LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO POR METAS E MÉTODO GRAUS-DIAS NA FORMULAÇÃO DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE COLHEITA DA CANA

Camila de Lima, Helenice de Oliveira Florentino, Daniela Renata Cantane
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Botucatu, SP
cla.silva@unesp.br, helenice.silva@unesp.br,
daniela.cantane@unesp.br

Paulo Roberto Isler
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Boituva, SP
pauloisler@ifsp.edu.br

RESUMO

O clima favorável do país associado ao uso de tecnologia avançada e a introdução de novas variedades de cana contribuíram significativamente para o crescimento da produção brasileira de cana nos últimos anos. Por envolver fatores econômicos, ambientais, políticos e sociais, o planejamento adequado do cultivo da cana é muito complexo e por isso técnicas matemáticas e computacionais são indispensáveis. Embora muitas dessas ferramentas auxiliem na tomada de decisões para o aumento da precisão e da lucratividade, poucas se preocupam com a influência dos fatores climáticos nos processos. Neste trabalho é proposto um modelo de otimização que utiliza a técnica de programação por metas para determinar os períodos ótimos de colheita da cana-de-açúcar atendendo a demanda mensal da usina, e considerando também o período de máxima produtividade, o qual é determinado a partir do uso do método graus-dias, considerando as condições climáticas.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento de colheita da cana. Programação por metas. Método graus-dias.

PO na Agricultura e Meio Ambiente. Otimização Combinatória. Metaheurísticas.

ABSTRACT

The favorable climate of the country associated to the advanced technology and the introduction of new varieties of sugarcane have contributed significantly to the growth of Brazilian sugarcane production in recent years. In this way, the planning of sugarcane cultivation is very complex because it involves economic, environmental, political and social factors and requires mathematical and computational techniques. While many of these tools help decision making to increase accuracy and profitability, few of these consider the influence of climate factors on processes. This paper proposes an optimization model that uses the goal-programming technique to determine the optimal sugarcane harvesting periods, taking into account the monthly demand of the sugarcane mill, and also considering the period of maximum productivity, which is determined by the degree-days method, which regards the climatic conditions of the period.

KEYWORDS. Sugarcane harvest planning. Goal programming. Degree-days method.

OR in Agriculture and the Environment. Combinatorial Optimization. Metaheuristics.

https://proceedings.science/p/106798?lang=pt-br

1. Introdução

Além da produção do açúcar, indispensável para a alimentação, e do álcool, utilizado em bebidas como a cachaça, o vinho e a cerveja, a cana-de-açúcar é uma alternativa muito promissora para o setor de biocombustíveis, devido ao grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos. De modo a operar com mais eficiência, reduzindo custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade, as unidades de produção também tem investido em geração de energia elétrica, e em menor escala, na produção de biogás, a partir dos resíduos da cana, como o bagaço e o palhiço [Conab, 2018].

A cultura da cana tem uma grande contribuição na economia nacional, uma vez que o Brasil é o maior produtor mundial de cana e o maior exportador de açúcar e etanol do mundo, devido às grandes áreas de cultivo, às condições climáticas e de solo e à grande demanda mundial por combustíveis de fontes renováveis, que diminuam os impactos no meio ambiente. E assim, surge a necessidade de aumentar a produção de cana, não somente aumentando a área de cultivo.

A introdução de novas variedades de cana, através do melhoramento genético de variedades existentes, a eficiência no uso de fertilizantes, a irrigação e a otimização do planejamento de plantio e de colheita, são algumas das possibilidades reais de aumentar a produtividade. Além disso, as variáveis climáticas, como temperatura, pluviosidade e intensidade luminosa, exercem grande influência sobre a fenologia e afetam diretamente a produtividade dessa cultura [Yamori et al., 2005]. De acordo com os autores, a temperatura é um dos fatores mais relevantes para o acúmulo de sacarose na cultura.

Dessa forma, um planejamento adequado de plantio e colheita no cultivo da cana, considerando as condições climáticas, é fundamental para suprir as demandas da usina e obter alta produtividade. No entanto, essa não é uma tarefa fácil, visto os complexos sistemas de gerenciamento de companhias sucroenergéticas, o impacto das mudanças climáticas, além de outros aspectos sociais, políticos, econômicos e ambientais. Nesse contexto, os gestores desse setor tem buscado ferramentas que auxiliem nas tomadas de decisões, e assim, técnicas de otimização tem se tornado indispensáveis para o planejamento eficiente de produção [Florentino et al., 2015], [Lima et al., 2017].

Embora muitas dessas ferramentas contribuam para o aumento da precisão e da lucratividade, poucas são as que se preocupam com a influência dos fatores climáticos nos processos. Uma estratégia que considera a temperatura para estimar o crescimento e a maturação da cana é o método graus-dias, o qual consiste na contagem do acúmulo diário de unidades térmicas entre as temperaturas base mínima e máxima que determinam a faixa ideal para o desenvolvimento vegetativo [Isler, 2016].

Assim, nesse trabalho é proposto um modelo matemático que considera o método graus-dias em sua formulação. O modelo tem por objetivo determinar o melhor período de colheita da cana, de modo a obter a máxima produção de sacarose e assim, uma alta produtividade, atendendo a demanda da usina em cada mês de colheita. Visando facilitar a formulação do modelo foi utilizada a técnica de programação por metas (do inglês: *Goal Programming*) cuja principal estratégia é a flexibilização das restrições do problema original, adicionando variáveis auxiliares denominadas desvios. Nessa técnica, o objetivo do problema passa ser a minimização dos desvios adicionados [Jones e Tamiz, 2010].

A Seção 2 descreve a influência da temperatura na cultura da cana. O método graus-dias e a forma como será utilizado para auxiliar na determinação da colheita no pico de maturação da cana são apresentados na Seção 3. O modelo de otimização para a determinação dos meses de colheita é descrito na Seção 4. A Seção 5 apresenta as possíveis formulações para a função objetivo

do modelo apresentado utilizando a técnica de programação por metas. Por fim, as considerações finais e agradecimentos são apresentados nas Seções 6 e 7, seguidos pelas principais referências bibliográficas que nortearam o trabalho.

2. Temperatura no cultivo da cana

Diversos fatores aceleram ou retardam os processos biológicos no que diz respeito ao desenvolvimento das plantas. Dentre estes, destacam-se a radiação, que age na fotossíntese, e a temperatura, um elemento catalisador para os processos fisiológicos. Considerando que a temperatura é uma conseqüência da radiação pode-se dizer que o desenvolvimento vegetativo pode ser estimado conhecendo o seu comportamento [Isler, 2011].

De acordo com [Scarpari, 2002], a temperatura ótima para a brotação é de 32 a 38^{o}C, para um ótimo crescimento o ambiente deve apresentar temperaturas diurnas entre 22 a 30^{o}C, para a maturação e colheita, é necessária a redução da temperatura para 10 a 20^{o}C na região Centro-Sul ou a redução pluviométrica na região Norte-Nordeste, quando há uma diminuição na taxa de crescimento e maior acúmulo de sacarose.

Devido a vasta extensão do território brasileiro, as mais variadas condições climáticas para a cultura da cana podem ser encontradas. Algumas áreas possuem clima ideal sem restrições, outras apresentam restrições térmicas e/ou hídricas moderadas, além de áreas que exigem recursos e técnicas especiais. Dessa forma, o Brasil é o único país no mundo com duas colheitas anuais, uma na região Norte-Nordeste, no período de setembro a abril, e uma na região Centro-Sul, que vai de maio à dezembro [Scarpari, 2002].

No estado de São Paulo, os tipos mais comuns de sistemas de produção baseados no ciclo da cana são a cana de ano, a cana de ano e meio, e as soqueiras. O plantio da cana de ano é feito de setembro a outubro, fase que a planta encontra condições favoráveis com temperaturas altas adequadas e regular precipitação por um período de sete meses. No estágio seguinte, com a redução da temperatura e da precipitação, a cana entra em fase de maturação podendo ser colhida, cerca de 11 a 14 meses depois. Enquanto que, o plantio da cana de ano e meio é realizado entre janeiro e março, período de calor e do final da época de chuva, que contribuem para um bom desenvolvimento inicial. Em seguida, a cana passa por repouso e a partir dos meses de setembro e outubro, volta a intensificar seu desenvolvimento vegetativo com o início das precipitações e o aumento da temperatura. A fase de maturação acontece com uma nova redução de temperatura e diminuição das chuvas,e assim, a cana é colhida 16 a 20 meses após o plantio. Em ambos sistemas de cana de ano e cana de ano e meio, depois que é realizada a primeira colheita, tem-se o que é chamado de soqueiras ou cana soca, as quais tem um ciclo de 12 meses de desenvolvimento. [Segato e Pereira, 2006].

Segundo [Yamori et al., 2005], a cana precisa completar seu ciclo de maturação para que tenha um bom rendimento em açúcar. Isso requer condições ambientais como as baixas temperatura, que provocam uma redução no desenvolvimento vegetativo, sem afetar o processo de fotossíntese, e a seca moderada, que em conjunto resultam em um maior acúmulo de açúcares.

Alguns fatores como os teores de sacarose e de açúcares redutores contidos no caldo da cana são decisivos para a determinação da época de colheita. [Maule et al., 2001] verificaram que a produtividade média diminui a medida que é adiada a época de colheita, após a comparação da produtividade de diferentes cultivares.

Além disso, o produto destinado a indústria deve atender uma série de requisitos para que o processo seja viável, dos quais dois merecem um destaque maior: o Pol (porcentagem em massa de sacarose aparente) e a fibra. A cana-de-açúcar contém, principalmente, três tipos de açúcares: sacarose, glicose e frutose. Desses açúcares, o maior teor é de sacarose, que está diretamente rela-

cionado com o ponto de maturação da cana [Fernandes, 2000]. Por outro lado, as variedades mais ricas em fibra têm maior resistência ao tombamento e geralmente são mais resistentes a penetração de pragas no colmo. O teor de fibra é importante para o balanço energético da indústria, considerando que as fibras são utilizadas para queima nas caldeiras, visando gerar energia elétrica para o abastecimento da própria usina.

Dessa forma, fica evidente a importância de um planejamento adequado do ciclo da cultura da cana para atender as demandas e obter altos níveis de produtividade. Esse processo compreende desde o preparo do solo até a entrega da cana na usina. As duas etapas de maior importância desse ciclo são o plantio e a colheita. Nesse trabalho considera-se que a usina já tenha realizado o plantio de diferentes variedade de cana na área destinada ao plantio, e deseja-se realizar o planejamento ótimo para a determinação da colheita da cana. Visto a influência da temperatura no desenvolvimento da cultura da cana, o método graus-dias, apresentado na Seção 3 a seguir, será utilizado para considerar esse fator importante na formulação do modelo.

3. Método Graus-dias

O método graus-dias é utilizado para estimar o desenvolvimento de uma planta em função da temperatura, sendo assim, pode ser utilizado para auxiliar o planejamento de plantio e colheita da cana-de-açúcar.

Para que uma planta se desenvolva nas melhores condições é necessária uma faixa de temperatura ideal, determinada por temperaturas base mínima e máxima ao longo do dia. Mesmo tendo condições favoráveis de radiação solar, fora destes limites o desenvolvimento da planta é reduzido ou até mesmo nulo. Para a cultura da cana-de-açúcar são utilizadas as temperaturas base mínima de 20^{o}C e máxima de 34^{o}C.

A Figura 1 representa a faixa de temperaturas para o desenvolvimento fenológico da cana. As temperaturas mínimas e máximas obtidas ao longo do dia estão representadas por T_{min} e T_{max}, respectivamente. Enquanto as temperaturas base mínima e máxima estão representadas por T_{Bmin} e T_{Bmax}.

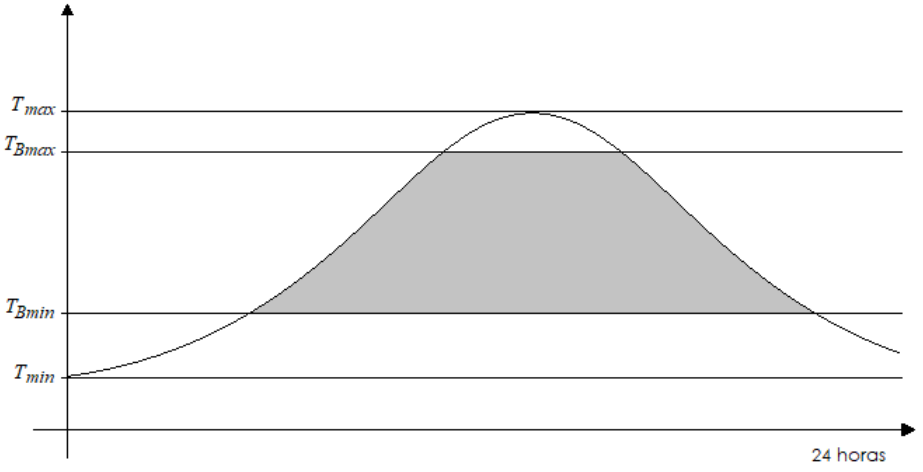


Figura 1: Faixa de temperaturas para o desenvolvimento da cana. Adaptado de [Isler, 2016].

O método graus-dias consiste em uma contagem diária das unidades térmicas entre as temperaturas T_{Bmin} e T_{Bmax} acumuladas ao longo do período de desenvolvimento da planta. Para

a cana de ano a quantidade de graus dias acumulados é 1250 e para cana de ano e meio é 1700.

Vários estudos tem sido realizados para caracterizar o ciclo de vida da cana-de-açúcar e determinar o melhor período de plantio, o momento das adubações, das irrigações e dos tratamentos contra as pragas [Barbano, 2001], [Lima, 2006] e [Almeida e Gonçalves, 2007]. Nesse trabalho, o método graus-dias foi utilizado para determinar os momentos de colheita de forma que a cana complete todo seu ciclo de desenvolvimento e seja colhida no momento adequado para obter o máximo de Pol.

3.1. Teor de Pol e Graus-dias

Sabe-se que o teor de Pol da cana de cada variedade depende dos graus-dias acumulados no período de cultivo. A produção da porcentagem de Pol inicia com um valor de graus-dias acumulado igual a ν_i aumenta até um valor de graus-dias acumulados ν^* em que ocorre a máxima produção de do teor de Pol por cana. A partir desse valor, a produção começa a decrescer até atingir ν_s graus-dias acumulados, como apresenta a Figura 2.

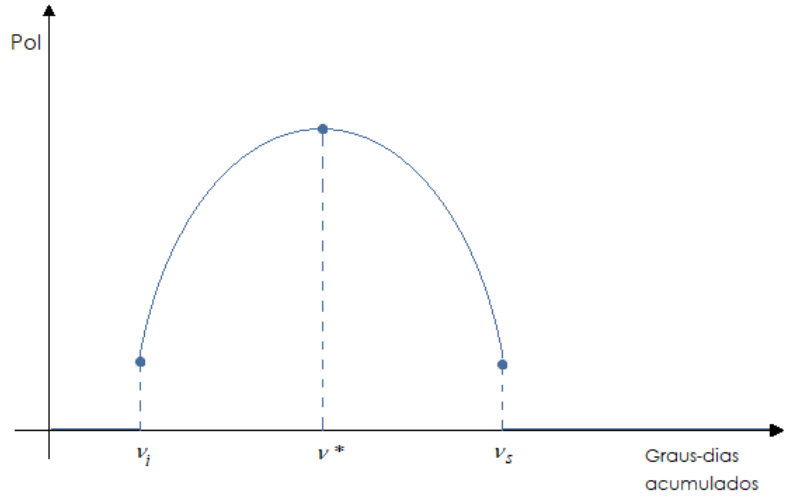


Figura 2: Variação do teor de Pol em função dos graus-dias acumulados . Adaptado de [Isler, 2016].

O cálculo do teor de sacarose presente na cana utilizando graus-dias acumulados é baseado em [Isler, 2016]. Quando os graus-dias acumulados são diferentes de ν^* o auxiliar utilizada para penalizar a produção de Pol na cana. Essa função foi ajustada por um polinômio de segundo grau que assume valor máximo igual a 1, quando o os graus-dias acumulados da variedade de cana é igual a ν^*; e zero nos pontos menores que ν_i maiores a ν_s.

No que segue, a Seção 4 apresenta o modelo matemático proposto para otimizar a colheita da cana, considerando os graus-dias acumulados para a determinação do período ideal, ou seja, no momento de máxima maturação, conforme apresentado nessa Seção.

4. Modelo de Otimização

Neste problema é considerada uma região dividida em k talhões, nos quais já estão plantadas n variedades de cana. São conhecidas as características particulares de cada variedade, bem como as informações relacionadas ao histórico de cana plantada em cada um dos talhões.

Além disso, sabe-se que o melhor momento para a colheita da cana é no seu pico de maturação, o qual pode ser calculado com o auxílio do método graus-dias.

Assim, o problema abordado consiste em determinar quais os talhões serão colhidos a cada mês m, tendo como meta a máxima maturação das variedades de cana plantada em cada talhão e atendendo a demanda de cana da usina mensalmente.

Sejam

$j = 1, 2, \ldots, k$: talhões que serão realizadas as colheitas.

$i = 1, 2, \ldots, m$: meses de colheitas.

Tem-se as seguintes variáveis de decisão associadas

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a variedade plantada no talhão } j \text{ é colhida no mês } m. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Sabe-se que cada um dos talhões deve ser colhido num único mês, ou seja

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = 1, \qquad j = 1, 2, \ldots, k.$$

No cultivo da cana, são necessários ν^* graus-dias acumulados para que seja alcançado o pico de maturação. A partir disso, é possível determinar o período ideal t^* para a colheita, associado aos ν^* graus dias acumulados. Considerando o histórico de cana de variáveis de cana plantada em cada talhão j, tem-se t_j^*, $j = 1, 2, \ldots, k$.

Visando facilitar a modelagem do problema, é realizada uma relaxação nos períodos de colheita da cana, adicionando variáveis de desvios (d_j^- e d_j^+) ao período ideal. Logo, o período de colheita é determinado pelas seguintes equações.

$$t_j = t_j^* + d_j^- - d_j^+, \qquad j = 1, 2, \ldots, k.$$

$$t_j = \sum_{i=1}^{m} x_{ij}\, i, \qquad j = 1, 2, \ldots, k.$$

em que $d_j^- \geqslant 0,\ d_j^+ \geqslant 0,\ j = 1, 2, \ldots, k.$

Além disso, a cada mês a usina tem uma demanda b_i de produção que deve ser atendida. Logo, a produtividade de Pol de toda cana colhida no mês m é dada por:

$$\sum_{j=1}^{k} x_{ij} P(t_j) L_j Prod_j \geqslant b_i, \qquad i = 1, 2, \ldots, m.$$

em que $P(t_j)$ é a produtividade da cana colhida no período t_j, L_j é a área do talhão j, $Prod_j$ é o teor de produtividade de Pol da variedade plantada no talhão j.

Por fim, o objetivo do problema após a relaxação realizada passa a ser a minimização das variáveis de desvios. Considerando a técnica de programação por metas, a função objetivo poderá ser alterada para a forma que melhor se adapte ao problema, como apresentado na Seção 5. Tem-se então o seguinte modelo de otimização:

$$\text{Minimizar} \quad f(d_j^-, d_j^+) \qquad j = 1, 2, \ldots, k \tag{1}$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{i=1}^{m} x_{ij} = 1, \qquad j = 1, 2, \ldots, k \tag{2}$$

$$t_j = t_j^* + d_j^- - d_j^+, \qquad j = 1, 2, \ldots, k \tag{3}$$

$$t_j = \sum_{i=1}^{m} x_{ij}.i, \qquad j = 1, 2, \ldots, k \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{k} x_{ij} P(t_j) L_j Prod_j \geqslant b_i, \qquad i = 1, 2, \ldots, m \tag{5}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \qquad i = 1, 2, \ldots, m \quad \text{e} \quad j = 1, 2, \ldots, k \tag{6}$$

$$d_j^- \geqslant 0, \qquad j = 1, 2, \ldots, k \tag{7}$$

$$d_j^+ \geqslant 0, \qquad j = 1, 2, \ldots, k \tag{8}$$

A Seção 5 a seguir, apresenta as possíveis formulações para a função objetivo utilizando a técnica de programação por metas.

5. Programação por metas

De modo geral, em um problema modelado utilizando a técnica de programação por metas (*goal programming*), o objetivo é determinar uma solução que atinja todas as metas, da forma mais certeira possível. Assim, a solução ideal, seria aquela em que cada meta é atingida, exatamente, no ponto desejado e todas as variáveis de desvio seriam iguais a zero. No entanto, isso dificilmente acontece, porque algumas metas são conflitantes entre si, impossibilitando a solução ideal. Dessa forma, deseja-se determinar uma solução que desvie o mínimo possível da solução ideal. Como muitas vezes as variáveis envolvidas tem grandezas diferentes (horas, quantidade, valores monetários), é realizada uma normalização, em que os desvios (números absolutos) são tranformados em desvios percentuais em relação à meta desejada, e assim, são tratados da mesma forma. As formulações apresentadas nesta seção foram desenvolvidas baseando-se em [Jones e Tamiz, 2010].

Desta maneira, é necessário atribuir pesos aos desvios percentuais (dando prioridade à determinadas metas em relação às outras), gerando, então, uma função objetivo final que visa minimizar a soma ponderada dos percentuais dos desvios, evitando tratar todos os desvios percentuais da mesma forma. Assim, a variável cujo desvio é considerado indesejável apresenta um alto peso relativo (distante de zero), enquanto uma variável cujo desvio não seja tão indesejável apresenta um baixo peso relativo (próximo de zero). Em caso de neutralidade em relação ao desvio, o peso será nulo. Essa estratégia para a determinação da função objetivo é a programação por metas ponderada (*wheighted goal programming*). Neste caso, tem-se então a seguinte função objetivo equivalente a (1), associada ao problema definido de (2)-(8):

$$\text{Minimizar} \sum_{j=1}^{k} \frac{1}{t^*}(w_j d_j^- + u_j d_j^+) \tag{9}$$

em que w_j são os pesos associados às variáveis de desvios para menos d_j^- e u_j são os pesos associados às variáveis de desvios para mais d_j^+.

Outra estratégia para a determinação da função objetivo é a programação por metas com priorização (*lexicographic goal programming*), na qual é atribuído a priori pelo decisor um nível de prioridade. Nesse caso, considerando-se os níveis $N_1, N_2, N_3, \ldots, N_n$, com $N_1 > N_2 > N_3 > \ldots > N_n$, e cada objetivo l é otimizado (individualmente) seguindo a ordenação natural. Quando pretende-se otimizar o objetivo associado ao nível N_{l+1}, uma nova restrição é adicionada ao modelo, cem que o objetivo associado ao nível N_l é mantido no seu valor ótimo. Dessa forma, a função objetivo equivalente a (1), associada ao problema definido de (2)-(8) é dada por:

$$\text{Minimizar}[h_{N_1}(d_j^-, d_j^+), h_{N_2}(d_j^-, d_j^+), \ldots, h_{N_n}(d_j^-, d_j^+)] \tag{10}$$

E assim, $h_{N_l}(d_j^-, d_j^+)$ é calculado como:

$$h_{N_l}(d_j^-, d_j^+) = \sum_{j=1}^{k} \frac{1}{t^*}(w_j^{N_l} d_j^- + u_j^{N_l} d_j^+). \tag{11}$$

Em muitos problemas de decisão pode ser muito difícil estabelecer as metas a serem atingidas. Neste caso é possível adotar a programação por metas Chebyshev, também conhecida por Minmax (*Chebyshev or Minmax goal programming*), a qual busca minimizar o limitante superior ou maximizar o limitante inferior de um intervalo identificado, em que as metas possam variar entre valores mínimos e valores máximos. Para o problema apresentado de (2)-(8), afunção objetivo equivalente a (1) é definida por:

$$\text{Minimizar}\, \alpha \tag{12}$$

e o conjunto de restrições é adicionado ao problema

$$\frac{w_j d_j^-}{t^*} + \frac{u_j d_j^+}{t^*} \leqslant \alpha, \qquad j = 1, 2, \ldots, k. \tag{13}$$

Outras estratégia para a formulação de funções objetivos podem ser consultadas em [Jones e Tamiz, 2010].

6. Considerações

Neste trabalho é proposto um modelo de otimização que utiliza o método graus-dias para determinar os melhores períodos de colheita da cana, o qual está associado ao pico de maturação da cana. Para facilitar a formulação do modelo, foi utilizada a técnica de programação por metas, que realiza a relaxação dos períodos de colheita através de desvios que são adicionados ao problema original. Assim, o objetivo do problema passa a ser a minimização desses desvios.

Este trabalho ainda encontra-se em desenvolvimento, para a próxima etapa, está prevista a fase de testes computacionais, a partir da implementação computacional do modelo, bem como a implementação de heurísticas para a resolução do mesmo, a fim de realizar a validação e determinar qual a melhor estratégia de programação por metas a ser adotada na formulação da função objetivo do problema. Inicialmente, serão utilizados dados de regiões de Botucatu e Votuporanga, cujos dados de graus-dias acumulados ja foram calculados baseando-se nas médias de temperaturas de um período de dez anos e estão presentes em [Isler, 2016].

A modelagem proposta tem uma contribuição significativa para a área agrária, uma vez que as mudanças climáticas têm causado alterações consideráveis na fenologia e nos eventos do ciclo de vida de plantas. Além disso, atualmente nota-se uma grande necessidade de trabalhos envolvendo condições climáticas no planejamento de colheita da cana.

https://proceedings.science/p/106798?lang=pt-br

7. Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Biometria do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu, à CAPES pela bolsa do Programa Nacional de Pós-Doutorado (PNPD/CAPES/ Processo: 317796/2019-01) e ao suporte financeiro do CNPq (Processo: 302454/2016-0) e da Fapesp (Processo: 2013/07375-0).

Referências

Almeida, F. S. e Gonçalves, L. (2007). Efeitos da temperatura e do alimento no desenvolvimento de dysdercus maurus distant (hemiptera, pyrrhocoridae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 51 (4).

Barbano, M. T. (2001). Temperatura-base e acúmulo térmico no sub-período semeadura florescimento masculino em cultivares de milho no estado de são paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9(2):261–268.

Conab (2018). *Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento*. Brasília.

Fernandes, A. C. (2000). *Cálculos na agroindústria canavieira*. STAB, Piracicaba.

Florentino, H. O., Pato, M. V., Jones, D., e Cantane, D. R. (2015). Production and management of sugarcane biomass process optimization. *Biomass Production and Uses*, 1:11–28.

Isler, P. R. (2011). Ferramentas matemáticas para modelagem da temperatura com aplicação em graus-dias para otimização da produção agrícola. Dissertação de mestrado, UNESP, Botucatu.

Isler, P. R. (2016). Planejamento ótimo de plantio e colheita da cana-de-açúcar utilizando graus-dias. Tese de doutorado, UNESP, Botucatu.

Jones, D. e Tamiz, M. (2010). Practical goal programming. In *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer.

Lima, C., Balbo, A. R., e Florentino, H. O. (2017). A hybrid approach combining interior-point and branch-and-bound methods applied to the problem of sugarcane waste. *Journal of the Operational Research Society*, 67(1):1–20.

Lima, E. P. (2006). Graus-dia, temperatura base e coeficientes de cultura para cafeeiros arábica em fase de implantação. Tese de doutorado em engenharia agrícola/irrigação e drenagem, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Maule, R. F., Mazza, J. A., e Martha Jr, G. B. (2001). Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita). *Scientia Agricola*, 58:295–301.

Scarpari, M. S. (2002). Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (sacchrum spp.) através de parâmetros climáticos. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Segato, S. V. e Pereira, L. L. (2006). Colheita da cana-de-açúcar: corte manual. In *Atualização em produção de cana-de-açúcar(Eds)*. FUNEP.

Yamori, W., Noguchi, K., e Terashia, I. (2005). Temperature acclimation of photosynthesis in spinach leaves: analysis of photosynthetic components and temperature dependencies of photosynthetic partial reactions. *Plant Cell Environmental*, 28:536–547.

https://proceedings.science/p/106798?lang=pt-br