

MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO PARA A SELEÇÃO DE AGENTES INDUTORES DE MATURAÇÃO APLICADOS NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

CARMO, Carlos Roberto Souza¹

Recebido em: 2020.09.08

Aprovado em: 2020.10.17

ISSUE DOI: 10.3738/1982.2278.3839

RESUMO: Considerando a relevância do setor sucroenergético para a economia brasileira, bem como a necessidade de se produzir metodologias de apoio à tomada de decisões para um segmento econômico tão relevante, a presente pesquisa teve por objetivo propor um modelo matemático de otimização voltado para o planejamento de gastos a serem realizados na aquisição de agentes indutores de maturação, com vistas ao atendimento da demanda total por sacarose de empreendimentos agrícolas produtores de cana-de-açúcar, e, ainda, a escolha das melhores alternativas em relação à identificação, compra e aplicação desse tipo de agente fisiológico. Utilizando técnicas de programação linear inteira e o método de Programação por Metas Ponderadas, ou ainda, *Weighted Goal Programming*, em três cenários compostos por dezoito, trinta e sessenta talhões, o modelo proposto nesta investigação científica foi implementado e validado computacionalmente, produzindo um conjunto de informações gerenciais que foi além das variáveis relacionadas à produtividade, demanda de sacarose e aos valores orçamentários. Ou seja, foi possível identificar também quanto comprar de cada tipo de maturador, quanto seria gasto por tipo de maturador, e, ainda, em que talhão cada maturador deveria ser aplicado para que se atingisse a máxima produtividade de sacarose mediante a interação entre o respectivo agente indutor e determinada variedade de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Maturadores. Programação por Metas Ponderadas. Métodos quantitativos aplicados.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION FOR THE SELECTION OF RIPENERS APPLIED IN SUGARCANE CULTURE

SUMMARY: Considering the relevance of the sugar-energy sector to the Brazilian economy, as well as the need to produce methodologies to support decision-making for such a relevant economic segment, the present research aimed to propose a mathematical optimization model aimed at planning expenses to be incurred in the acquisition of agents that induce maturation (ripeners), with a view to meeting the total demand for sucrose from agricultural enterprises that produce sugarcane, and also the choice of the best alternatives in relation to the identification, purchase and application of this type of chemical agent. Using techniques of whole linear programming and the Weighted Goal Programming method, in three scenarios composed of eighteen, thirty and sixty plots, the model proposed in this scientific investigation was implemented and computationally validated, producing a set of management information that went beyond variables related to sucrose demand and productivity and budget values. In other words, it was also possible to identify how much to buy of each type of ripener, how much would be spent per type of ripener, and also, in which field each ripener should be applied in order to achieve maximum sucrose productivity through the interaction between the respective chemical inducing agent and certain variety of sugarcane.

Keywords: Ripeners. Weighted Goal Programming. Quantitative methods applied.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é o produto agrícola brasileiro com a terceira maior área cultivada no país (LORIZOLA; CAPITANI, 2018). Com uma área plantada total em torno de nove milhões de hectares, predominantemente na região centro-sul, além da região Nordeste, observa-se um volume de investimentos internacionais crescente neste segmento econômico, além do aumento das operações de fusões e incorporações de empresas do setor sucroenergético do Brasil (LORIZOLA; CAPITANI, 2018).

¹ ORCID iD - <https://orcid.org/0000-0002-3806-9228> Faculdade de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Uberlândia

Diante da intensificação das atividades econômico-produtivas relacionadas à cultura da cana-de-açúcar, é natural que a busca por maiores níveis de produtividade e menores custos se intensifique também, pois, conforme observam Nervis *et al.* (2017), com o crescimento do setor sucroenergético, a complexidade dos problemas desse segmento têm aumentado consideravelmente, e isso, por sua vez, faz com que as demandas relacionadas à produção de conhecimento voltado para a otimização da produção, colheita e processamento da cana-de-açúcar se intensificassem e diversificassem.

Especialmente em relação aos problemas técnico-operacionais envolvendo o manejo da colheita, pode-se observar que as diversas cultivares de cana-de-açúcar plantadas em um mesmo empreendimento agrícola tendem a atingir os respectivos pontos de maturação e colheita de forma simultânea ou, no mínimo, em intervalos de tempo muito próximos ou até sobrepostos.

A fim de realizar o manejo da colheita da cana-de-açúcar de forma a melhorar o planejamento da safra, os produtores brasileiros têm feito uso de agentes fisiológicos indutores de maturação. Além de facilitar o planejamento da safra e flexibilizar a gestão da colheita, os agentes indutores de maturação também possuem a capacidade melhorar a qualidade da matéria-prima demandada pelas indústrias do setor sucroenergético (VIANA *et al.*, 2017).

Contudo, independentemente das facilidades proporcionadas pelo uso dos indutores de maturação, o investimento realizado neste tipo de substância deve proporcionar o respectivo retorno, e nesse sentido, a relação entre investimento realizado e retorno esperado assume grande relevância.

Na cultura da cana-de-açúcar, o processo de seleção do melhor agente indutor de maturação disponível, ao menor custo de aquisição possível, pode assumir graus muito elevados de complexidade, pois, nem sempre o agente com menor custo é capaz de apresentar os melhores resultados, ou ainda, os resultados decorrentes da aplicação de determinado agente fisiológico em certo cultivar de cana-de-açúcar podem não ser os mesmos quando utilizado em outro tipo de cultivar.

Nesse contexto, a presente pesquisa teve por objetivo propor um modelo matemático de otimização voltado para o suporte à tomada de decisões envolvendo o planejamento de gastos decorrentes da aquisição de agentes indutores de maturação, com vistas ao atendimento da demanda total por sacarose de empreendimentos produtores de cana-de-açúcar ao longo da respectiva safra.

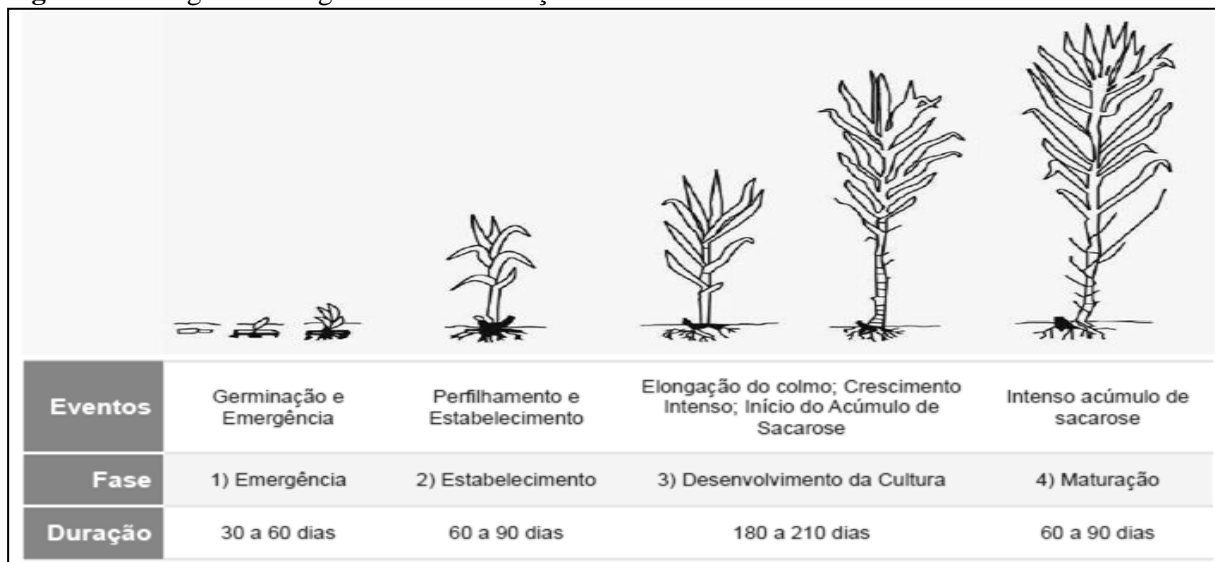
Para atingir o objetivo proposto para esta investigação científica, inicialmente, buscou-se promover o embasamento teórico acerca da temática relacionada ao processo de maturação da cana-de-açúcar e, ainda, foram analisados os resultados de pesquisas com experimentos

envolvendo o uso dos maturadores e seus efeitos sobre a produtividade de sacarose da cana. A seguir, foi pesquisado e apresentado o modelo matemático de otimização objeto de estudo desta pesquisa, e ainda, foi definido o respectivo método de solução. Na sequência, foi descrito o processo de formação da base de dados que viabilizou a realização dos testes computacionais implementados para validação do modelo proposto. Por fim, foram analisados os resultados identificados a partir dos testes computacionais realizados para validação do modelo de otimização proposto na presente investigação científica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A cultura da cana-de-açúcar passa por quatro estágios fenológicos bem característicos, ou seja, emergência, estabelecimento, desenvolvimento e maturação, conforme resumido na Figura 1 (MARIN *et al.*, 2009).

Figura 1 - Estágios fenológicos da cana-de-açúcar



Fonte: Marin *et al.* (2009, p.115).

Especificamente nos meses finais do ciclo da cultura, a cana-de-açúcar diminui o seu crescimento vegetativo e passa a acumular sacarose de forma mais intensa, dando início à fase da maturação.

O processo de maturação pode ser iniciado naturalmente a partir da ocorrência de algum tipo de estresse ambiental, por exemplo, deficiência hídrica, redução do fotoperíodo ou o frio (MARIN *et al.*, 2009), ou pode ser induzida quimicamente com o auxílio de agentes indutores de maturação.

Do ponto de vista econômico, a maturação natural da cana-de-açúcar não é considerada economicamente viável e, do ponto de vista técnico-fisiológico, a maturação induzida por estresse hídrico só é possível nas áreas de cultivo irrigado, como acontece em algumas regiões

produtoras do nordeste brasileiro. Dessa forma, os produtores costumam lançar mão do uso de agentes indutores de maturação (maturadores) para viabilizar economicamente o processo de maturação da cana e facilitar o manejo do processo de colheita (LOPES, 2011; ROBERTO *et al.*, 2015).

De acordo com Leite, Crusciol e Silva (2011), os maturadores podem ser definidos como agentes reguladores formados por compostos químicos destinados a alterar a morfologia e fisiologia vegetal, de forma a retardar o seu desenvolvimento vegetativo e induzir a translocação e o armazenamento da sacarose, caracterizando-se como um meio auxiliar do processo de planejamento da colheita da cana, bem como, do seu manejo varietal.

Os resultados de investigações como a de Viana *et al.* (2015) sinalizam que, devido às alterações geradas no ambiente produtivo, a utilização de maturadores pode provocar desarranjos de natureza morfofisiológicas nas plantas. Por outro lado, algumas pesquisas sobre a ação dos maturadores também indicam que, além de permitir o planejamento da safra a partir da flexibilização em relação ao momento de realização da colheita da cana-de-açúcar, os maturadores podem melhorar a qualidade da matéria-prima demandada pela indústria sucroenergética (DIDIER *et al.*, 2017; INOUE *et al.*, 2015; OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2016; CRUSCIOL *et al.*, 2017).

De uma maneira geral, os resultados das pesquisas relacionadas ao uso dos maturadores e seus efeitos sobre a produtividade de sacarose da cana indicam que os diferentes agentes utilizados apresentam ações distintas entre si, ou ainda, diferentes resultados para um mesmo maturador, de acordo com a cultivar em que é aplicado, ou o local de utilização, sua combinação com outras substâncias, entre fatores, conforme mostram a informações contidas no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultados de pesquisas relacionadas ao uso de maturadores na cultura da cana-de-açúcar
(Continua)

Principal objetivo de estudo	Fonte	Principal resultado
Avaliar a eficiência do bispiribaque sódico utilizado como maturador químico na cultura da cana-de-açúcar, comparativamente à ação do sulfometuron-metil e do etil-trinexapac.	Inoue <i>et al.</i> (2015)	Entre outros resultados, foi observado que todos os tratamentos com maturadores proporcionaram aumento dos níveis percentuais de sacarose presente no caldo da cana (Pol), sem a ocorrência de decréscimos na produtividade agrícola.
Avaliar as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar a partir de tratamentos com indutor de maturação (ethephon a 480 g ha ⁻¹) em duas variedades de cana-de-açúcar (IACSP95-5000 e a IACSP94-2094), e, ainda, sua associação ao déficit hídrico.	Roberto <i>et al.</i> (2015)	O efeito do ethephon na cana-de-açúcar foi genótipo-dependente, sendo capaz de estimular o acúmulo de sacarose na variedade responsiva (IACSP95-5000), e, a associação entre a aplicação do ethephon e déficit hídrico não aumentou o teor de sacarose.

Quadro 2 – Resultados de pesquisas relacionadas ao uso de maturadores na cultura da cana-de-açúcar
(Conclusão)

Avaliar comparativamente os efeitos de seis maturadores químicos (glifosato, paraquat, fluazifop-butil, ethephon, etil-trinexapac, sulfometuron metil) e o nitrato de potássio (KNO ₃) sobre as variáveis relacionadas à produtividade agrícola (quantidade de colmos por hectare, diâmetro médio e tonelada produzida por hectare) e variáveis tecnológico-qualitativas da cana (Brix, Pol e açúcar recuperável),	Oliveira Filho <i>et al.</i> (2016)	O KNO ₃ contribuiu para melhoria da qualidade tecnológica da cana, pois, promoveu o aumento da produtividade agrícola dos colmos. Em relação às variáveis tecnológico-qualitativas da cana, o sulfometuron metil e o KNO ₃ promoveram incrementos nos níveis percentuais de sacarose presente no caldo da cana (Pol), entre outros parâmetros.
Comparar os resultados do glifosato e do etil-trinexapac em relação à produtividade agrícola da cana e ao rendimento tecnológico-qualitativo (incremento de sacarose), considerando que esses dois compostos atuam em diferentes processos bioquímicos.	Orgeron <i>et al.</i> (2016)	O etil-trinexapac aumentou a concentração de sacarose em 8,7% e o glifosato em 13%. Contudo, o etil-trinexapac reduziu o rendimento agrícola de cana-de-açúcar (produtividade de cana), e, por sua vez, o glifosato não reduziu a produtividade/rendimento agrícola.
Avaliar os efeitos do amadurecimento induzido com fluazifop-butil na produção de cana-de-açúcar e no seu teor de açúcar.	Muhwiridza <i>et al.</i> (2016)	O fluazifop-butil aumentou o rendimento de açúcar por hectare de cana-de-açúcar, embora ele possa provocar reduções na produtividade agrícola da cana-de-açúcar.
Avaliar os parâmetros de qualidade tecnológica (Brix, Pol, açúcares redutores, açúcares redutores totais, fibra, pureza, umidade e açúcar teórico recuperável) e produtivos (toneladas de colmos por hectare e toneladas de açúcar por hectare) da cana-de-açúcar submetida à aplicação dos maturadores químicos glifosato e ethephon, bem como, de compostos de radicais carboxílicos orgânicos, no início de safra.	Viana <i>et al.</i> (2017)	A aplicação de glifosato em conjunto com os compostos de radicais carboxílicos orgânicos propiciou um maior incremento nos parâmetros tecnológico-qualitativo da cana-de-açúcar a partir de 15 dias após a aplicação, e, a aplicação do glifosato causou incrementos após 30 da aplicação.
Avaliar a influência dos reguladores vegetais da classe dos inibidores de crescimento sulfometuron metil, glifosato e compostos de radicais carboxílicos orgânicos misturados ao glifosato, no desenvolvimento da cana-de-açúcar, no acúmulo de sacarose (Pol), na produtividade de colmos, na atividade invertase e n rebrotação da soqueira, no meio da safra.	Crusciol <i>et al.</i> (2017)	O uso dos reguladores vegetais influenciou positivamente a qualidade tecnológica da cana, com especial atenção ao aumento do teor de polpa. Adicionalmente, foi constatado que, sob condições climáticas desfavoráveis ao amadurecimento, o sulfometuron metil e glifosato foram mais eficientes em relação ao aumento do teor de sacarose, comparativamente ao tratamento com a mistura de compostos carboxílicos orgânicos e glifosato
Determinar a melhor resposta de certas variedades de cana-de-açúcar (NCo376 e SP711406) cultivadas na região norte da Costa do Marfim, em relação ao efeito de maturação do glifosato e ao atraso na colheita após sua aplicação.	Didier <i>et al.</i> (2017)	O glifosato melhorou o teor de sacarose e o açúcar recuperável das variedades tratadas. Foram constatados incrementos de sacarose na ordem de 1,6% e de açúcar recuperável em torno de 1,5% de açúcar.

Fonte: elaborado pelo autor, a partir dos dados pesquisa.

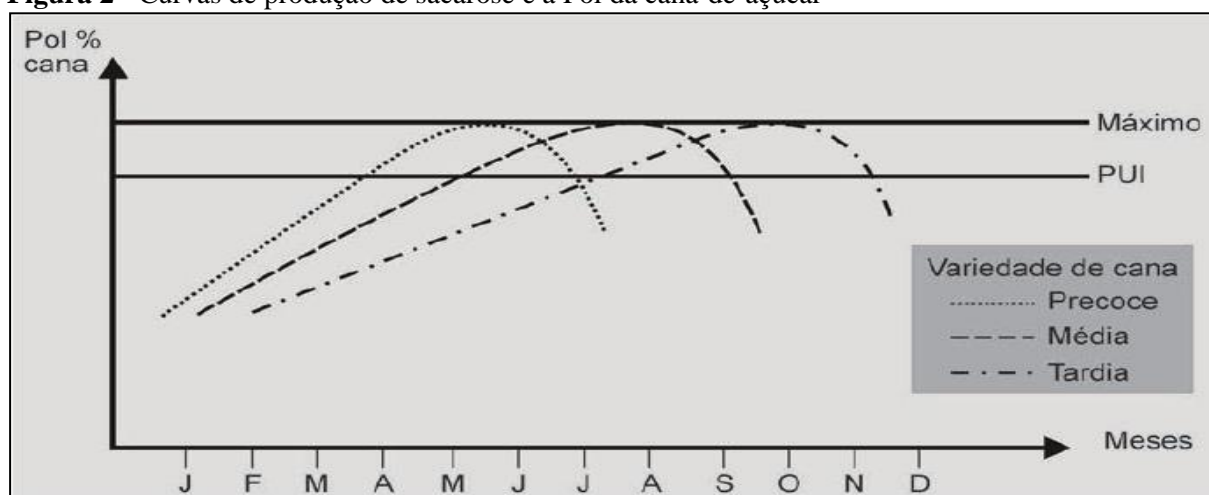
Conforme pode ser visto no Quadro 2, uma das principais medidas utilizadas para avaliar os efeitos dos maturadores sobre a produtividade da cana-de-açúcar é o nível percentual de sacarose presente do caldo da cana (Pol), além de outras medidas como Brix, pureza, percentual de fibra e dos açúcares redutores, entre outras.

Os níveis de Pol assumem grande relevância no processo de planejamento do plantio até a industrialização, passando pelos processos de cultivo e colheita. A Pol tende a variar de acordo

com o estágio fenológico em que a cana se encontra, mas, na maturação, ela passa a assumir maior relevância, visto que, ela está diretamente relacionada à qualidade da cana-de-açúcar destinada ao processo de industrialização.

Os níveis de Pol caracterizam-se como um importante indicador utilizado para definir o intervalo em que a cana-de-açúcar apresenta teores satisfatórios de sacarose para a sua utilização pela indústria sucroenergética, sendo que, a existência de teores satisfatórios de sacarose não indica o teor máximo que determinada variedade pode atingir. Ou seja, teores satisfatórios de sacarose representam o teor mínimo recomendado para o processo de industrialização da cana-de-açúcar, dentro do chamado período útil de industrialização (PUI) (LOPES, 2011), conforme mostra a Figura 2

Figura 2 - Curvas de produção de sacarose e a Pol da cana-de-açúcar



Fonte: Lopes (2011, p.41).

Ao relacionar a época de maturação com os níveis de Pol considerados satisfatórios para o processo de industrialização, na região Centro-sul do Brasil, as variedades de cana-de-açúcar podem ser classificadas como precoces, médias ou tardias, isto é: quando a maturação ocorre de maio a junho, a variedade é considerada precoce; quando a maturação ocorre entre julho e setembro, a variedade é denominada média; e, quando a maturação ocorre a partir do mês de outubro até o final da safra, a variedade é considerada tardia (LOPES, 2011).

Diante do exposto, pode-se afirmar que o planejamento envolvendo a cultura da cana-de-açúcar é uma tarefa complexa e requer o conhecimento de um número elevado de variáveis que precisam ser combinadas para que se possa produzir informações suficientes para fornecer o devido suporte a tomada de decisões relacionadas ao cultivo dessa cultura.

Nesse conjunto de variáveis e informações, destacam-se aquelas relacionadas à utilização dos maturadores, que se apresentam como uma alternativa útil ao processo de melhoria da

matéria-prima utilizada pelo setor sucroenergético e ao planejamento e manejo do processo de colheita da cana-de-açúcar.

Contudo, a identificação e a compreensão dos relacionamentos das variáveis relacionadas às decisões envolvendo a seleção de maturadores não é tarefa fácil. Por isso, espera-se que o modelo matemático proposto nesta pesquisa possa ser de grande utilidade à produção de informações gerenciais demandadas pela tomada de decisões pertinentes aos gastos envolvendo esse tipo de substância largamente utilizada no manejo da cultura da cana-de-açúcar.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Uma vez que o modelo proposto nesta pesquisa buscou minimizar possíveis desvios negativos (para baixo) entre a quantidade de sacarose produzida e a quantidade necessária para atender a demanda total de empreendimentos agrícolas produtores de cana-de-açúcar, e, ainda, evitar possíveis desvios positivos (para cima) que pudessem fazer com que os valores gastos com maturadores fossem maior que o respectivo orçamento de compras, optou-se pelo processo de modelagem baseado no método de Programação por Metas Ponderada (PMP), ou *Weighted Goal Programming (WGP)*, conforme proposto por Jones e Tamiz (2010), cuja a forma algébrica é descrita pelas Equações 1 a 3.

$$\text{Minimize} \quad z = \sum_{i=1}^k u_i n_i + v_i p_i \quad (1)$$

Sujeito a:

$$f_i(x) - p_i + n_i = g_i, \quad i = 1, \dots, Q \quad (2)$$

$$x \in F, \quad p_i \geq 0 \text{ e } n_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, Q \quad (3)$$

Nas Equações 1 a 3: x é um vetor de variáveis; $f_i(x)$ é uma função de x ; g_i é valor meta; n_i e p_i são, respectivamente, os valores dos desvios abaixo e acima do valor meta; u_i e v_i são os pesos associados aos desvios indesejáveis n_i e p_i , com $i=1, \dots, Q$, respectivamente, na função z , os quais assumem valores de acordo com a importância de cada meta, sendo que, usa-se $\sum_{i=1}^k (u_i + v_i) = 1$, e, ainda, usa-se f_i normalizada ($\frac{f_i(x)}{g_i}, g_i \neq 0$), $i = 1, \dots, Q$, caso as metas apresentem unidades de medidas distintas.

A justificativa para utilização do método de PMP proposto por Jones e Tamiz (2010) reside no fato de que essa metodologia utiliza o conceito de factibilidade de execução. Isto é, ao buscar direcionar desvios indesejados para mínimo possível, viabiliza-se o atendimento de um ou

mais objetivos, permitindo ao tomador de decisão aproximar suas metas de uma solução factível (COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017).

A implementação computacional e a validação do modelo proposto foram realizadas utilizando técnicas baseadas em problemas de programação linear inteira (PLI), em três cenários formados por instâncias geradas aleatoriamente de forma a reproduzir situações reais de empreendimentos agrícolas produtores de cana-de-açúcar da região centro-sul do Brasil, cuja resolução ocorreu com o uso do pacote analítico SOLVER, disponível em planilhas eletrônicas de cálculo e, ainda, um computador com processador Intel Core ® i5 2,30 GHz com 8,00 GB de memória RAM instalada.

Assim, a seção 3.1 descreve o modelo matemático proposto nesta pesquisa e seu funcionamento, e a seção 3.2 detalha os procedimentos desenvolvidos para viabilizar a composição da base de dados utilizada para validação do modelo em questão mediante a realização de testes computacionais.

3.1 Modelo de Otimização para Seleção de Agentes Indutores de Maturação

Em relação ao planejamento anual da safra de cana-de-açúcar, o problema de otimização a ser resolvido pelo modelo proposto nesta investigação consiste na identificação e escolha do agente indutor de maturação “*i*” a ser aplicado na cana-de-açúcar plantada nos talhões “*j*” de empreendimentos agrícolas do setor sucroenergético, de forma que sejam minimizados possíveis desvios negativos “*n*₁” (para baixo) em relação à quantidade de sacarose produzida, comparativamente à respectiva quantidade demandada “*D*”, e, ainda, minimizar possíveis desvios positivos “*p*₂” (para cima) referentes aos montantes gastos na aquisição de maturadores a serem utilizados na cultura da cana-de-açúcar, comparativamente ao respectivo orçamento total de compras “*C*”.

O modelo matemático de otimização em questão tem a sua função objetivo descrita pela Equação 4, que está sujeita às restrições descritas pelas Equações 5 até 8, conforme as variáveis, índices e parâmetros informados no Quadro 3.

$$\text{Minimize} \quad \left(\frac{n_1}{D}\right) u + \left(\frac{p_2}{C}\right) v \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^w X_{ij} H_j TCH_j Polmáx_i + n_1 - p_1 = D, \quad j = 1, \dots, k \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{nw} X_{ij} H_j cc_i + n_2 - p_2 = C, \quad j = 1, \dots, k \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^w X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, k \quad (7)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se aplicar o maturador } i \text{ no talhão } j \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1; \quad i = 1, \dots, w; \quad j = 1, \dots, k; \quad n_j \geq 0; \quad p_j \geq 0 \quad (9)$$

Quadro 3 – Descrição dos variáveis, índices e parâmetros do modelo proposto

Legenda	Categoria	Descrição
n_1	desvio	Desvio negativo (abaixo), medido em toneladas (t), em relação ao total de sacarose produzida pela cana plantada nos talhões j e a respectiva quantidade demandada (D) para a safra.
p_1	desvio	Desvio positivo (acima), medido em toneladas (t), em relação ao total de sacarose produzida pela cana plantada nos talhões j e a respectiva quantidade demandada (D) para a safra.
n_2	desvio	Desvio negativo (abaixo), medido em moeda (R\$), em relação ao total de gasto para a aquisição dos maturadores i a serem aplicados na cana plantada nos talhões j , comparativamente ao respectivo orçamento de compras (C) para toda a safra.
p_2	desvio	Desvio positivo (acima), medido em moeda (R\$), em relação ao total de gasto para a aquisição dos maturadores i a serem aplicados na cana plantada nos talhões j , comparativamente ao respectivo orçamento de compras (C) para toda a safra.
X_{ij}	Variável de decisão	Assumirá valor 1 (um,) se o maturador i for aplicado na cana-de-açúcar plantada no talhão j , ou assumirá valor 0 (zero) em caso contrário.
$j = 1, \dots, k$	índice	Índices que representam os talhões em que se encontra plantada a cana-de-açúcar.
$i = 1, \dots, w$	índice	Índices que representam os maturadores a serem aplicados na cana-de-açúcar plantada nos talhões j .
u_j, v_j	parâmetro	Pesos associados aos desvios negativos (u_j) e positivos (v_j) a serem minimizados pelo modelo, sendo que, a atribuição de tais pesos leva em conta as preferências estabelecidas pelo tomador de decisões de acordo com suas prioridades em relação à cada desvio e a respectiva meta.
D	parâmetro	Quantidade total de sacarose demandada, medida em toneladas (t), para toda safra em planejamento.
C	parâmetro	Orçamento total, medido em moeda (R\$), destinado à aquisição de maturadores para toda safra em planejamento.
H_j	parâmetro	Indica a dimensão, em hectares (ha), de cada talhão j em que a cana-de-açúcar se encontra plantada.
TCH_j	parâmetro	Indica a produtividade de cana, em toneladas por hectare ($t \text{ ha}^{-1}$), das variedades plantadas em cada talhão j .
$Polmáx_i$	parâmetro	Indica o nível percentual máximo de Pol que cada variedade de cana-de-açúcar, plantada nos respectivos talhões j , pode atingir a partir da ação de um maturador i .
cc_i	parâmetro	Preço de compra unitário (custo), medido em moeda (R\$), de cada maturador i a ser adquirido para aplicação na cana plantada nos talhões j .

Fonte: elaborado pelo autor, a partir dos dados pesquisa.

Na função objetivo descrita pela Equação 4, as variáveis de desvio n_1 e p_2 são desvios a serem minimizados, sendo que, n_1 é o desvio negativo (para baixo) na quantidade de sacarose produzida, comparativamente à respectiva quantidade demanda (D) para toda a safra em planejamento, e p_2 é o desvio positivo (para cima) no total dos valores gastos para a aquisição de maturadores a serem utilizados na cultura da cana-de-açúcar em relação ao respectivo orçamento total de compras (C). Por se tratar de variáveis mensuradas em unidades de medidas distintas (toneladas de sacarose e valores em moeda), a função objetivo descrita pela Equação 4 foi normalizada (n_1/D e p_2/C) de tal forma que os desvios minimizados assumissem valores relativos em uma mesma base, ou seja, valores decimais medidos em relação às respectivas metas. As variáveis u e v são pesos a serem atribuídos a cada desvio minimizado, de acordo com as preferências e/ou prioridades estabelecidas pelo tomador de decisões.

A restrição (5) garante que toda a sacarose produzida ($H_j TCH_j Polmáx_i$) pela cana plantada nos talhões j de um empreendimento produtor atenda à demanda total (D) da safra em planejamento. A produção (rendimento) da sacarose leva em consideração a área de cada talhão (H_j), em hectares, a produção esperada da cana plantada nos respectivos talhões, em toneladas por hectare (TCH_j), e ainda, o percentual máximo de Pol que a cana plantada pode atingir mediante a ação de determinado maturador ($Polmáx_i$).

A restrição (6) garante que o total dos gastos realizados ($H_j cc_i$) com os maturadores a serem aplicados na cana plantada nos j talhões seja igual ao valor total orçado para sua aquisição (C). O total dos gastos realizados com a aquisição de maturadores leva em conta a área plantada de cada talhão (H_j), em hectares, e ainda, o respectivo custo por hectare do maturador a ser aplicado (cc_i).

A restrição (7) garante que a cana-de-açúcar plantada em todo talhão j receba a aplicação de um único agente indutor de maturação i .

As restrições (8-9) determinam os valores a serem atribuídos às variáveis do modelo do modelo (decisão e desvios).

3.2 Composição da Base de Dados para Realização dos Testes Computacionais

Na composição da base de dados dos testes computacionais realizados para validação do modelo de otimização proposto, assumiu-se a possibilidade de cada talhão j conter qualquer uma das 18 variedades de cultivares de cana-de-açúcar adaptáveis à região centro-sul do Brasil descritas na Tabela 1, bem como, os respectivos parâmetros de produtividade (TCH e Pol).

Tabela 1 – Características produtivas de 18 diferentes variedades de cana-de-açúcar adaptáveis à região centro-sul do Brasil

Variedade		Produtividade	
Número	Identificação	TCH (t ha ⁻¹)	Pol (%)
1	CTC15	132,80	14,50
2	CTC9	100,00	15,84
3	RB925211	89,29	14,67
4	CTC6	136,00	14,98
5	RB855156	117,80	14,50
6	CTC2	129,10	14,31
7	RB867515	148,20	14,82
8	SP80-1842	112,80	14,90
9	SP83-2847	126,70	13,20
10	SP80-3280	121,70	14,80
11	RB928062	113,00	15,75
12	RB966928	123,10	13,32
13	CTC20	165,00	13,50
14	CTC17	112,30	14,98
15	SP81-3250	140,60	15,02
16	CTC4	130,90	13,54
17	RB92579	142,40	15,70
18	RB855453	133,35	13,90

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Ramos *et al.* (2016).

Foram propostos três cenários formados por três instâncias distintas, sendo que, a instância *I-18* foi composta por 18 talhões, a instância *I-30* foi composta por 30 talhões e a instância *I-60* foi composta por 60 talhões. Na instância *I-18*, foi definido que cada talhão *j* seria ocupado por uma das 18 variedades descritas na Tabela 1. Nas instâncias *I-30* e *I-60*, a definição acerca da ocupação de cada talhão *j* por uma determinada variedade de cana-de-açúcar se deu mediante o sorteio de números aleatórios entre 1 e 18, cuja variedade atribuída a cada talhão aconteceu com base nas informações descritas na Tabela 1.

As dimensões H_j de cada talhão *j*, em hectares (ha), foram definidas mediante o sorteio de números aleatórios entre 18 e 48 para todas as instâncias. A área mínima de 18 ha foi estimada a partir de dados referentes ao ano de 2017 para o estado de São Paulo, disponíveis no Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (SIDRA, 2019), sendo: 4.861.491 ha / 14.910 unidades produtoras = 326 ha unidade produtiva⁻¹, e ainda, 326 ha / 18 variedades = $\overline{H_j}$ = 18,11 ha talhão⁻¹. A área máxima de 48 ha foi estabelecida levando-se em conta a recomendação do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) de que cada variedade plantada em uma unidade produtiva deve ocupar, no máximo, 15% da área total plantada (RAIZER; BRAGA JÚNIOR; SELEGATO, 2013), ou seja: 326 ha x unidade produtiva⁻¹ x 0,15 talhão⁻¹ = 48,91 ha talhão⁻¹.

A demanda total de sacarose (*D*) para a safra em planejamento foi estimada com base na capacidade produtiva de cada talhão *j* dentro das respectivas instâncias ($D = \sum_{j=1}^k H_j TCH_j Pol_j$) e, ainda, considerando as informações de produtividade descritas na Tabela 1.

O valor do orçamento total (C) destinado à aquisição de maturadores para a safra em planejamento foi estimado com base na área de cada talhão e no custo unitário médio da dose de maturador a ser aplicada por hectare ($C = H_j \bar{c}_i$).

Uma vez que os produtores brasileiros utilizam preferencialmente agentes indutores de maturação como o Ethephon e o Etil-trinexapac, além do Glifosato e o Sulfometuron-metil (VIANA *et al.*, 2017), para a realização dos testes computacionais foi simulada a seleção de três tipos de maturadores, sendo dois deles o Ethephon e o Etil-trinexapac, com as respectivas dosagens de aplicação recomendadas pelas bulas dos respectivos fabricantes ($0,66 \text{ L ha}^{-1}$ e $1,00 \text{ L ha}^{-1}$), bem como, os respectivos preços de mercado (R\$180,00 L e R\$ 110,00 L), e, ainda, uma terceira opção, doravante denominada de “Intermediário”, formada a partir da média desses de preços daqueles dois maturadores ($\text{R}\$114,40 \text{ ha}^{-1}$).

Para a estimativa do nível percentual máximo de sacarose ($Pol_{máx}_i$) que cada uma daquelas 18 variedade de cana-de-açúcar poderia atingir a partir da ação de um maturador i , foi realizado o levantamento dos resultados de estudos anteriores (CAPUTO *et al.*, 2007; INOUE *et al.*, 2015; OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2016; VIANA *et al.*, 2008; VIANA *et al.*, 2017), em que, foram identificados os níveis percentuais mínimos e máximos de Pol para cada quantidade de dias após a aplicação dos maturador (DAA), conforme descrito na Tabela 2. Sendo que, a justificativa para a pesquisa dos resultados dos estudos de Caputo *et al* (2007), Inoue *et al* (2015), Oliveira Filho *et al* (2016), Viana *et al* (2008) e Viana *et al* (2017), reside no fato de que todas essas investigações científicas realizaram experimentos com os dois maturadores escolhidos para realização dos teste computacionais desta pesquisa, ou seja, o Ethephon e o Etil-trinexapac.

Tabela 2- Dados para simulação das funções de produtividade de Pol a partir da ação dos maturadores (Continua)

Maturador	Quantidade de dias após a aplicação do maturador (DAA)	Frequência		Níveis de Pol (%)	
		Absoluta ^(g)	Relativa ^(h)	Mínimo	Máximo
		(n)	(%)		
Ethephon	0 ^(a)	8	21%	6,26	11,05
	15 ^(b)	3	8%	11,64	13,44
	30 ^(c)	10	26%	10,01	14,38
	45 ^(d)	8	21%	11,87	15,41
	60 ^(e)	2	5%	14,91	16,62
	75 ^(f)	8	21%	13,15	16,99
Etil-trinexapac	0 ^(a)	1	14%	10,3	10,3
	15 ^(b)	2	29%	11,8	13,48
	30 ^(c)	1	14%	14,54	14,54
	45 ^(d)	0	0%	-	-
	60 ^(e)	2	29%	13,97	15,69
	75 ^(f)	1	14%	15,34	15,34

Tabela 2- Dados para simulação das funções de produtividade de Pol a partir da ação dos maturadores (Conclusão)

Maturador	Quantidade de dias após a aplicação do maturador (DAA)	Frequência		Níveis de Pol (%)	
		Absoluta ^(g) (n)	Relativa ^(h) (%)	Mínimo	Máximo
Intermediário	0 ^(a)	9	20%	6,26	11,05
	15 ^(b)	5	11%	11,64	13,48
	30 ^(c)	11	24%	10,01	14,54
	45 ^(d)	8	17%	11,87	15,41
	60 ^(e)	4	9%	13,97	16,62
	75 ^(f)	9	20%	13,15	16,99
(a) leituras de Pol realizadas de -10 DAA até 0 DAA.		(d) leituras de Pol realizadas de 31 DAA até 45 DAA.			
(b) leituras de Pol realizadas de 1 DAA até 15 DAA.		(e) leituras de Pol realizadas de 46 DAA até 60 DAA.			
(c) leituras de Pol realizadas de 16 DAA até 30 DAA.		(f) leituras de Pol realizadas de 61 DAA até 75 DAA.			
(g) n = quantidade de leituras de Pol realizadas em cada momento.					
(h) representatividade percentual da quantidade de leituras de Pol realizadas em cada momento (n) sobre o somatório de todas as leituras tabuladas ($\sum n$ para Ethephon = 39 leituras; $\sum n$ para Etil-trinexapac = 7 leituras; $\sum n$ para Interdiário = Ethephon + Etil-trinexapac = 46).					

Fonte: elaborado pelo autor a partir de Caputo *et al* (2007), Inoue *et al* (2015), Oliveira Filho *et al* (2016), Viana *et al* (2008) e Viana *et al* (2017).

A partir dos valores percentuais de Pol descritos na Tabela 2, foram gerados números aleatórios entre aqueles valores mínimos e máximos e, com base nisso, foram simulados percentuais de Pol para 0 DAA, 15 DAA, 30 DAA, 45 DAA, 60 DAA e 75 DAA, para cada uma das 18 variedades descritas na Tabela 1, para cada um dos três maturadores considerados nos testes computacionais. A seguir, procedeu-se à aproximação polinomial com o auxílio de planilhas eletrônicas de cálculo e foram identificadas as respectivas funções de produtividade de Pol $P(x)$. Na sequência, com base nas funções $P(x)$, foram calculados os níveis percentuais máximos de Pol ($Polmáx_i$) que cada uma daquelas 18 variedades poderia atingir a partir da ação de cada um dos três maturadores considerados para a realização dos testes computacionais (Ethephon, Etil-trinexapac e o Intermediário), conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Nível percentual máximo de sacarose estimado com base funções de produtividade de Pol $P(x)$ de cada maturador (Continua)

Variedade		$Polmáx_i$ do Ethephon (%)	$Polmáx_i$ do Etil-trinexapac (%)	$Polmáx_i$ do Intermediário (%)
Número	Identificação			
1	CTC15	15,34	15,27	15,02
2	CTC9	15,16	15,09	15,08
3	RB925211	15,44	15,61	15,83
4	CTC6	14,75	15,49	15,18
5	RB855156	15,01	15,43	15,06
6	CTC2	14,33	15,10	15,89
7	RB867515	14,55	15,61	13,92
8	SP80-1842	15,70	15,83	15,32
9	SP83-2847	14,50	15,53	14,80
10	SP80-3280	15,65	15,12	15,22
11	RB928062	15,27	15,12	15,13
12	RB966928	15,15	15,93	15,23
13	CTC20	15,23	15,17	15,49

Tabela 3 - Nível percentual máximo de sacarose estimado com base funções de produtividade de Pol $P(x)$ de cada maturador **(Conclusão)**

Variedade		$Polmáx_i$ do Ethephon	$Polmáx_i$ do Etil-trinexapac	$Polmáx_i$ do Intermediário
Número	Identificação	(%)	(%)	(%)
14	CTC17	15,51	15,27	15,24
15	SP81-3250	14,25	15,68	15,61
16	CTC4	15,37	15,08	14,94
17	RB92579	15,75	15,60	15,49
18	RB855453	15,24	15,31	14,20

Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados da pesquisa.

Com relação à possibilidade de serem atribuídos pesos (u e v) aos desvios (n_1 e p_2), inicialmente, o modelo proposto foi implementado sem pesos ($u = v = 1$) nas três instâncias. A seguir, ele foi implementado novamente com pesos $u=0,90$ e $v=0,10$, para n_1 e p_2 respectivamente, em todas as instâncias. E, finalmente, foram utilizados os pesos $u=0,10$ e $v=0,90$, para n_1 e p_2 respectivamente, em todas as instâncias.

4 Apresentação e Análise dos Resultados

O modelo proposto nesta pesquisa foi testado em três cenários compostos por instâncias com dimensões distintas, conforme mostram os dados da Tabela 4. Valendo destacar que, no caso das instâncias *I-18* e *I-60*, seus talhões foram ocupados pelas 18 variedades adaptáveis à região Centro-sul do Brasil escolhidas para a realização dos testes computacionais. Contudo, no caso da instância *I-30*, seus talhões foram ocupados por 15 variedades apenas, uma vez que as variedades CTC6, RB855453 e RB928062 não foram escolhidas para essa instância mediante o processo de sorteio por números aleatórios.

Tabela 4 - Resumo da composição de cada instância**(Continua)**

Variedade	<i>I-18</i>		<i>I-30</i>		<i>I-60</i>	
	Quantidade de talhões (un.)	Área ocupada (ha)	Quantidade de talhões (un.)	Área ocupada (ha)	Quantidade de talhões (un.)	Área ocupada (ha)
CTC15	1	19	1	21	3	99
CTC17	1	40	2	48	5	132
CTC2	1	44	3	120	2	66
CTC20	1	48	3	100	4	120
CTC4	1	20	1	21	5	186
CTC6	1	19	0	0	1	48
CTC9	1	42	2	40	6	189
RB855156	1	29	2	59	3	119
RB855453	1	39	0	0	3	96
RB867515	1	43	3	121	2	88
RB925211	1	27	1	20	1	19
RB92579	1	42	1	34	4	158
RB928062	1	42	0	0	6	174

Tabela 4 - Resumo da composição de cada instância

Variedade	I-18		I-30		I-60		(Conclusão)
	Quantidade de talhões (un.)	Área ocupada (ha)	Quantidade de talhões (un.)	Área ocupada (ha)	Quantidade de talhões (un.)	Área ocupada (ha)	
RB966928	1	48	2	71	2	51	
SP80-1842	1	36	4	169	3	100	
SP80-3280	1	34	2	53	1	23	
SP81-3250	1	45	2	70	4	130	
SP83-2847	1	25	1	18	5	176	
Total	18	642	30	965	60	1974	

Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados da pesquisa.

Ao levar em conta as áreas de cada talhão j , as respectivas variedades e suas capacidades produtivas (TCH e Pol), foram estabelecidas as metas de sacarose demandada para a safra (D), bem como, o orçamento de gastos para a compra de agentes indutores de maturação (C) a serem utilizados em toda a safra, conforme descrito na Tabela 5. Em relação à demanda de sacarose (D), a definição do valor meta em toneladas (t) levou em conta as áreas dos talhões j e a capacidade produtiva (TCH ha^{-1} e Pol t^{-1}) de cada variedade. Em relação ao orçamento de gastos para a compra de maturadores (C), a definição do valor meta em reais (R\$) levou em conta a área de cada talhão, a média das doses a serem aplicadas de cada maturador i (0,66 L ha^{-1} para o Ethephon, 1,00 L ha^{-1} para o Etil-trinexapac e 1,00 L ha^{-1} para o Intermediário) e, ainda, a média dos respectivos preços de mercado (R\$180,0 L^{-1} para o Ethephon, R\$110,0 L^{-1} para o Etil-trinexapac e R\$114,40 L^{-1} para o Intermediário).

Tabela 5 - Resultados da aplicação do modelo para cada cenário/instância

Instância	Parâmetros	Meta	Resultados do modelo: $u = 1,00$ e $v = 1,00$		Resultados do modelo: $u = 0,90$ e $v = 0,10$		Resultados do modelo: $u = 0,10$ e $v = 0,90$	
			Total	Desvio	Total	Desvio	Total	Desvio
I-18	D (t)	11.903	12.420	517	12.420	517	12.361	458
	C (R\$)	73.445,00	73.370,00	-75,00	73.370,00	-75,00	73.440,40	-4,60
I-30	D (t)	18.088	18.964	876	19.022	934	18.958	870
	C (R\$)	110.396,00	110.312,40	-83,60	110.369,60	-26,40	110.396,00	0,00
I-60	D (t)	36.530	36.530	0	36.530	0	36.530	0
	C (R\$)	225.825,00	218.213,60	-7.611,40	218.213,60	-7.611,40	218.213,60	-7.611,40

Fonte: elaborado pelo autor, a partir dos dados pesquisa.

Ao minimizar os desvios negativos (n_1) em relação a D e os desvios positivos (p_2) em relação a C , sem considerar nenhuma ponderação, portanto com pesos iguais a um ($u=1,00$ e $v=1,00$), o modelo matemático de otimização para a seleção de maturadores fez com que a produção de sacarose prevista fosse superior às respectivas demandas (D) nas instâncias I-18 e I-30, sendo que, na instância I-60, o modelo garantiu o cumprimento da respectiva meta, conforme mostram as informações resumidas na Tabela 5. Adicionalmente, pode-se observar que, nas três

instâncias o valor calculado pelo modelo para o gasto com a aquisição de maturadores foi inferior ao respectivo orçamento (C).

Ainda com base nas informações resumidas na Tabela 5, pode-se observar que mesmo com a atribuição de pesos ($u=0,10$ e $v=0,90$; $u=0,10$ e $v=0,90$) para os desvios (n_1 e p_2 , respectivamente), o modelo matemático de otimização para a seleção de maturadores se comportou de forma satisfatória.

No caso dos pesos/prioridades $u=0,90$ e $v=0,10$ para n_1 e p_2 respectivamente, o valor identificado pelo modelo para realização de gastos com a aquisição de maturadores foi inferior ao respectivo orçamento (C), e a produção prevista de sacarose foi, no mínimo, igual à respectiva demanda (D) no caso de $I-60$. Sendo que, em $I-18$ e $I-30$, a produção de sacarose calculada pelo modelo foi superior às respectivas demandas (D).

No caso dos pesos/prioridades $u=0,10$ e $v=0,90$ para n_1 e p_2 respectivamente, o valor identificado pelo modelo para realização de gastos com a aquisição de maturadores foi inferior ao respectivo orçamento (C) nas instâncias $I-18$ e $I-60$ e, ainda, igual ao orçamento na instância $I-30$. Sendo que, em relação à produção de sacarose o modelo foi capaz de, no mínimo, garantir que a respectiva demanda (D) fosse atendida.

Uma informação importante, que também pôde ser extraída a partir dos dados resumidos na Tabela 5, diz respeito à compreensão acerca de como o modelo se comportou em instâncias menores. Isto é, apesar de atingir o objetivo para o qual o modelo foi proposto, ou seja, garantir que a produção de sacarose atenda à respectiva de demanda (D) e, simultaneamente, garantir que o orçamento para a aquisição de maturadores (C) seja cumprido, tudo isso levando em conta o efeito que esse tipo de agente fisiológico tem sobre o ganho de produtividade sacarose ($Polmáx_i$), pôde-se perceber que em instâncias menores (com menos talhões, como é caso de $I-18$ ou com uma quantidade menor de variedades, como é o caso de $I-30$), a economia orçamentária foi menor, contudo, o ganho de produtividade de sacarose é mais evidente.

Por outro lado, em instâncias maiores (como é o caso de $I-60$) ficou evidente que a produtividade de sacarose é uma variável mais sensível que as possíveis economias orçamentárias, pois, o modelo conseguiu garantir o atendimento da demanda por sacarose (D), mas, não conseguiu superá-la como aconteceu nas instâncias menores ($I-18$ e $I-30$). Já em relação ao orçamento para aquisição de maturadores (C), nem mesmo a atribuição de pesos e sua inversão (de $u=0,90$ e $v=0,10$ para $u=0,10$ e $v=0,90$) fizeram com que o valor previsto pelo modelo fosse alterado.

Com relação ao poder informativo do modelo matemático de otimização para a seleção de maturadores, deve-se destacar que ele foi além das informações totalizadas e de caráter

consolidado, como foi o caso das informações resumidas na Tabela 5. Ou seja, devido ao fato do modelo matemático de otimização proposto levar em conta o efeito de cada agente maturador sobre o ganho (incremento ou melhora) de produtividade sacarose das variedades cultivadas ($Polmáx_i$), foi possível identificar também qual maturador i é mais adequado à variedade plantada em cada talhão j , de forma que se possa saber previamente quanto comprar de cada agente indutor de maturação i e, ainda, onde ele deve ser aplicado.

Apesar de ser possível produzir esse conjunto de informações para problemas de qualquer tamanho (de instâncias menores até instâncias maiores), o exemplo descrito na Tabela 6 refere-se à instância *I-18* e ilustra bem a capacidade informativa que pode ser obtida a partir dos resultados da aplicação modelo proposto por esta investigação científica.

Tabela 6 - Detalhamento dos gastos com maturadores identificados pelo modelo para a instância *I-18*

j	Variedade	H_j	Previsto, sendo: $u = 1,00$ e $v = 1,00$				Previsto, sendo: $u = 0,90$ e $v = 0,10$				Previsto, sendo: $u = 0,10$ e $v = 0,90$			
			Maturador				Maturador				Maturador			
			$i^{(a)}$	cc_j (R\$ L ⁻¹)	Qtd. ^(b) (L)	C_j (R\$)	$i^{(a)}$	cc_j (R\$ L ⁻¹)	Qtd. ^(b) (L)	C_j (R\$)	$i^{(a)}$	cc_j (R\$ L ⁻¹)	Qtd. ^(b) (L)	C_j (R\$)
1	CTC15	19 2	110,00	19,00	2.090,00	2	110,00	19,00	2.090,00	3	114,40	19,00	2.173,60	
14	CTC17	40 3	114,40	40,00	4.576,00	3	114,40	40,00	4.576,00	3	114,40	40,00	4.576,00	
6	CTC2	44 3	114,40	44,00	5.033,60	3	114,40	44,00	5.033,60	3	114,40	44,00	5.033,60	
13	CTC20	48 2	110,00	48,00	5.280,00	2	110,00	48,00	5.280,00	2	110,00	48,00	5.280,00	
16	CTC4	20 1	180,00	13,20	2.376,00	1	180,00	13,20	2.376,00	1	180,00	13,20	2.376,00	
4	CTC6	19 2	110,00	19,00	2.090,00	2	110,00	19,00	2.090,00	3	114,40	19,00	2.173,60	
2	CTC9	42 2	110,00	42,00	4.620,00	2	110,00	42,00	4.620,00	3	114,40	42,00	4.804,80	
5	RB855156	29 3	114,40	29,00	3.317,60	3	114,40	29,00	3.317,60	3	114,40	29,00	3.317,60	
18	RB855453	39 1	180,00	25,74	4.633,20	1	180,00	25,74	4.633,20	3	114,40	39,00	4.461,60	
7	RB867515	43 3	114,40	43,00	4.919,20	3	114,40	43,00	4.919,20	3	114,40	43,00	4.919,20	
3	RB925211	27 1	180,00	17,82	3.207,60	1	180,00	17,82	3.207,60	1	180,00	17,82	3.207,60	
17	RB92579	42 3	114,40	42,00	4.804,80	3	114,40	42,00	4.804,80	3	114,40	42,00	4.804,80	
11	RB928062	42 3	114,40	42,00	4.804,80	3	114,40	42,00	4.804,80	3	114,40	42,00	4.804,80	
12	RB966928	48 3	114,40	48,00	5.491,20	3	114,40	48,00	5.491,20	3	114,40	48,00	5.491,20	
8	SP80-1842	36 3	114,40	36,00	4.118,40	3	114,40	36,00	4.118,40	3	114,40	36,00	4.118,40	
10	SP80-3280	34 3	114,40	34,00	3.889,60	3	114,40	34,00	3.889,60	3	114,40	34,00	3.889,60	
15	SP81-3250	45 3	114,40	45,00	5.148,00	3	114,40	45,00	5.148,00	3	114,40	45,00	5.148,00	
9	SP83-2847	25 1	180,00	16,50	2.970,00	1	180,00	16,50	2.970,00	3	114,40	25,00	2.860,00	
Total			73.370,00				73.370,00				73.440,40			

(a) 1= Ethephon; 2= Etil-trinexapac; 3= Intermediário

(b) Qtd. = quantidade

Fonte: elaborado pelo autor, a partir dos dados pesquisa.

Conforme pode ser visto na Tabela 6, de acordo com cada uma das três situações simuladas para instância *I-18* para variações de pesos nos desvios minimizados, modelo matemático de otimização para a seleção de maturadores procedeu alterações acerca da utilização de um determinado agente maturador i em relação aos talhões j em que se encontra determinada variedade de cana-de-açúcar.

Assim, para a situação em que não foram atribuídos pesos para os desvios, portanto, $u = 1,00$ e $v = 1,00$, e para a situação em que foi atribuído maior peso para o desvio em relação à

produção de sacarose (n_1), ou seja, $u=0,90$ e $v=0,10$ para n_1 e p_2 respectivamente, o modelo proposto estimou um total de 604,26 litros (L) de maturadores a serem adquiridos, sendo: 73,26 L de Ethephon; 128,00 L de Etil-trinexapac; e, 403,00 L do maturador Intermediário.

Por outro lado, para a situação em que foi atribuído maior peso para o desvio em relação ao orçamento de compras de maturadores (p_1), portanto, $u=0,10$ e $v=0,90$ para n_1 e p_2 respectivamente, o modelo proposto estimou um total de 626,02 L de maturadores a serem adquiridos, sendo: 31,02 L de Ethephon; 48,00 L de Etil-trinexapac; e, 547,00 L do maturador Intermediário.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de otimização proposto nesta pesquisa científica permite planejar os processos de escolha, compra e aplicação de agentes indutores de maturação da cana-de-açúcar, de forma que a demanda por sacarose da safra seja atendida e, ainda, faz com que o orçamento destinado à aquisição dessas substâncias (maturadores) seja cumprido com possíveis economias.

Adicionalmente, a formulação utilizada para composição do modelo proposto permite produzir um conjunto de informações que vai além das variáveis relacionadas à produção e demanda de sacarose e em relação aos valores orçamentários. Ou seja, é possível identificar previamente quanto comprar de cada tipo de maturador, quanto será gasto por tipo de maturador, e, ainda, em qual talhão cada maturador deve ser aplicado para que se atinja a máxima produtividade de sacarose mediante a interação entre o respectivo agente indutor de maturação e determinada variedade de cana-de-açúcar.

Como principal limitação desta pesquisa, destaca-se a necessidade de se conhecer a função estimadora da produtividade máxima de sacarose alcançada mediante o uso de determinado agente indutor de maturação ($Polmáx_i$). Entretanto, tal dificuldade pode ser superada mediante a realização de experimentos de campo para que se consiga melhor acuracidade nas estimativas relacionadas à ação de certo agente fisiológico sobre certa cultivar de cana-de-açúcar. Por outro lado, também deve ser destacado que são crescentes os estudos relacionados a essa temática, o que pode facilitar também a estimativa da função em questão.

Para a continuidade dos estudos acerca do tema, sugere-se a elaboração de estudos envolvendo outras variáveis relacionadas à qualidade e produtividade da cultura da cana-de-açúcar, por exemplo, brix, teor de fibras, produtividade de palhiço, potencial calorífico, entre outras.

Dessa forma, espera-se que os resultados alcançados a partir da proposição e aplicação da modelagem desta investigação científica possam ser somados aos resultados de outras pesquisas

de natureza correlata e, assim, se possa contribuir para o processo de produção de informações destinadas ao suporte à tomada de decisões gerenciais no setor sucroenergético.

REFERÊNCIAS

CAPUTO, M. M.; SILVA, M. A. de; BEAUCLAIR, E. G. F. de; GAVA, G. J. C. de. Acúmulo de sacarose, produtividade e florescimento de cana-de-açúcar sob reguladores vegetais.

Interciência, [S. l.], v. 32, n. 12, p. 834-840, Dez. 2007. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/70199/WOS000251975400006.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 fev. 2020.

COLAPINTO, C.; JAYARAMAN, R.; MARSIGLIO, S.. Multi-criteria decision analysis with goal programming in engineering, management and social sciences: a state-of-the art review.

Ann. Oper. Res. (Springer Science & Business Media, LLC), [S. l.], v. 251, p. 7-40, 2017.

Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10479-015-1829-1.pdf>.

Acesso em: 27 mar. 2019.

CRUSCIOL, C. A. C.; LEITE, G. H. P.; SIQUEIRA, G. F. de; SILVA, M. de A.. Response of application of growth inhibitors on sugarcane productivity and sucrose accumulation in the middle of cropping season in Brazil.

Sugar Tech, Cham (Switzerland), v 19, n. 2, p. 155–164,

April, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0450-1>. Acesso em: 27 ago.

2018.

DIDIER, K. K.; CRÉPIN, P. B.; CARINE, N. A.; MÉLANIE, B. B.; YAH, O.; MICHEL, Z..

Effect of glyphosate used as a sugarcane chemical ripener in Côte d'Ivoire. **African Journal**

Plant Science, Victoria Island, Lagos (Nigeria), v.11, n 8. p. 341-350, August 2017. Disponível

em: <https://academicjournals.org/journal/AJPS/article-full-text/B37BE1665315>. Acesso em: 23

out. 2018.

INOUE, M. H.; CAPPELLESSO, E. J. de S.; MENDES, K. F.; BEN, R.; CONCIANI, P. A..

Eficiência do bispyribac-sodium como maturador na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Ciência**

Agrônômica, Fortaleza, v. 46, n. 1, p. 80-88, jan.-mar., 2015. Disponível em:

<http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/2276/1066>. Acesso em: 06 fev.

2020.

JONES, D.; TAMIZ, M.. **Practical goal programming**. New York: Springer Science &

Business Media, 2010.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. de A.. Desenvolvimento e produtividade da

cana-de-açúcar após aplicação de reguladores vegetais em meio de safra. **Semina: Ciências**

Agrárias, Londrina, v. 32, n. 1, p. 129-138, jan./mar. 2011. Disponível em:

<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/4334/7123>. Acesso em: 20

ago. 2018.

LOPES, C. H. (Org.). **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. São Carlos: Ed. UFSCar,

2011. Disponível em: <http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/handle/123456789/2769>.

Acesso em: 14 ago. 2018.

LORIZOLA, G. M.; CAPITANI, D. H. D.. Análise do modelo estrutura-conduta-desempenho do

setor sucroenergético brasileiro. **Nucleus**, Ituverava, v.15, n.2, p.383-399, out. 2018. Disponível

em: <http://dx.doi.org/10.3738/1982.2278.2920>. Acesso em: 01 set. 2019.

- MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. P.; ZULLO JUNIOR, J.. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, José Eduardo B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. - Brasília, DF: INMET, 2009. p. 109-130. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/home/publicacoes/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf. Acesso em: 13 ago. 2018.
- MUHWIRIDZWA, M.; MANENJI, B. T.; MADANZI, T.; MAHOHOMA, W.. Evaluating the effects of chemical ripening with fluazifop-p-butyl on sugarcane (*Saccharum officinarum*) yield and sugar content. **International Journal of Plant & Soil Science**, West Bengal (India), v. 9, n. 6, p. 1-8, 2016. Disponível em: http://www.journalrepository.org/media/journals/IJPSS_24/2016/Jan/Manenji962015IJPSS20596.pdf. Acesso em: 23 out. 2018.
- NERVIS, J. J.; FLORENTINO, H. de O.; CANTANE, D. R.; RAMOS, R. P.; ISLER, P. R.. Simulação para a otimização da colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Biometria**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 415-439, jun. 2017. Disponível em: <http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/47>. Acesso em: 24 out. 2018.
- OLIVEIRA FILHO, P. B. de; DUARTE JÚNIOR, J. B.; COSTA, A. C. T. da; OLIVEIRA, P. S. R. de; MACEDO JÚNIOR, E. K.; GUIMARÃES, V. F.; BOSQUETTE, W.. Chemical ripeners and different harvest periods in sugarcane in State of Paraná, southern Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, [S. l.], n. 11, n. 39, p. 3904-3913, sept., 2016. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/DFD026F60880>. Acesso em: 06 fev. 2020.
- ORGERON, A. J; GRAVOIS, K. A.; LEGENDRE, B. L.; GRIFFIN, J. L.. On-farm evaluation of trinexapac-ethyl for early season sucrose enhancement. **Journal of American Society of Sugar Cane Technologists**, Baton Rouge, LA (EUA), v. 36, p. 1-8, 2016. Disponível em: <http://www.assct.org/journal/JASSCT%20PDF%20Files/Volume%2036/On-Farm%20Evaluation%20of%20Trinexapac-ethyl%20for%20Early%20Season%20Sucrose%20Enhancem....pdf>. Acesso em: 20 out. 2018.
- RAIZER, A. J.; BRAGA JÚNIOR, R. L. do C.; SELEGATO, S. M.. Índices de eficiência no uso de variedades de cana-de-açúcar. **RPA News - cana & indústria**, Ribeirão Preto, ano 12, n. 151/152, p. 25-29, jul./ago. 2013. Disponível em: <http://revistarpanews.com.br/edicoes/151/IDEANews151e152FinalGraficaWeb.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2019.
- RAMOS, R. P.; ISLER, P. R.; FLORENTINO, H. de O.; JONES, D.; NERVIS, J. J.. An optimization model for the combined planning and harvesting of sugarcane with maturity considerations. **African Journal of Agricultural Research** (Afr. J. Agric. Res.), [S. l.], v. 11, n. 40, p. 3950-3958, 6 Oct., 2016. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/84FBC7A60937>. Acesso em: 13 abr. 2019.

ROBERTO, G. G. ; CUNHA, C.; SALES, C. R. G.; . SILVEIRA, N. M.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; LAGÔA, A. M. M. A.. Variação da fotossíntese e dos teores de carboidratos induzidos por etefom e déficit hídrico na fase de maturação da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.74, n. 4, p.379-386, out./dez. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0062>. Acesso em: 18 set. 2018.

SIDRA, Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Censo agropecuário**: tabela 6615 - número de estabelecimentos agropecuários, quantidade produzida e área colhida, por produtos da lavoura temporária, resultados preliminares 2017. [S. l.]: 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv61914.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2019. Acesso em: 26 abr. 2019.

VIANA, R. da S.; SILVA, P. H.; MUTTON, M. A.; MUTTON, M. J. R.; GUIMARÃES, E. R.; BENTO, M.. Efeito da aplicação de maturadores químicos na cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp.) variedade SP81-3250. **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 30, n. 1, p. 65-71, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v30i1.1130>. Acesso em: 06 fev. 2020..

VIANA, R. da S.; FIGUEIREDO, P. A. M.; LISBOA, L. A. M.; PASCOALOTO, I. M. Características morfoanatômicas de folhas de cana-de-açúcar sob efeito residual de maturadores. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Londrina, v.14, n.4, p.306-314, out./dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.7824/rbh.v14i4.438>. Acesso em: 27 out. 2018.

VIANA, R. da S.; LISBOA, L. A. M.; FIGUEIREDO, P. A. M.; RODRIGUES NETO, A. D.. Parâmetros tecnológicos e produtivos da cana-de-açúcar quando submetida à aplicação de maturadores químicos no início de safra. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Londrina v. 16, n.1, p.67-75, jan./mar. 2017(a). Disponível em: <https://doi.org/10.7824/rbh.v16i1.496>. Acesso em: 06 fev. 2020.