57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

PLANEJAMENTO DA COLHEITA NO SETOR CITRÍCOLA: MODELAGEM MATEMÁTICA E UM CASO REAL

João Otávio Silva Perce
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Rod. Washington Luís, s/n - Monjolinho, São Carlos
joaoperce@estudante.ufscar.br

Pedro Augusto Munari Junior
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Rod. Washington Luís, s/n - Monjolinho, São Carlos
munari@dep.ufscar.br

Reinaldo Morabito Neto
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Rod. Washington Luís, s/n - Monjolinho, São Carlos
morabito@ufscar.br

RESUMO

Este trabalho aborda o planejamento da colheita no setor citrícola, com ênfase no cultivo de laranjas. O Brasil é o maior produtor mundial de laranjas, liderando o mercado internacional de produção de suco de laranja. Reduções sucessivas na oferta desse cultivo têm evidenciado a importância do emprego de métodos e técnicas matemáticas para superar tais desafios. Diante disso, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de otimização matemática para auxiliar na decisão de colheita de laranjas, determinando a quantidade de frutas a ser colhida em cada talhão e o período ideal para realizar essa colheita, satisfazendo restrições de capacidade e qualidade de múltiplos centros de processamento. Foram avaliados diferentes cenários de testes para simular situações produtivas, com variações no parâmetro de capacidade de processamento, utilizando dados reais fornecidos por uma empresa. Os resultados indicaram que a capacidade exerce forte influência sobre a qualidade das laranjas.

PALAVRAS CHAVE. Colheita de laranjas, Otimização Linear, Pesquisa Operacional.

Tópicos: Programação Matemática (PM); PO na Agricultura e Meio Ambiente (AG&MA).

ABSTRACT

This paper addresses harvest planning in the citrus sector, with an emphasis on orange cultivation. Brazil is the world's largest producer of oranges, leading the international market for orange juice production. Successive reductions in the supply of this crop have highlighted the importance of employing mathematical methods and techniques to overcome these challenges. In this context, the objective of this paper is to develop a mathematical optimization model to aid decision making in orange harvest, determining the quantity of fruit to be harvested in each plot and the ideal timing for this harvest, while satisfying capacity and quality constraints of multiple processing centers. Different test scenarios were evaluated to simulate production situations by varying the processing capacity parameter, using real-life data provided by a company. The results indicated that capacity has a strong influence on the quality of the oranges.

KEYWORDS. Orange Harvest, Linear Optimization, Operations Research.

Paper topics: Mathematical Programming; OR in Agriculture and Environment.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

1. Introdução

O Agronegócio é um setor de grande relevância para a economia brasileira. Este é definido, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), como o ramo econômico que envolve os segmentos de insumos para a agropecuária, produção agropecuária primária, processamento agroindustrial e serviços agrícolas. Em 2023, o PIB do agronegócio brasileiro encerrou o ano em R$ 2,58 trilhões, distribuídos entre 1,86 trilhão para o ramo agrícola e 721 bilhões para o ramo pecuário, o que representa uma participação do setor na economia de 23,8% em 2023 [CNA e CEPEA 2024].

Nesse contexto, a Citricultura, ramo do agronegócio referente ao cultivo de frutas cítricas, tem se mostrado vastamente impactante no cenário econômico nacional, em especial na produção de laranjas. Segundo levantamentos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) de julho de 2024, o Brasil é o maior produtor mundial de laranjas, com produção estimada em 15,3 milhões de toneladas para a safra 2023/2024. O segundo maior produtor é a China, com 7,6 milhões, seguida pela União Europeia, com 5,475 milhões, México, com 4,870 milhões, e Egito, com 3,7 milhões [USDA 2024].

Além disso, o Brasil lidera o ranking mundial na produção de sucos processados de laranja, com 1,066 milhão de toneladas produzidas na safra 2023/2024. Desse total, cerca de um milhão de toneladas foram exportadas, e isso corresponde a aproximadamente 75% da exportação global. Desse modo, evidencia-se o nível de dominância de produção e exportação brasileira deste cultivo, uma vez que quedas na produção do país afetam significativamente o mercado global de suco de laranja [USDA 2024].

Dado o papel crucial do setor na economia brasileira e mundial, reduções na oferta de laranjas dos agricultores brasileiros têm impactado o consumo global do produto. De acordo com a Fundecitrus, o Fundo de Defesa da Citricultura, estima-se uma queda de 24,36% em relação à safra anterior para 2024/2025 no cinturão de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro. Quando se observa o comportamento da quantidade produzida de laranjas ao longo do tempo, nota-se uma queda consecutiva nas médias de produção nas últimas três décadas [Fundecitrus 2024].

Diante da significativa redução na oferta desse cultivo, modelos e algoritmos de otimização têm se mostrado úteis para auxiliar na mitigação dos efeitos dessa crise. Um exemplo disso é no planejamento da colheita, onde modelos e algoritmos ajudam a definir o momento ideal de colheita de um amplo número de fazendas e talhões ao longo da safra. As laranjas são classificadas como frutos não climatéricos, isto é, frutos que não continuam o processo de maturação se colhidos precocemente, devendo assim permanecer na planta mãe até o estágio final de amadurecimento [Goulart 2012]. Diante disso, as empresas produtoras de laranjas utilizam curvas de maturação, obtidas por meio da retirada de amostras de frutos dentro dos talhões, de forma a identificar o melhor momento para realizar a colheita, para maximizar a qualidade da fruta. Em contrapartida, uma elevada diversificação das espécies cultivadas e o elevado número de curvas utilizadas, com intervalos de maturação distintos, dificulta o planejamento de colheita se feito de forma manual e sem apoio científico [Mattos Junior et al. 2005].

O período em que a colheita é realizada exerce um impacto direto sobre a qualidade do suco e demais subprodutos oriundos da laranja. Frutas colhidas antes de atingir o ponto ótimo de maturação podem apresentar baixo teor de sólidos solúveis, acidez desequilibrada e menor rendimento industrial, comprometendo o processamento e a qualidade final dos produtos. Por outro lado, a colheita tardia pode aumentar a incidência de frutos deteriorados e reduções no nível de sólidos solúveis. Dessa forma, o planejamento da colheita exerce um papel fundamental na qualidade dos produtos fabricados e no atendimento das exigências dos mercados consumidores.

Desse modo, tendo em vista a dificuldade envolvida no planejamento de colheita de laranja e o impacto da maturação sobre a qualidade do suco produzido, este trabalho tem como objetivo formular um modelo de otimização linear para auxiliar na colheita de laranjas. Este visa definir, de maneira ótima, a quantidade de frutas a ser colhida de cada um dos talhões e de cada fazenda, bem como o período ideal para realizar essa colheita, de modo a garantir que o processo ocorra o mais

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

próximo do momento de maturação máxima das diversas variedades de laranja, satisfazendo restrições de capacidade e qualidade de acordo com os centros de processamento desse cultivo.

O trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve o referencial teórico, contextualizando o leitor sobre os principais modelos matemáticos relacionados à temática. A Seção 3 apresenta uma caracterização do problema e o modelo de otimização proposto. A Seção 4 apresenta os dados que foram utilizados nos testes realizados. Na Seção 5, são apresentados e discutidos os resultados de experimentos computacionais. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões finais da pesquisa.

2. Revisão da Literatura

Modelos matemáticos aplicados ao longo da cadeia de suprimentos de suco de laranja são escassos na literatura. Poucas são as abordagens de Pesquisa Operacional (PO) pertencentes a este tema, e a situação se agrava quando o foco é direcionado ao processo de colheita. Diante disso, [Goodarzian e Fakhrzad 2021] desenvolveram um modelo de otimização inteira mista não-linear e heurísticas para coordenar o fluxo de laranjas transportadas ao longo da cadeia. O modelo adota uma abordagem multiobjetivo, minimizando o custo total, que inclui custos de transporte entre os elos, custos operacionais e estoque, além de maximizar o lucro total dos elos da cadeia. Contudo, embora o modelo trate especificamente da cadeia de suprimentos da laranja, ele não abrange a programação da colheita, uma vez que, neste contexto, a quantidade de fruta produzida por cada fornecedor em determinado intervalo de tempo é tratada como um parâmetro conhecido, e não como uma variável a ser otimizada.

[Munhoz e Morabito 2010] formularam um modelo de otimização linear e uma abordagem de programação por metas para otimizar o planejamento agregado de uma empresa do setor cítrico brasileiro, abrangendo etapas de colheita e processamento de laranjas. A formulação abrange decisões como a escolha da fazenda para realizar a colheita em determinado período, assim como a quantidade a ser colhida. Além disso, inclui decisões sobre o que e quanto fabricar de diferentes produtos ao longo do tempo, de forma a atender às demandas de produtos finais impostas pela fábrica. Destaca-se ainda que o modelo desenvolvido não tem como objetivo maximizar a qualidade da colheita das laranjas. Em vez disso, o fator qualidade da matéria-prima é representado por um parâmetro binário, que determina se a laranja pode ou não ser processada em determinado período, com base em sua curva de maturação. Assim, a qualidade da fruta é considerada apenas como um fator limitante para o processamento, não sendo, portanto, maximizada.

Inspirados neste estudo, [Munhoz e Morabito 2013] consideram a existência de incertezas na representação do modelo, especificamente na acidez das bases de laranja, crucial para a qualidade dos produtos finais. Eles desenvolveram um modelo linear de otimização robusta para lidar com incertezas e variabilidades inerentes do processo, sendo o primeiro artigo a utilizar essa técnica no contexto de PO aplicada à colheita de laranjas. Em continuidade a esses estudos, [Munhoz e Morabito 2014] unificaram as contribuições anteriores ao formular um modelo de otimização linear para o planejamento agregado de sucos concentrados de laranja e uma abordagem de otimização robusta para lidar com as variabilidades nos parâmetros de acidez das bases.

Enquanto [Munhoz e Morabito 2010] destinaram-se à otimização do planejamento agregado, abrangendo desde a colheita até a fabricação dos produtos finais, [Tavares e Munari 2024] exploraram o planejamento estratégico do plantio de laranjeiras, aplicado a uma empresa do setor cítrico brasileiro. Um modelo de otimização linear inteira mista foi formulado, tendo como objetivo maximizar a produção total de laranjas durante um horizonte de planejamento de 30 anos. Além do plantio, o modelo considera aspectos como a erradicação de árvores e o equilíbrio varietal. À medida que os anos passam, as laranjeiras tendem a perder produtividade, tornando-se economicamente inviável mantê-las. O modelo também estabelece limites mínimos e máximos de produção por variedade e por polo de fazendas, com o objetivo de evitar desequilíbrios na produção e prevenir a priorização de uma variedade sobre outras.

Apesar dos artigos anteriores fornecerem avanços para a aplicação da PO voltada à agricultura, nenhum deles focou exclusivamente na otimização da colheita de laranjas. [Munhoz e

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

Morabito 2010] concentraram-se nas etapas de processamento de frutas, enquanto [Tavares e Munari] se direcionaram, sobretudo, na estratégia de plantio em horizontes de planejamento extensos. Foi somente [Caixeta-Filho 2006] que desenvolveu uma formulação matemática direcionada exclusivamente para a colheita de laranjas. O autor propôs duas formulações para solucionar o problema de uma empresa real e comparou os resultados obtidos. A primeira visa maximizar o número de caixas de laranjas colhidas em um intervalo de tempo, enquanto a segunda tem como objetivo maximizar o lucro. A grande inovação e contribuição deste estudo está em maximizar um aspecto de qualidade de maturação das frutas na função objetivo do modelo, além de incluir questões biológicas como a queda natural de laranjas na abordagem.

A colheita de cultivos agrícolas, em termos gerais, é um processo sazonal que depende da maturação dos frutos ao longo do tempo. Dessa forma, observa-se uma grande similaridade entre essas características e as dos cultivos de citros. Considerando o reduzido número de publicações sobre a otimização da cadeia de suprimentos de citros, a ampliação dos estudos para outros cultivos mostra-se relevante.

Nesse viés, um cultivo bastante explorado na literatura científica e que apresenta boas semelhanças com as laranjas no que tange à colheita, é a cana-de-açúcar, vastamente difundida no território brasileiro. [Caixeta-Filho e Miyashita 2018] desenvolveram um modelo de otimização linear inteira mista para maximizar a receita gerada com sacarose, a partir da cana-de-açúcar. Para tal, ele utiliza parâmetros como o preço da sacarose e a porcentagem de conteúdo deste carboidrato por fazenda, que varia ao longo dos meses, respeitando uma curva de maturação. Além disso, o modelo fornece informações de quanto colher de cana a cada mês em determinadas fazendas, com o objetivo de satisfazer restrições de processamento mínimo nas usinas.

Abordagens matemáticas com múltiplas funções objetivo também estão presentes no contexto de colheita de cana-de-açúcar. [Florentino et al. 2018] propuseram um modelo de otimização inteira com três funções objetivo, aliado a uma formulação por metas e a uma heurística baseada em algoritmo genético. O objetivo principal é minimizar a soma dos desvios de colheita fora do período considerado ideal e o desvio máximo ao longo da safra. Além disso, para reduzir custos de realocação, a terceira função objetivo visa minimizar o número de fazendas a serem colhidas no mês. Outra abordagem multiobjetivo foi proposta por [Aliano Filho et al. 2021], que desenvolveram um modelo de otimização não-linear inteira mista, com o objetivo de minimizar os custos de colheita e transporte e os tempos de colheita. Diferentemente do trabalho anterior, o modelo não considera critérios relacionados à qualidade de maturação da cultura agrícola.

Outra cultura bastante estudada na literatura PO é a uva. [Ferrer et al. 2008] desenvolveram um modelo de otimização inteira mista voltado à otimização da colheita, alocação de recursos e roteamento de veículos em uma vinícola chilena. A solução obtida pelo modelo sugere quando e quanto colher de determinado bloco de uvas de forma a minimizar os custos do processo de colheita, incluindo custos associados à perda de qualidade das frutas, que cresce à medida que o momento de colheita se afasta do período de maturação máxima da fruta.

Similar à abordagem proposta por [Ferrer et al. 2008], [Arnaout e Maatouk 2010] desenvolveram um modelo de otimização inteira mista de planejamento da colheita e alocação de recursos. O estudo se diferencia do artigo de referência por não abordar a questão de roteamento das equipes de trabalho entre os campos. Nessa conjuntura, [Bohle et al. 2010] incorporaram uma estratégia de otimização robusta à problemática, considerando como incerteza o parâmetro de produtividade de mão de obra.

[González-Araya et al. 2015] formularam um modelo de otimização linear inteira mista para planejar a colheita de maçãs em fazendas do Chile. O modelo busca minimizar os custos totais do processo, incluindo custos com a perda da qualidade da fruta, semelhante à abordagem de [Ferrer et al. 2008]. Além de definir a quantidade de maçãs colhidas em cada pomar em determinado período, assim como o centro de processamento a que foram enviadas, a formulação retorna a alocação de trabalhadores nos campos e o número de contratações e demissões em cada intervalo de tempo.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

Outro cultivo abordado na literatura de PO é o óleo de palma. [Escallon-Barrios et al. 2022] utilizaram técnicas de simulação e modelagem matemática para otimizar o ciclo de colheita deste produto agrícola ao incorporar uma função de custo, que aumenta à medida que a colheita se distancia do intervalo ótimo de maturação da planta. Para facilitar a resolução do problema, os autores optaram por dividi-lo em partes menores, desenvolvendo três tipos de modelos. A primeira abordagem tem a finalidade de programar as visitas em cada campo e definir a quantidade de frutas colhidas dentro do horizonte de planejamento estabelecido. Além disso, foram propostos modelos de alocação de equipes de trabalho e de transporte, expandindo o escopo do estudo.

[Rocco e Morabito 2016b] formularam um modelo de otimização linear para minimizar os custos logísticos da cadeia de suprimentos de uma empresa processadora de tomates, envolvendo etapas desde a colheita até o processamento de matéria prima. Gastos com transporte de tomates dos campos aos centros de processamento e com a transferência de produtos semiprocessados entre as plantas fabris, além de custos de estocagem de bens finais e não acabados são considerados. O modelo ainda permite a compra de produtos intermediários em caso de falta nas fábricas, de modo a não impactar a produção. Como complemento a este estudo, [Rocco e Morabito 2016a] desenvolveram uma abordagem de otimização robusta, incorporando incertezas associadas ao rendimento da produção e à porcentagem de sólidos solúveis.

3. Caracterização do problema e modelagem matemática

O planejamento da colheita na Citricultura envolve desafios logísticos e operacionais. Considere uma empresa produtora de sucos e derivados de laranja, que controla o recebimento mensal de frutas de um amplo número de fazendas, distribuídas em diferentes regiões, com condições climáticas e agronômicas distintas. As fazendas são subdivididas em porções de terreno, chamadas de talhões, para facilitar o controle sobre o que é produzido. Embora uma fazenda possa produzir diferentes variedades de laranjas, cada talhão é dedicado ao cultivo de uma única variedade. Além disso, a empresa possui múltiplas plantas fabris, com capacidades mensais de extração próprias que não devem ser ultrapassadas. O transporte das frutas dos talhões até os centros produtivos envolve custos calculados com base na quantidade de caixas enviadas e na distância percorrida pelos caminhões. Além disso, para cada safra, a empresa obtém uma estimativa da produção total de caixas de laranja por talhão, que devem ser processadas integralmente pelos centros produtivos, para evitar desperdícios.

Para monitorar a qualidade das laranjas dos fornecedores, informações sobre o comportamento de maturação das frutas ao longo do tempo para cada talhão são de conhecimento da empresa, obtidas por meio da retirada de amostras de frutos dentro dos talhões. Dessa forma, a organização consegue acompanhar as medidas de diferentes critérios de qualidade para todos os seus terrenos mensalmente, auxiliando no controle da qualidade da matéria prima que chega às fábricas. Um desses critérios é conhecido como *ratio*, definido como a razão entre o teor de sólidos solúveis (Brix) e a acidez da fruta, que exerce um papel fundamental na rejeição ou aceitação de laranjas pela fábrica. Cada unidade fabril tem uma especificação mínima e máxima admissível para este critério. A quantidade de sólidos solúveis, aspecto de maturação que exerce um impacto direto sobre a qualidade dos produtos finais, é o parâmetro que orienta todo o planejamento da colheita.

Diante dessas condições, o problema reside na necessidade de programar a colheita dos talhões a fim de maximizar a quantidade de sólidos solúveis enviados às fábricas, atendendo aos requisitos técnicos das unidades de processamento e respeitando suas limitações operacionais. Busca-se auxiliar na tomada de decisões envolvendo quando e quanto colher de cada talhão durante os meses da safra, bem como a determinação do centro de processamento para o qual as frutas serão encaminhadas. Com isso, este trabalho propõe um modelo matemático para auxiliar empresas citrícolas na otimização do planejamento de sua colheita, garantindo que as laranjas sejam colhidas o mais próximo possível do seu período de maturação ideal, além de identificar a melhor alocação das cargas de fruta entre as diferentes plantas fabris, minimizando custos logísticos. O modelo matemático desenvolvido neste trabalho inspirou-se no modelo elaborado por [Caixeta-Filho

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

2006]. O presente estudo diferencia-se por incorporar múltiplos centros de processamento de frutas na modelagem, com capacidades operacionais próprias a serem respeitadas.

Para a modelagem, são considerados três conjuntos: *I, F* e *T*. O conjunto *I* representa os talhões analisados; *F* é o conjunto de fábricas ou centros de processamento de laranja; e T refere-se aos meses do horizonte de planejamento. O Quadro 1 descreve todos os parâmetros utilizados no modelo.

Quadro 1 – Descrição dos parâmetros do modelo matemático.

Parâmetro	**Descrição**
Q_{it}	Quantidade total estimada de caixas de laranja no talhão $i \in I$ no período $t \in T$
SS_{it}	Quantidade de sólidos solúveis por caixa no talhão $i \in I$ no período $t \in T$
R_f^{MAX}	*Ratio* máximo desejado no centro de processamento $f \in F$
R_f^{MIN}	*Ratio* mínimo desejado no centro de processamento $f \in F$
C_f	Capacidade de produção, em caixas de laranja, do centro $f \in F$
PS	Preço de 1 kg de sólidos solúveis, em US$
CT	Custo de transporte, em US$/caixa/Km
r_{it}	*Ratio* do talhão $i \in I$ no período $t \in T$
d_{if}	Distância entre o talhão $i \in I$ e o centro de processamento $f \in F$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Seja x_{ift} a variável de decisão que denota a fração de laranjas do talhão $i \in I$ colhidas e enviadas ao centro de processamento $f \in F$ durante o período $t \in T$. O modelo de otimização proposto neste trabalho é dado por:

$$Max \quad PS \sum_{i \in I} \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{t \in \mathcal{T}} SS_{it}\, Q_{it} x_{ift} \quad - \quad CT \sum_{i \in I} \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{t \in \mathcal{T}} d_{if}\, Q_{it} x_{ift} \tag{1}$$

Sujeito a

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} Q_{it}\, x_{ift} \leq C_f, \quad \forall f \in \mathcal{F}, \forall t \in \mathcal{T}, \tag{2}$$

$$x_{ift} = 0, \quad \forall i \in I, \forall f \in \mathcal{F}, \forall t \in \mathcal{T} : r_{it} > RMAX_f, \tag{3}$$

$$x_{ift} = 0, \quad \forall i \in I, \forall f \in \mathcal{F}, \forall t \in \mathcal{T} : r_{it} < RMIN_f, \tag{4}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{ift} = 1, \quad \forall i \in I, \tag{5}$$

$$x_{ift} \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall f \in F, \forall t \in T. \tag{6}$$

A função objetivo (1) visa maximizar o lucro estimado da atividade de colheita, composto pela receita gerada a partir dos sólidos solúveis, e pelo custo de transporte dos talhões aos centros de processamento de laranja. A receita é determinada pelo produto do preço de um quilograma de sólidos (PS) pela massa total de sólidos obtida ao longo da colheita. É importante destacar que o produto $Q_{it}x_{ift}$ representa a quantidade de laranjas que foram colhidas do talhão $i \in I$ no período $t \in T$ e que foram enviadas ao centro $f \in F$. O custo de transporte é obtido pelo produto do custo unitário de transporte (CT, em US$/caixa/km), da quantidade de caixas transportadas e da distância entre os talhões e os centros de processamento, somados ao longo do horizonte de planejamento.

As restrições (2) impõem uma capacidade máxima de processamento para cada fábrica mensalmente. As restrições (3) e (4) são requisitos técnicos de especificação máximas e mínimas de *ratio*, fundamentais para o controle de qualidade da fruta que chega nas fábricas. Assim, se os níveis de *ratio* de um talhão não forem aceitáveis para os padrões de qualidade impostos, a colheita deste não pode ser realizada no período respectivo. As restrições (5) garantem que todos os talhões

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

devem ser colhidos completamente durante o horizonte de planejamento. Por fim, as restrições (6) definem o domínio das variáveis de decisão.

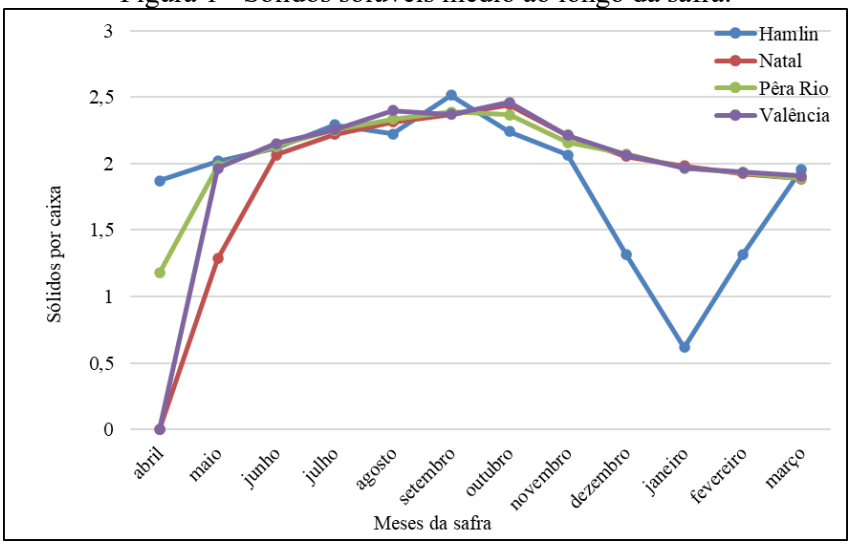
4. Levantamento de dados

Para validar a modelagem proposta, foi realizado um levantamento de dados representativos de uma safra de laranjas, cuja temporada de colheita inicia-se em abril e termina em março do ano seguinte. É importante destacar que os dados utilizados para a obtenção dos parâmetros foram fornecidos por uma empresa brasileira do setor citrícola. Diante disso, tem-se um total de 20 fazendas, 1639 talhões e três centros de processamento. Ressalta-se ainda que cada talhão é destinado exclusivamente ao cultivo de uma única variedade de laranja. No total, a quantidade de laranjas produzidas na safra foi de aproximadamente 29,77 milhões de caixas de 40,8 kg cada. Foram considerados quatro grupos de variedades de laranja: Hamlin, Natal, Valência e Pêra Rio. Devido às diferenças no comportamento de maturação entre as espécies, há um balanceamento nas quantidades de talhões alocados para cada variedade. Esse balanceamento é evidenciado pela distribuição de talhões por grupo de variedade: Hamlin foi cultivada em 404 talhões, Pêra Rio em 482, Natal em 300 e Valência em 453.

Outro aspecto relevante para este trabalho está relacionado às características de maturação de cada variedade, uma vez que elas provocam um impacto direto na colheita e na qualidade dos produtos fabricados a partir da laranja. Os dados relacionados à maturação dos frutos de cada variedade foram fornecidos pela empresa, a partir de curvas de maturação de cada variedade de laranja ao longo da safra, variando por região. Na Figura 1, são apresentados os valores médios da quantidade de sólidos solúveis por caixa para as variedades estudadas durante a temporada para os talhões fornecidos. Já a Figura 2 ilustra o comportamento do parâmetro *ratio* médio das fazendas durante os meses de safra analisados.

Os parâmetros de especificação relacionados ao *ratio* mínimo e máximo foram fornecidos diretamente pela empresa alvo deste estudo. Definiu-se um *ratio* mínimo de 13 e um máximo de 18, aplicáveis a todos os centros de processamento. No que tange aos parâmetros de preço dos sólidos solúveis e do custo de transporte de laranja das fazendas aos centros produtivos, presentes na função objetivo do modelo, foram mantidos os valores empregados no trabalho de [Caixeta Filho 2006], mantendo assim o sigilo dos dados da empresa, e a fim de permitir possíveis comparações entre as abordagens formuladas e preservar os pesos da função objetivo do modelo desenvolvido. Dessa forma, para o parâmetro de preço de sólidos solúveis e custo de transporte foram fixados valores respectivos a US$ 2.30/kg e US$ 0.004/caixa/km.

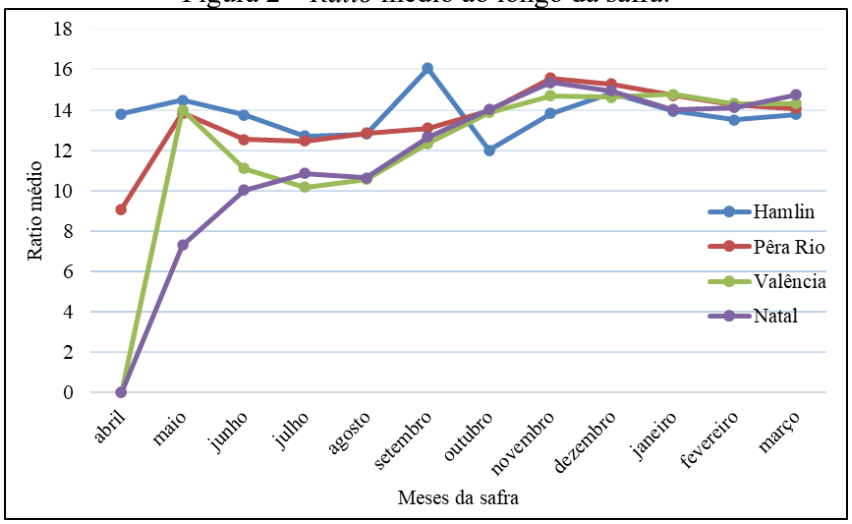
Figura 1 - Sólidos solúveis médio ao longo da safra.



Fonte: Elaborado pelo autor

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

Figura 2 – *Ratio* médio ao longo da safra.



Fonte: Elaborado pelo autor

5. Resultados e Discussão

O modelo matemático proposto foi implementado computacionalmente em linguagem de programação Python, utilizando o software CPLEX Optimization Studio versão 22.1.0.0 como *solver* de otimização de propósito geral. Experimentos computacionais foram realizados em um computador com processador Ryzen 2500U e 12 GB de memória RAM. Foram considerados dois cenários de testes elaborados a partir dos dados coletados. Esses cenários têm a finalidade de representar situações produtivas, permitindo uma análise comparativa sobre como diferentes condições operacionais podem impactar na qualidade da fruta fornecida e na estabilidade de produção ao longo da safra.

O primeiro cenário de testes visa representar uma situação em que a empresa analisada apresenta uma disponibilidade muito grande em sua capacidade produtiva, especialmente quando comparada à quantidade total estimada de laranjas para a safra. Dessa forma, este cenário tem como finalidade suavizar um dos principais limitantes do modelo, a restrição de capacidade, a qual estabelece a quantidade máxima a ser processada por cada centro de processamento mensalmente. Assim, para os parâmetros fornecidos, adotou-se uma capacidade de processamento de 10 milhões de caixas para cada unidade produtiva, totalizando 30 milhões de caixas.

Em contrapartida, o segundo cenário de testes desenvolvido tem como objetivo analisar como a colheita é programada em um panorama onde a capacidade de produção é extremamente limitada. Nesse contexto, espera-se que a colheita seja forçada a acontecer continuamente durante um intervalo de tempo mais amplo, para conseguir atender toda a demanda de colheita na safra, o que, por outro lado, pode impactar em uma perda de qualidade das frutas devido à não colheita no período ideal. Este cenário é o que mais se aproxima da realidade da empresa analisada, pois, para assegurar um fluxo constante de produção, a organização precisa realizar a colheita ao longo de toda a temporada. Diante disso, adotou-se o limite máximo de 900 mil caixas para cada unidade produtiva, totalizando uma capacidade de produção mensal de 2,7 milhões de caixas de laranja.

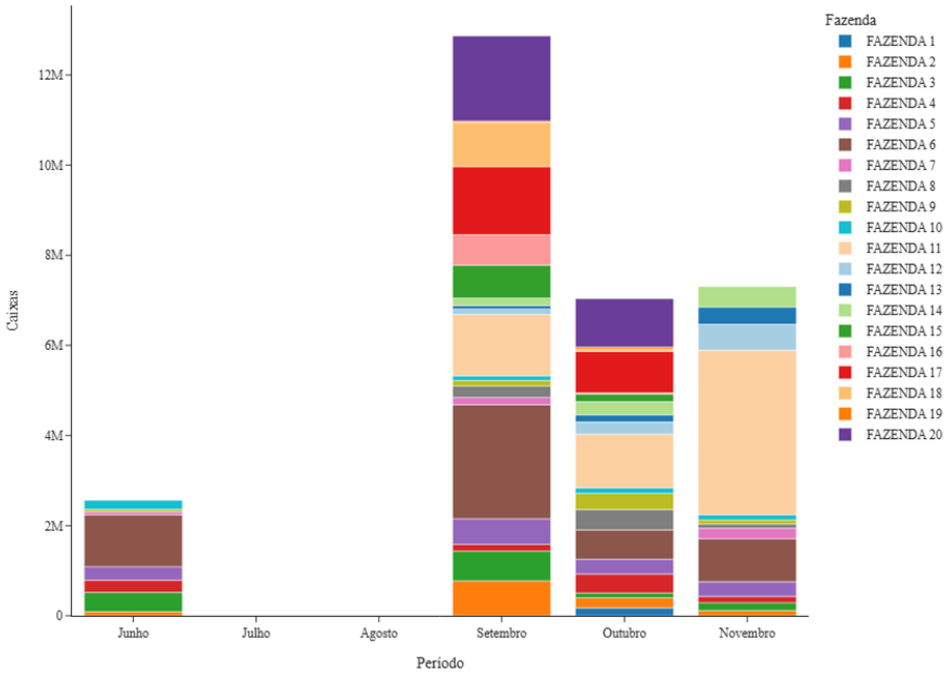
Para o primeiro cenário de testes, o *solver* encontrou uma solução ótima em um curto intervalo de tempo, mais precisamente em 0,56 segundos. Além disso, o lucro fornecido pela função objetivo foi de US$ 144.589.854.87. No que tange à quantidade de sólidos solúveis, foram obtidas 70,43 mil toneladas destes. Finalmente, no que se refere aos custos de transporte envolvidos, obteve-se um valor monetário de 17,39 milhões de dólares. A Figura 3 ilustra graficamente a distribuição de caixas mensais realizadas ao longo da safra, incluindo todos os centros de processamento.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

Para o Cenário 2, uma solução ótima foi encontrada em 1,16 segundos, com um lucro de US$131.441.842 e um custo de transporte de 19,04 milhões de dólares. Além disso, a quantidade de sólidos solúveis atingiu 65,43 mil toneladas, o que representa uma redução considerável em relação ao Cenário 1. A Figura 4 apresenta um gráfico com a distribuição de caixas mensais colhidas ao longo da temporada, agregando todos os centros produtivos. É possível notar uma grande estabilidade na colheita que, diferentemente do Cenário 1, ocorre ao longo de toda a safra.

Ao observar os resultados dos experimentos apresentados, nota-se uma facilidade de execução do modelo. Apesar deste otimizar o planejamento da colheita em uma visão micro, por talhão, e considerando o elevado número de dados fornecidos, o *solver* demonstrou-se bastante eficiente e responsivo, fornecendo soluções ótimas em um tempo médio inferior a 1 segundo.

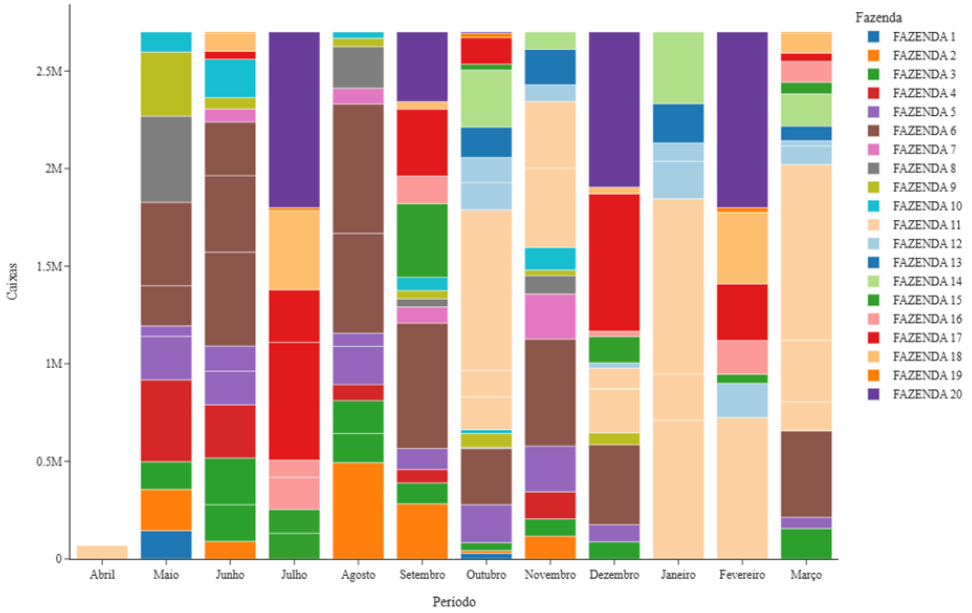
Figura 3 – Programação da colheita Cenário 1.



Fonte: Elaborado pelo autor

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

Figura 4 – Programação da colheita para o Cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

No que diz respeito às soluções fornecidas para cada cenário, é possível perceber uma nítida distinção entre eles. No Cenário 1, projetado para simular uma situação de excesso de capacidade produtiva, a colheita foi realizada em apenas quatro meses (junho, setembro, outubro e novembro), nos quais a concentração de sólidos solúveis é máxima, ou próxima disso, para as variedades de laranja analisadas, conforme ilustra o gráfico da Figura 1. Além disso, em virtude do excesso de capacidade, os custos de transporte dos talhões aos centros de processamento são bem inferiores, pois, em suma, cada talhão é enviado exclusivamente à unidade produtiva mais próxima.

Em contrapartida, para o Cenário 2, devido à rígida limitação na capacidade mensal de cada fábrica, a colheita foi realizada em todos os meses da safra. Todavia, apesar deste cenário garantir uma estabilidade na entrega de frutas aos centros produtivos, característica esta desejada por grande parte das organizações, a qualidade da fruta foi prejudicada. Nesse viés, observa-se uma redução considerável de 7,53% da quantidade de sólidos solúveis em relação ao Cenário 1, além de um aumento de 9,49% no custo de transporte, visto que, um número significativo de fazendas enviou laranjas para mais de um centro de processamento.

Assim, diante dos resultados expostos, pode-se afirmar que os cenários desenvolvidos ilustram situações típicas do setor citrícola, a depender do contexto da empresa. O primeiro cenário mostra-se mais adequado para empresas que desejam extrair o máximo de qualidade das suas matérias primas, e que não tenham a estabilidade da produção ao longo da safra como prioridade. Nesse caso, é importante que as empresas sejam flexíveis o suficiente para contornar possíveis ociosidades durante a temporada de colheita, adequando, por exemplo, sua capacidade de produção ao longo dos meses. O segundo cenário, por sua vez, é aplicável a organizações com capacidade de produção fixas e limitadas, que tenham como uma de suas prioridades a produção estável ao longo dos meses, a fim de não incorrer em perdas financeiras por operar de maneira ociosa.

Por fim, é de suma relevância comparar o foco das análises desenvolvidas neste trabalho com o artigo de [Caixeta-Filho 2006], cuja abordagem serviu de inspiração para a elaboração do modelo matemático desse estudo. Enquanto [Caixeta-Filho 2006] se propôs a analisar os impactos na qualidade das frutas e no lucro obtidos entre uma abordagem tradicional, que visava maximizar a quantidade de laranjas colhidas ao longo da safra, e um modelo destinado à maximização dos sólidos solúveis, o presente trabalho se propôs a analisar como diferentes restrições produtivas

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

afetam diretamente a qualidade das frutas colhidas e a distribuição de colheita ao longo da safra, diante de um modelo formulado para maximizar a qualidade das frutas.

6. Considerações Finais

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de otimização linear para planejar a colheita e a distribuição de laranjas entre os talhões e os centros de processamento ao longo da safra, com base em curvas de maturação características de diferentes variedades. O modelo foi aplicado a dois cenários, com dados reais de uma empresa do setor citrícola, variando-se a capacidade de produção de três fábricas. Os resultados dos testes evidenciaram que o parâmetro de capacidade exerce grande impacto na qualidade das laranjas, obrigando a colheita a ser realizada fora do intervalo de maturação ótimo da fruta à medida que a capacidade de produção é restringida. A partir dos testes realizados, conclui-se que o uso do modelo é efetivo e aplicável a diferentes contextos relacionados e, por maximizar a qualidade das laranjas, pode ser visto como uma ferramenta importante para promover a vantagem competitiva empresarial.

Como limitações da pesquisa, destaca-se a não consideração de incertezas na modelagem. Parâmetros chaves do modelo são obtidos através de estimativas e previsões, como a quantidade de sólidos solúveis e *ratio* dos talhões ao longo do tempo, extraídos de curvas de maturação, e a estimativa de produção dos fornecedores para a safra. Essas variações, se muito acentuadas, poderiam ocasionar uma perda de relevância dos resultados gerados pelo modelo para a empresa. Desse modo, abordagens envolvendo programação estocástica ou otimização robusta, que ofereçam um melhor aporte e resiliência para lidar com variabilidades inerentes do processo, são temas interessantes de pesquisa para trabalhos futuros.

Referências

Aliano Filho, A.; Melo, T.; Pato, M. V. (2021). A bi-objective mathematical model for integrated planning of sugarcane harvesting and transport operations. *Computers and Operations Research*, 134.

Arnaout, J.-P. M.; Maatouk, M. (2010). Optimization of quality and operational costs through improved scheduling of harvest operations. *International Transactions in Operational Research*, 17:595–605.

Bohle, C.; Maturana, S.; Vera, J. (2010). A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. *European Journal of Operational Research,* 200:245–252.

Caixeta-Filho, J. V. (2006). Orange harvesting scheduling management: A case study. *Journal of the Operational Research Society,* 57:637–642.

Caixeta-Filho, J. V.; Miyashita, A. E. (2018). Continuous periods for harvesting schedules: A numerical application for the Brazilian sugarcane industry. *Pesquisa Operacional*, 38:535–554.

CNA, CEPEA. (2024). PIB do agronegócio. `https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_CNA_1triBoletim%20MT%20Agro_2024.pdf`. Acessado: 2025-02-05.

Escallon-Barrios, M.; Castillo-Gomez, D.; Leal, J.; Montenegro, C.; Medaglia, A. L. (2022). Improving harvesting operations in an oil palm plantation. *Annals of Operations Research*, 314:411–449.

Ferrer, J.-C.; Cawley, A. M.; Maturana, S.; Tolaza, S.; Vera, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*, 112:985–999.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br

Florentino, H. de O.; Irawan, C.; Aliano Filho, A.; Jones, D. F.; Cantane, D. R.; Nervis, J. J. (2018). A multiple objective methodology for sugarcane harvest management with varying maturation periods. *Annals of Operations Research*, 267:153–177.

Fundecitrus. (2024). Estimativa da safra de laranja 2024/25 do cinturão citrícola de são paulo e triângulo/sudoeste mineiro: cenário em maio/2024. https://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes_relatorios/2024_05_10_Estimativa_do_Cinturao_Citricola_2024-2025.pdf. Acessado: 2025-02-05.

González-Araya, M. C.; Soto-Silva, W. E.; Espejo, L. G. A. (2015). Harvest planning in apple orchards using an optimization model. *International Series in Operations Research and Management Science*, 224:79–105.

Goodarzian, F.; Fakhrzad, M. B. (2021). A new multi-objective mathematical model for a citrus supply chain network design: Metaheuristic algorithms. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 14:127–144.

Goulart, P. F. P (2012). Fisiologia Pós Colheita. In: Silva, J. C. da; Silva, A. A. S. (org.). Sustentabilidade produtiva do cerrado. Composer, Uberlândia.

Mattos Junior, D.; De Negri, J. D.; Pio, R. M.; Pompeu Junior, J. (Orgs.). (2005). Citros. 1. ed. Instituto Agronômico e FAPESP, Campinas.

Munhoz, J. R.; Morabito, R. (2010). Optimization in the aggregate production planning in frozen concentrated orange juice processing industry. *Gestão e Produção*, 17:465–481.

Munhoz, J. R.; Morabito, R. (2014). Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company: A Brazilian case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107:45–57.

Munhoz, J. R.; Morabito, R. A. (2013). A robust optimization approach for the aggregate production planning in the citrus industry. *Produção*, 23:422–435.

Rocco, C. D.; Morabito, R. (2016a). Robust optimisation approach applied to the analysis of production/logistics and crop planning in the tomato processing industry. *International Journal of Production Research*, 54:5842–5861.

Rocco, C. D.; Morabito, R. (2016b). Production and logistics planning in the tomato processing industry: A conceptual scheme and mathematical model. *Computers and Electronics in Agriculture,* 127:763–774.

Tavares, C.; Munari, P. (2024). Strategic planning in citriculture: An optimization approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 222:109052.

USDA. (2024). Citrus: world markets and trade https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf. Acessado: 2025-02-05.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212484
https://proceedings.science/p/212484?lang=pt-br