de resolução, proporciona uma abordagem eficaz e expedita para a resolução de problemas complexos (Gurobi Optimization, 2021; Laborie *et al.*, 2018; Savelsbergh, 1994).

No levantamento de literatura realizado, ficou evidente que o solver CPLEX é amplamente preferido, com uma presença notável, enquanto outros solvers, como Gurobi e Couenne, aparecem de forma mais esporádica. Vale ressaltar que, ao contrário do solver, a escolha da linguagem de programação é flexível, a menos que se utilize um software comercial que integre ambos em um único pacote, assim limitando a integração. Portanto, desde que atenda às necessidades do modelo, a utilização de linguagens como Java, C++ ou outras não deve impactar de forma significativa o tempo de resolução de um problema de otimização, proporcionando flexibilidade aos pesquisadores e profissionais na escolha da linguagem que melhor atenda às suas necessidades (Fragniere e Gondzio, 2002).

Quanto ao problema específico de planejamento operacional de produção agrícola, trabalhos similares como de Li *et al.* (2015), Pakawanich (2022) e Solano *et al.* (2020) obtiveram sucesso na criação de cronogramas com o uso de modelos mistos e heurísticas, essas abordagens apresentam limitações significativas, seja em relação ao horizonte de planejamento ou ao número de variáveis do problema. Por outro lado, embora alguns estudos tenham conseguido modelar soluções aproximadas, a resolução integral do problema em tempo hábil, utilizando somente modelos mistos, ainda representa um desafio em aberto, demandando pesquisas adicionais para atingir esse objetivo de maneira satisfatória (Azevedo, 2022).

5 CONCLUSÃO

O levantamento efetuado proporcionou uma visão abrangente acerca dos desafios de modelagem relacionados ao planejamento de atividades agrícolas, evidenciando a classificação em modelos lineares, mistos inteiros e heurísticas. Existe a possibilidade de ampliar esse escopo para incluir outras categorias, incorporando modelos determinísticos ou estocásticos, o que permitiria uma exploração mais aprofundada para identificar abordagens mais recomendadas.

As atividades agrícolas apresentam especificidades singulares ausentes em setores mais avançados em modelagem, como a indústria. Em alguns casos, as atividades agrícolas são influenciadas por fatores externos de difícil previsão, como temperatura e precipitação. Portanto, é evidente que pesquisas provenientes de outros contextos de produção não se aplicam diretamente à área agrícola, uma vez que requerem adaptações substanciais para atender às demandas específicas desse setor; isto não evita que as restrições e equações sejam adaptadas, uma vez que a técnica matemática pode ser reaproveitada.

As limitações inerentes a este estudo estão associadas à sua natureza de revisão sistemática, que se fundamenta na aplicação de filtros e palavras-chave específicas, com restrições aos critérios de inclusão e exclusão dos artigos. Além disso, adotou-se o protocolo específico de Cronin para a revisão da literatura, caracterizando-a como uma abordagem qualitativa sem nenhuma análise posterior, sendo totalmente na área descritiva. Sugerem-se investigações futuras que comparem os resultados deste estudo com aqueles provenientes de pesquisas que adotem abordagens e protocolos distintos.

Também recomenda-se futuras pesquisas que expandam a análise para incluir níveis adicionais de planejamento, oferecendo um detalhamento mais minucioso dos modelos. Além disso, é aconselhável abordar informações mais precisas sobre os softwares e linguagens de programação emergentes, considerando sua constante evolução.

REFERÊNCIAS

AHUMADA, O.; HERNÁNDEZ-CRUZ, X.; ULLOA, R.; PEINADO-GUERRERO, M.; QUIJADA, F.; VILLALOBOS, J. R. A tactical planning model for fresh produce production considering productive potential and changing weather patterns. **Biosystems Engineering**, v. 232, p. 13–28, 2023.

AHUMADA, O.; RENE VILLALOBOS, J.; NICHOLAS MASON, A. Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty. **Agricultural Systems**, v. 112, p. 17–26, 2012.

AHUMADA, O.; VILLALOBOS, J. 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, 2009.

AHUMADA, O.; VILLALOBOS, J. R. Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. **International Journal of Production Economics**, v. 133, n. 2, p. 677–687, 2011.

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, 2018.

AMUI, L. B. L.; JABBOUR, C. J. C.; SOUSA JABBOUR, A. B. L. DE; KANNAN, D. Sustainability as a dynamic organizational capability: a systematic review and a future agenda toward a sustainable transition. **Journal of cleaner production**, v. 142, p. 308–322, 2017.

AZEVEDO, P. H. F. **Modelo de apoio à decisão na produção de alimentos agrícolas: o caso de um produtor de alimentos orgânicos**. 52f. Monografia (Bacharelado em Administração) - Universidade de Brasília, Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas, Departamento de Administração: Brasília, 2022.

BETTANY-SALTIKOV, J. **How to do a Systematic Literature Review in Nursing: A step-by-step guide**. London: McGraw-Hill Education (UK), 2016.

BHATIA, M.; RANA, A. A mathematical approach to optimize crop allocation—A linear programming model. **Int. J. Des. Nat. Ecodynamics**, v. 15, n. 2, p. 245–252, 2020.

BOCHTIS, D.; SORENSEN, C. A. G.; KATERIS, D. **Operations management in agriculture**. London: Academic Press, 2018.

BORODIN, V.; BOURTEMBOURG, J.; HNAIEN, F.; LABADIE, N. Handling uncertainty in agricultural supply chain management: A state of the art. **European Journal of Operational Research**, v. 254, n. 2, p. 348–359, 2016.

BRABAZON, P. G.; MACCARTHY, B. Virtual-build-to-order as a mass customization order fulfilment model. **Concurrent Engineering Research and Applications**, v. 12, n. 2, p. 155–165, 2004.

BROECKE, F. VAN DEN; AGHEZZAF, E.-H.; LANDEGHEM, H. VAN. Migrating the fair share algorithm from a distribution to a production planning environment. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 4, p. 553–561, 2008.

CAIXETA-FILHO, J. V. Orange harvesting scheduling management: A case study. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, n. 6, p. 637–642, 2006.

CHANDIO, A. A.; BILAL, K.; TZIRITAS, N.; YU, Z.; JIANG, Q.; KHAN, S. U.; XU, C.-Z. A comparative study on resource allocation and energy efficient job scheduling strategies in large-scale parallel computing systems. **Cluster Computing**, v. 17, n. 4, p. 1349–1367, 2014.

CRONIN, P.; RYAN, F.; COUGHLAN, M. Undertaking a literature review: a step-by-step approach. **British journal of nursing**, v. 17, n. 1, p. 38–43, 2008.

EDWARDS, G.; SØRENSEN, C. G.; BOCHTIS, D. D.; MUNKHOLM, L. J. Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tabu Search method. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 117, p. 102–113, 2015.

EMDE, S.; GENDREAU, M. Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines. **European Journal of Operational Research**, v. 260, n. 1, p. 255–267, 2017.

FICKEN, F. A. **The simplex method of linear programming**. California: Courier Dover Publications, 2015.

FLORES-FONSECA, C.; LINFATI, R.; ESCOBAR, J. W. Exact algorithms for production planning in mining considering the use of stockpiles and sequencing of power shovels in open-pit mines. **Operational Research**, v. 22, n. 3, p. 2529–2553, 2022.

FLOUDAS, C. A.; LIN, X. Mixed Integer Linear Programming in Process Scheduling: Modeling, Algorithms, and Applications. **Annals of Operations Research**, v. 139, n. 1, p. 131–162, 2005.

FOWLER, A. C. **Mathematical models in the applied sciences**. New York: Cambridge University Press, 1997. v. 17

FRAGNIERE, E.; GONDZIO, J. Optimization modeling languages. **Handbook of Applied Optimization**, p. 993–1007, 2002.

GILLI, M.; SCHUMANN, E. Heuristic optimisation in financial modelling. **Annals of operations research**, v. 193, p. 129–158, 2012.

GUROBI OPTIMIZATION, L. L. C. **Gurobi optimizer reference manual**, 2021.
KLANŠEK, U. A comparison between MILP and MINLP approaches to optimal solution of Nonlinear Discrete Transportation Problem. **Transport**, v. 30, n. 2, p. 135–144, 2015.

LABORIE, P.; ROGERIE, J.; SHAW, P.; VILÍM, P. IBM ILOG CP optimizer for scheduling: 20+ years of scheduling with constraints at IBM/ILOG. **Constraints**, v. 23, p. 210–250, 2018.

LACEY, F. M.; MATHESON, L.; JESSON, J. **Doing your literature review: Traditional and systematic techniques**. London: Sage, 2011.

LAWLER, E. L.; WOOD, D. E. Branch-and-bound methods: A survey. **Operations research**, v. 14, n. 4, p. 699–719, 1966.

LI, J.; RODRIGUEZ, D.; ZHANG, D.; MA, K. Crop rotation model for contract farming with constraints on similar profits. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 119, p. 12–18, 2015.

LOPEZ, P.; ROUBELLAT, F. **Production scheduling**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

NETH, H.; GIGERENZER, G. Heuristics: Tools for an uncertain world. *Em: Emerging trends in the social and behavioral sciences*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. p. 1–18.

OLSON, K. D. **Farm management: principles and strategies**. 1st ed ed. Ames: Iowa State Press, 2004.

OSAKI, M.; BATALHA, M. O. Optimization model of agricultural production system in grain farms under risk, in Sorriso, Brazil. **Agricultural Systems**, v. 127, p. 178–188, 2014.

PAKAWANICH, P.; UDOMSAKDIGOOL, A.; KHOMPATRAPORN, C. Crop production scheduling for revenue inequality reduction among smallholder farmers in an agricultural cooperative. **JOURNAL OF THE OPERATIONAL RESEARCH SOCIETY**, v. 73, n. 12, p. 2614–2625, 2022.

PEART, R. M.; SHOUP, W. D. **Agricultural systems management: optimizing efficiency and performance**. New York: CRC Press, 2004.

PENA, J. G. C.; OLIVEIRA, V. B. DE; SALLES, J. L. F. Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron- and steel-making process under uncertainties. **Computers and Chemical Engineering**, v. 125, p. 351–364, 2019.

SAVELSBERGH, M. W. P. Preprocessing and probing techniques for mixed integer programming problems. **ORSA Journal on Computing**, v. 6, n. 4, p. 445–454, 1994.

SMITH, J. C.; TASKIN, Z. C. A tutorial guide to mixed-integer programming models and solution techniques. **Optimization in Medicine and Biology**, p. 521–548, 2008.

SOLANO, N. E. C.; GARCÍA LLINÁS, G. A.; MONTOYA-TORRES, J. R. Operational model for minimizing costs in agricultural production systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 197, 2022.

SOLANO, N. E. C.; GARCÍA LLINÁS, G. A.; MONTOYA-TORRES, J. R.; RAMIREZ POLO, L. E. A planning model of crop maintenance operations inspired in lean manufacturing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, 2020.

SØRENSEN, C. G.; BOCHTIS, D. D. Conceptual model of fleet management in agriculture. **Biosystems Engineering**, v. 105, n. 1, p. 41–50, 1 jan. 2010.

VANDERBEI, R. J. **Linear programming**. Cham: Springer, 2020.

WANG, Y.-J.; HUANG, G. Q. A two-step framework for dispatching shared agricultural machinery with time windows. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 192, 2022.

WOLSEY, L. A. Heuristic analysis, linear programming and branch and bound. *Em*: RAYWARD-SMITH, V. J. (Ed.). **Combinatorial Optimization II**. 3. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1980. p. 121–134.