

OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PLANEJAMENTO DE PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO GRAUS-DIAS

Paulo R. Isler, Rômulo Pimentel Ramos

UNESP - Univ. Estadual Paulista, FCA – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Pós Graduação em Agronomia (Energia na Agricultura), Rua Dr. José Barbosa de Barros, 1780, CEP:18610-307, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: pauloisler@fca.unesp.br, romulo.pimentel@hotmail.com

Helenice O. Florentino, Daniela R. Cantane

UNESP - Univ. Estadual Paulista, IBB - Instituto de Biociências, Departamento de Bioestatística, Distrito de Rubião Júnior, S/N, CEP: 18618-970, Botucatu, SP, Brasil.

E-mail: helenice@ibb.unesp.br, dcantane@ibb.unesp.br

RESUMO

Nos últimos anos a produção de cana-de-açúcar tem crescido muito e esta grande produção se deve, em grande parte, ao clima do país, pois apesar das variações atuais de temperatura, o Brasil ainda possui um clima adequado para o cultivo de um grande número de espécies. No entanto, as grandes dimensões do país, a rapidez no desenvolvimento e as intensas modificações climáticas, têm trazido grandes problemas técnicos, econômicos e administrativos. Assim, os gestores do setor sucroalcooleiro têm buscado o auxílio de técnicas matemáticas e computacionais na obtenção de estimativas e nas tomadas de decisões. Este trabalho propõe o uso de técnicas de otimização para auxiliar planejamentos de plantio e colheita da cana-de-açúcar, de acordo com as condições climáticas, utilizando o método de Graus-dias, visando aumentar a produtividade no período de cinco anos. O trabalho consta da formulação de um modelo de otimização para determinar períodos ótimos de plantio e colheita da cana-de-açúcar. É proposto também um Algoritmo Genético (AG) para resolução do modelo e alguns estudos mostrando a necessidade de utilização destas técnicas de otimização. Os resultados computacionais da aplicação do AG para determinação de planejamentos otimizados estão em fase final de implementação.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, plantio, colheita, cana-de-açúcar, graus-dias.

Área principal. AG & MA – PO na Agricultura e Meio Ambiente.

ABSTRACT

In recent years, the production of sugarcane has grown and it can be due climate of the Brazil, because despite the current temperature variations, the Brazil still has a suitable climate for the cultivation of a large number of species. However, the large size of the country, the speed in the development and intense climate changes, have brought great technical, economic and administrative problems. Thus, managers of the alcohol and sugar sector have sought the aid of mathematical and computational tools for obtaining estimates and decision-making techniques. This work proposes the use of optimization techniques to assist planning of planting and harvesting of sugarcane, according to the climatic conditions, using the method of degree-days, aiming to increase productivity within five years. The work consists of the formulation of an optimization model to determine optimal periods of planting and harvesting of sugarcane. It also proposes a Genetic Algorithm (GA) to solve the model and some studies showing the necessity of using these optimization techniques. The computational results of the application of GA for determining the optimal plans are in final stages of implementation.

KEYWORDS. Optimization, plantation, crop, sugar cane, degree days.

Main área. AG & MA – OR in Agriculture and Environment.

1. Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o maior exportador mundial de açúcar Conab (2013), o que vem influenciar diretamente a economia brasileira. No mercado nacional, a cana tem ganhado espaço, pois recentemente houve um aumento de 5% na mistura de álcool à gasolina e o Brasil conta com 16,9% de participação na matriz energética, considerando-se o álcool combustível e a co-geração de eletricidade, a partir do bagaço EPE (2012). Portanto, surge a necessidade de aumentar a produção. Porém, aumentar a área cultivada não é a única forma de incrementar a produção de cana-de-açúcar. O melhoramento genético dos cultivares, a eficiência no uso de fertilizantes, a irrigação e a otimização da relação entre o plantio e a colheita, da área pertencente a uma usina, são possibilidades reais de aumentar a produtividade.

Outro fator determinante para o rendimento da cultura são as variáveis climáticas, como a variação térmica, pluviosidade e intensidade luminosa que exercem grande influência sobre a fenologia da cultura da cana-de-açúcar, afetando diretamente a produtividade Liu, Kingston e Bull (1998) e Yamori, Noguchi e Terashia (2005). Além desses fatores, o manejo da cultura, as características da variedade e do solo também exercem importante influência na produtividade e maturação Consecana (1998).

A temperatura afeta uma série de processos na planta como a brotação dos toletes, que ainda pode ser prejudicada pela falta ou pelo excesso de umidade no solo Coleti e Stuppiello (2006). Além disso, a temperatura ambiente também afeta o perfilhamento Liu, Kingston e Bull (1998), temperaturas abaixo de 20°C podem parar o crescimento do perfilho Copersucar (1983).

De acordo com Segato e Pereira (2006), a indução do florescimento ocorre com maior frequência com temperaturas na faixa de 18°C a 31°C no período foto-indutivo, ressaltando que essas temperaturas devem ocorrer em pelo menos dez ciclos indutivos (não necessariamente sucessivos), exigindo-se tais condições por volta de 10 dias.

Com o florescimento, ocorrem alterações morfofisiológicas da planta, sendo a principal consequência, a redução de volume do caldo Carolo (2008), Casagrande (1991) e Stuppiello (1987). A florada acarreta uma série de prejuízos e perdas, por conta da inversão de sacarose nos colmos. Ao emitir o pendão, a cana-de-açúcar envia açúcar para o local, reduzindo a qualidade e a produtividade da matéria-prima para a indústria. Além destes fatores, Liu, Kingston e Bull (1998) destacam que a cana-de-açúcar precisa completar seu ciclo de maturação para que tenha um bom rendimento em açúcar. A planta precisa de condições ambientais que induzam uma redução do crescimento, sendo que os agentes mais efetivos são as baixas temperaturas e a seca moderada. A temperatura é um dos fatores mais relevantes para o acúmulo de sacarose na cultura, o tempo frio retarda o desenvolvimento e aumenta o teor de sacarose Yamori, Noguchi e Terashia (2005).

Existem ainda outros fatores que combinados as condições climáticas afetam a produção e a qualidade da cana-de-açúcar, como por exemplo, os momentos de plantio e corte Câmara (1993). O aumento da produtividade, no setor sucroalcooleiro, é conseguido com a introdução de novas variedades de cana-de-açúcar e com manejo correto da cultura, buscando a época de colheita em que a produtividade agroindustrial se encontra maximizada Silva, Jeronimo e Lúcio (2008).

Escolher quais são as variedades e as épocas de plantio e colheita não é tarefa fácil, devido a este fato os gestores tem buscado ferramentas que auxiliem no planejamento do plantio e da colheita da cana-de-açúcar e uma alternativa para este problema é a modelagem matemática. Neste trabalho é proposto um modelo para auxiliar planejamentos de plantio e colheita da cana-de-açúcar, de acordo com as condições climáticas, utilizando o método de Graus-dias, visando aumentar a produtividade no período de cinco anos.

2. A influência da temperatura no plantio e na colheita da cana-de-açúcar

Segundo Calça, Colletti e Glória (1983), nas usinas do Estado de São Paulo existem três tipos de sistemas de produção baseados no ciclo da cana, a cana planta de ano, cana planta de ano e meio,

e as soqueiras. A cana-planta de ano é aquela plantada de Setembro a Outubro e cuja colheita se efetua de onze a quatorze meses após o plantio, conforme as condições da região. A cana planta de ano e meio é plantada de Janeiro a Março e a colheita realizada de 16 a 20 meses após.

Em Brieger e Paranhos (1964) e Segato e Pereira (2006) o plantio da cana de ano é feito entre Setembro e Outubro, neste período a planta encontra uma faixa de temperatura alta adequada e regular precipitação e estas condições favoráveis para o estado vegetativo persistem por sete meses. Com a redução da temperatura e da precipitação, no estágio seguinte, a cana entra em fase de maturação podendo ser colhida.

Para o plantio da cana de ano e meio feito entre Janeiro e Março, o calor e o final da época de chuva garantem bom desenvolvimento inicial e, em seguida, a cana passa por repouso. A partir de Setembro e Outubro, com o início das precipitações e o aumento da temperatura, retorna a intensificar seu desenvolvimento vegetativo. Com uma nova redução de temperatura e diminuição das chuvas, a planta começa a fase de maturação, momento este em que é colhida Frazão (1976).

A época de colheita é determinada levando-se em conta alguns fatores como os teores de sacarose e de açúcares redutores contidos no caldo da cana Brieger e Paranhos (1964). Por isso, não é recomendado iniciar a colheita enquanto a cana-de-açúcar não atingir os padrões tecnológicos mínimos para a sua industrialização, quando o objetivo é a produção de açúcar Copersucar (1983).

Nos estudos feitos por Maule, Mazza e Marta Jr (2001), ao comparar a produtividade de diferentes cultivares em relação à época de colheita, verificaram que a produtividade média diminui conforme se atrasa a época de colheita. O ambiente de produção pode garantir um melhor manejo de colheita da cultura da cana-de-açúcar, garantindo a sua máxima exploração econômica.

Segundo Silva, Jeronimo e Lúcio (2008) a colheita da cana-de-açúcar em Setembro, comparada com Julho e Maio, proporciona maior rendimento em TCH (Toneladas de cana/ha), PCC (POL cana), fibra, ATR (Açúcar Teórico Recuperável) e TPH (Toneladas de POL/ha).

A matéria prima destinada a indústria deve atender uma série de requisitos para que o processo seja viável, dentre estes dois merecem um destaque maior o POL e a fibra. Segundo Fernandes (2000) a fibra é a matéria insolúvel em água contida na cana e constitui-se em matéria de grande importância na agroindústria canavieira. Sob o aspecto agrícola, as variedades mais ricas em fibra têm maior resistência ao tombamento, mesmo quando submetidas à despalha e fogo e geralmente são mais resistentes a penetração de pragas no colmo, como é o caso da broca *Diatraea saccharalis*.

Sob o ponto de vista industrial, o teor de fibra é importante para o balanço energético da indústria, já que as fibras são utilizadas para a queima nas caldeiras gerando o vapor que será transformado em energia elétrica para abastecer a própria usina. No início da safra é de fundamental importância que as variedades tenham maiores teores de fibra para garantir o suprimento de combustível para as caldeiras. Em meio e final de safra, a importância diminui em função dos estoques acumulados ao longo dos dias de moagem.

Segundo Fernandes (2000), POL representa a porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares (por exemplo, o caldo da cana) sendo determinado por métodos sacarimétricos (polarímetros ou sacarímetros). 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 relacionado com o ponto de maturação da cana.

De acordo com as normas encontradas em Consecana (1998), a cana-padrão, em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial, deve apresentar o teor de sacarose (POL%cana) de 12,257%. As variedades apresentam teores de sacarose variáveis ao longo da safra. Variedades precoces são aquelas que apresentam POL%cana superior a 12,257% no início da safra, enquanto as médias e tardias apresentam tais valores a partir do meio da safra.

As variedades consideradas pobres apresentam um período adequado para corte considerado curto de aproximadamente três meses, as variedades consideradas médias possuem um período destinado ao corte maior num intervalo de até quatro meses, já as variedades ricas

podem ser colhidas em uma ampla faixa no decorrer da safra chegando até seis ou sete meses dependendo da cultivar. A Figura 1 ilustra esta característica.

Para atender as demandas e obter altas produtividades é necessário um planejamento adequado do ciclo da cultura. Esse ciclo vai 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.

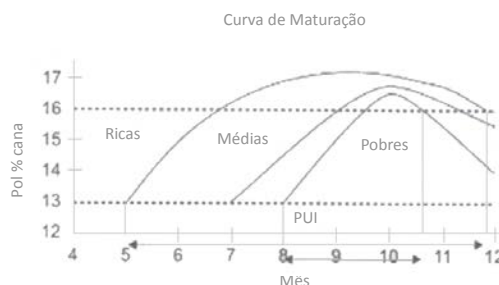


Figura 1: Curva de maturação para diferentes cultivares (adaptado de Stuppiello (1987)).

Para atender as demandas e obter altas produtividades é necessário um planejamento adequado do ciclo da cultura. Esse ciclo vai 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.

Com o objetivo de auxiliar o planejamento de plantio e colheita da cana-de-açúcar, propõe-se a utilização do método de Graus-dias (GD) para estimar o desenvolvimento da planta em função da temperatura. O GD necessita da temperatura base (Figura 2), que é aquela que delimita a temperatura mínima (T_b) e a máxima (T_B) propícia para o desenvolvimento da planta, que é reduzido ou até mesmo nulo fora destes extremos mesmo tendo condições favoráveis de radiação solar. Para a cultura da cana-de-açúcar é utilizada como $T_b = 20^\circ\text{C}$ e $T_B = 34^\circ\text{C}$.

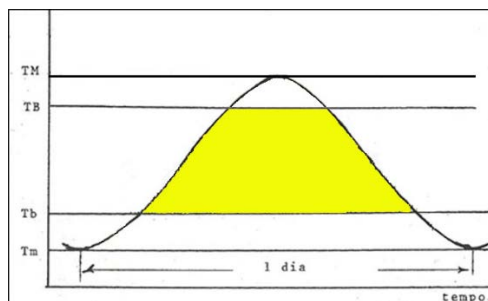


Figura 2: Temperatura base para desenvolvimento da cana-de-açúcar.

O método GD é uma contagem, não de dias como no calendário comum, mas de unidades térmicas entre as temperaturas T_b e T_B ocorridas em um dia. Os GD podem ser acumulados ao longo do desenvolvimento da planta e denota-se por GDA. Para a cana de ano $GDA=1250$ e para cana de ano e meio $GDA=1700$.

De acordo com Maule, Mazza e Marta Jr (2001) um plantio de boa qualidade tem influência direta não somente nos fatores que determinarão se a cultura terá uma boa produtividade após a colheita, mas também na redução dos custos de produção da cultura. A importância das operações iniciais exige bom planejamento e muito conhecimento técnico Copersucar (1983). As tomadas de decisões nessa fase vão influenciar todo o ciclo da cultura e o processo de plantio destaca-se pelos elevados custos envolvidos. O planejamento da colheita busca otimizar o seu retorno econômico, com base no conceito de que a cana-de-açúcar possui uma época mais adequada para a colheita Humbret (1968) de acordo com os GDA.

3. O modelo matemático proposto

Sejam $x_{ij\bar{t}}$ e y_{jt_c} as variáveis do modelo, tais que $x_{ij\bar{t}}=1$ implica que a variedade i será plantada no talhão, j no instante $\bar{t}$ e $x_{ij\bar{t}}=0$ em caso contrário, $y_{jt_c}=1$ implica que a cana plantada no talhão, j será colhida no instante t_c , para cada corte c e $y_{jt_c}=0$ em caso contrário. Segue o modelo proposto.

$$\text{maximizar } \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{\bar{t} \in I_{\text{plantio}}} \sum_{t=t_{0j}}^{1825} \sum_{c=1}^4 x_{ij\bar{t}} \cdot y_{jt_c} \cdot f_{1c}(i, GDA(t)) \cdot L_j \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\bar{t} \in I_{\text{plantio}}} x_{ij\bar{t}} = 1 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

$$\bar{t}_j = \sum_{i=1}^n \sum_{\bar{t} \in I_{\text{plantio}}} x_{ij\bar{t}} \cdot i \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

$$t_{0j} = \sum_{\bar{t} \in I_{\text{plantio}}} x_{ij\bar{t}} \cdot \bar{t} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

$$\sum_{t=t_0}^{t_0+600} y_{jt} = 1 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

$$t_{1j} = \sum_{t=t_0}^{t_0+600} y_{jt} \cdot t \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

$$\sum_{t=t_{c-1}}^{t_{c-1}+420} y_{jt} = 1 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \text{ e } c = 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$t_{cj} = \sum_{t=t_{c-1}}^{t_{c-1}+420} y_{jt} \cdot t = 1 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \text{ e } c = 2, 3, 4 \quad (8)$$

$$M_I \leq \sum_{j=1}^k y_{jt_{cj}} \cdot f_{2c}(i, GDA) \cdot L_j \leq M_S \quad \text{para } c = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

$$F_I \leq \sum_{j=1}^k (y_{jt_{cj}} \cdot f_{3c}(i, GDA) \cdot L_j) \leq F_S \quad \text{para } c = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{\bar{t} \in I_{\text{plantio}}} x_{ij\bar{t}} \cdot L_j \leq 0,15 \cdot A \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$x_{ijt} = 1 \text{ ou } 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad t = 1, 2, \dots, 1825 \quad (12)$$

$$y_{jt} = 1 \text{ ou } 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \quad t = 1, 2, \dots, 1825 \quad (13)$$

onde:

$$GDA(t) = GDA(t_{c-1}, t_c) \quad c = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

$$f_{1c}(i, GDA) = \begin{cases} 0, & \text{se } GDA < G_I \text{ ou se } GDA > G_S \\ Pol_{ic} \cdot f_{Pol}(GDA) & \end{cases} \quad (15)$$

$$f_{Pol}(GDA) = -4,44 \cdot 10^{-5} \cdot (GDA)^2 + 0,11 \cdot (GDA) - 68,44 \quad (16a)$$

$$f_{Pol}(GDA) = -4,44 \cdot 10^{-5} \cdot (GDA)^2 + 0,1511 \cdot (GDA) - 127,44 \quad (16b)$$

$$f_{2c}(i, GDA) = \begin{cases} 0, & \text{se } GDA < G_I \text{ ou se } GDA > G_S \\ Prod_{ic} \cdot f_{Prod}(GDA) & \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{Prod}(GDA) = -4,44 \cdot 10^{-5} \cdot (GDA)^2 + 0,11 \cdot (GDA) - 68,44 \quad (18a)$$

$$f_{Pol}(GDA) = -4,44 \cdot 10^{-5} \cdot (GDA)^2 + 0,1511 \cdot (GDA) - 127,44 \quad (18b)$$

$$f_{3c}(i, GDA) = \begin{cases} 0, & \text{se } GDA < G_l \text{ ou se } GDA > G_s \\ Fib_{ic} \cdot f_{Fib}(GDA) \end{cases} \quad (19)$$

$$f_{Fib}(GDA) = -2 \cdot 10^{-5} \cdot (GDA)^2 + 0,0537 \cdot (GDA) - 34,87 \quad (20)$$

Temos que: $i = 1, 2, \dots, n$ são índices associados as variedades, $j = 1, 2, \dots, k$ índices associados aos talhões, $t = 1, 2, \dots, 1825$ são os índices associados aos períodos em dias, ou seja o horizonte de planejamento é de 1825 dias (5 anos); $GDA(t)$ são os Graus-dias acumulados no intervalo $[t_c - t_{c-1}]$, L_j é a área de cada talhão j em ha, Pol_{ic} é a quantidade POL da variedade i no corte c em ton . ha⁻¹, $Prod_{ic}$ representa a produtividade em toneladas da variedade i no corte c , Fib_{ic} é o teor de fibra da variedade i no corte c , F_l e F_s são os limitantes inferior e superior estabelecidos para a fibra da cana em qualquer tempo, em geral usa-se $F_l = 8\%$ e $F_s = 14\%$, M_l e M_s são as capacidades mínima e máxima da indústria para moagem da cana. G_l e G_s representam os Graus-dias acumulados mínimo e máximo, respectivamente, onde é viável o corte da cana-de-açúcar.

O modelo determina qual o período t e qual a variedade i de cana-de-açúcar deverá ser plantada em cada talhão j , de forma a maximizar a função objetivo (1), ou seja, maximizar a produção de açúcar (POL) da cana nos 4 cortes, as restrições (2) garantem que haverá plantio da cana em todo talhão j no primeiro ano, no período propício que inclui os meses de Setembro e Outubro ($244 \leq t \leq 304$) (cana de ano), ou nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março ($t \leq 90$) (cana de ano e meio), as Equações (3) definem $\bar{t}_j$, ou seja, a variedade a ser plantada no talhão j , as Equações (4) definem t_{0j} , ou seja, o dia de plantio em cada talhão j no ano 1, as restrições (5) garantem que haverá colheita da cana plantada em cada talhão j no primeiro corte, as Equações (6) definem t_{1j} , ou seja, o período que haverá o primeiro corte no talhão j , as restrições (7) garantem que haverá a colheita da cana em todos os talhões nos cortes 2, 3, 4, as Equações (8) definem t_{cj} , $c = 2, 3, 4$, ou seja, o período que haverá colheita da cana em cada talhão j nos segundo, terceiro e quarto cortes, as restrições (9) garantem que seja satisfeita a capacidade da usina para moagem de cana em todos os períodos de colheita, respeitando a capacidade máxima e mínima estabelecidas pela indústria, as restrições (10) garantem que sejam satisfeitas os limitantes inferior e superior de fibra requerida pela usina em todos os anos do planejamento, as restrições (11) garantem que as variedades sejam plantadas no máximo em 15% da área total destinada ao plantio, as restrições (12) e (13) definem as variáveis do problema como variáveis binárias. A Equação (14) representa a função que expressa os Graus-dias acumulados no intervalo $[t_c - t_{c-1}]$, a Equação (15) representa a função $f_{1c}(i, GDA)$ que determina o teor de POL da variedade i com GDA (Graus-dias acumulados) no corte c em ton . ha⁻¹. As Equações (16a e 16b) apresentam a função $f_{Pol}(GDA)$ que irá associar os Graus-dias acumulados com o POL da variedade i obtida na Equação (15), $f_{Pol}(GDA)$ assume valores no intervalo $[0,1]$, de tal forma que $f_{Pol}(GDA) = 1$ implica que o teor de POL da variedade i será máximo. A Equação (17) representa a função $f_{2c}(i, GDA)$ que determina a produção de cana da variedade i com GDA (Graus-dias acumulados) no corte c em ton . ha⁻¹. As Equações (18a e 18b) apresentam a função $f_{Prod}(GDA)$ que irá associar os Graus-dias acumulados com a produção da variedade i obtida na Equação (17), $f_{Prod}(GDA)$ assume valores no intervalo $[0,1]$, de forma quando $f_{Prod}(GDA) = 1$ primeira produção da variedade i será máxima. A Equação (19) representa a função $f_{3c}(i, GDA)$ que determina o teor de fibra da variedade i com GDA (Graus-dias acumulados) no corte c em %. A Equação (20) apresenta a função $f_{Fib}(GDA)$ que irá associar os Graus-dias acumulados com o teor de fibra da variedade i obtida na equação (19), quando $f_{Fib}(GDA) = 1$ o teor de fibra ocorreu para o GDA ótimo, porém o teor de fibra continuará aumentando após este valor.

O problema (1)-(20) é um PPNI 0-1 de difícil resolução, principalmente quando se tem números elevados de talhões e variedades. O número de talhões nas usinas atuais inviabilizam a resolução deste por técnicas de otimização exatas, assim deve-se investigar métodos heurísticos para determinar boas soluções factíveis.

4. Algoritmo genético para resolução do modelo

Algoritmo GA_PLANTIO

1) Estruturação do cromossomo (ou indivíduo):

O primeiro passo é a criação dos indivíduos da população, os quais são dados por uma matriz de j colunas representando os talhões e 41 linhas destinadas aos meses de plantio e colheita. As cinco primeiras linhas representam os meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Setembro e Outubro do primeiro ano, meses destinados ao plantio da cana, as demais linhas representam os períodos de colheita para os quatro cortes, variando de Abril à Dezembro para cada corte, conforme Figura 2.

Na Figura 2 é apresentado um exemplo de planejamento de um talhão, onde a variedade 2 foi plantada no talhão 1 no mês de janeiro (primeira linha), ou seja, cana de ano e meio (18 meses), então ela pode ser colhida no intervalo de abril (16 meses) a agosto (20 meses) do ano seguinte (primeiro corte), o primeiro corte foi realizado em junho (18 meses). Após o primeiro corte, a cana passa a ser colhida aproximadamente com 12 meses, ou seja dentro de um intervalo de 10 meses a 14 meses após o corte anterior, sendo assim, o segundo corte pode ser realizado entre os meses de abril (10 meses) e agosto (14 meses), sendo que foi feito no mês de julho (13 meses). Já o terceiro corte pode ser feito entre os meses de maio (10 meses) e setembro (14 meses), pois o segundo corte ocorreu em julho, assim, o terceiro corte ocorreu no mês de setembro (14 meses). O quarto corte pode ocorrer entre os meses de julho (10 meses) e novembro (14 meses), porém, foi realizado no mês de outubro (13 meses).

2) Geração da população inicial:

O segundo passo é a geração da população inicial composta de NP indivíduos. Para criação destes indivíduos são escolhidas aleatoriamente dentre as variedades adaptáveis ao solo local e enumeradas 1, ..., n , quais e em que período serão plantadas nos k talhões. Os meses de colheita são escolhidos aleatoriamente respeitando as restrições de períodos de corte para cada talhão. Após a criação da população inicial todos os indivíduos são avaliados.

3) Avaliação dos indivíduos:

A avaliação de cada indivíduo é feita a partir do valor de sua aptidão (ou *fitness*). O *fitness* de cada indivíduo é medido da seguinte forma: $f_{Ind} = \frac{FO_{Ind}}{p_{Ind}}$,

	1	2	...	k	
i	3	8			Variedade
t_0	28	245			Plantio
t_1	485	605			1° Corte
t_2	865	1000			2° Corte
t_3	1265	1395			3° Corte
t_4	1620	1745			4° Corte

Figura 2. Estrutura do cromossomo

em que f_{Ind} , FO_{Ind} e p_{Ind} são respectivamente o *fitness*, o valor da função objetivo e a penalização do indivíduo Ind . A penalização p_{Ind} do indivíduo ind é zero se o indivíduo for factível e assume um valor real maior que zero se for uma solução infactível. O valor de p_{Ind} para indivíduos infactíveis é proporcional a infactibilidade da solução, quanto maior a infactibilidade maior é o valor de p_{Ind} . Em todas as iterações uma cópia do melhor indivíduo,

com maior aptidão, é armazenado em um campo chamado elite. A cada iteração seleciona-se o indivíduo mais apto, comparando-o com a elite anterior, e a elite é atualizada. Após todos os indivíduos serem avaliados, são aplicados os operadores genéticos.

4) Seleção:

Em todas as iterações, parte da população (Pc%) é copiada em uma população intermediária para realizar *crossover*. A seleção dos indivíduos a serem copiados é realizada pelo método da roleta.

5) Operadores genéticos:

Os indivíduos da população evoluem de acordo com operadores genéticos de cruzamento (*crossover*) e mutação, de forma que promova uma tendência dos indivíduos representarem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua.

Crossover: O *crossover* é feito escolhendo aleatoriamente dois dos indivíduos copiados pela seleção (pai 1 e pai 2) e em seguida é feito um sorteio aleatório de um local de corte dentre as colunas das matrizes representantes desses indivíduos. Este processo auxilia a separação dos genes que formarão dois novos indivíduos (filho 1 e filho 2), conservando características dos pais, como pode ser observado na Figura 3.

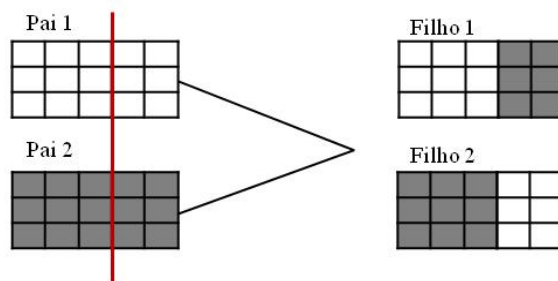


Figura 3. Processo de crossover

Mutação: Depois de passar pelo *crossover*, são escolhidos aleatoriamente indivíduos da geração atual para a mutação. Procede-se um sorteio para cada indivíduo da população com probabilidade muito baixa ($pm < 0,05$) de haver mudança no valor de alguns de seus genes. Se for favorável a mudança, se o número sorteado para um dado indivíduo for inferior a pm procede-se o sorteio (ou escolha, ou troca) de qual gene sofrerá mudança, assim como o novo valor a ser inserido neste gene. Feito isto, os indivíduos são reavaliados (Calcula-se o *fitness*).

6) Nova População:

Os **NP** melhores, dentre os indivíduos da população anterior e os filhos produzidos, formarão a nova população, e no caso de não ser satisfeito o critério de parada é atualizada a elite e aplicados os operadores de seleção, *crossover* e mutação (volta ao Passo 4).

7) Parada:

A parada é feita pelo número de gerações. O processo é repetido, a partir do Passo 4, um número G vezes e a solução ótima aproximada é a solução que apresentar a melhor aptidão na geração final, ou seja, na elite final.

5. Resultados computacionais

Para resolução do modelo proposto primeiramente foram calculados os Graus-dias médios para a cultura da cana-de-açúcar, por um período de dez anos (1997 à 2006) para a região de Botucatu – SP. Foram utilizadas como temperaturas bases mínima e máxima os valores de 18°C e 34°C, respectivamente. A seguir foram calculados os Graus-dias acumulados para os dois períodos de plantio, as Figuras 4 e 5 a seguir ilustram esta situação.

Nota-se que para ambos os períodos de plantio a cultura passa primeiramente por um período quente e chuvoso, onde ocorre grande acúmulo de Graus-dias, de forma que a planta

consiga se desenvolver completando sua fase de crescimento, encontrando-se apta para a fase de maturação, neste período a cana-de-açúcar para sua fase de crescimento e inicia o processo de fixação de açúcares nos colmos, desta forma os teores de POL aumentam gradativamente até um limite ótimo de acumulo de Graus-dias, a partir deste valor os teores de POL decrescem, podendo ocorrer o florescimento para determinadas variedades.

Em estudos preliminares Florentino et al. (2013) foi construído um modelo para determinar o planejamento ótimo visando determinar os períodos de plantio e corte, porém este modelo não leva em consideração os fatores climáticos como os Graus-dias acumulados. Através dos resultados obtidos por este modelo foram calculados os Graus-dias para analisarmos a influência dos Graus-dias nos resultados. Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os casos para primeiro corte, para cana de ano e cana de ano e meio.

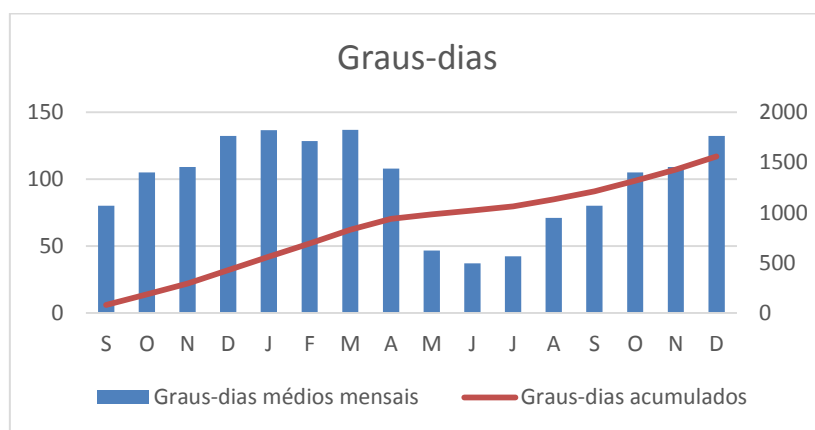


Figura 4: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano

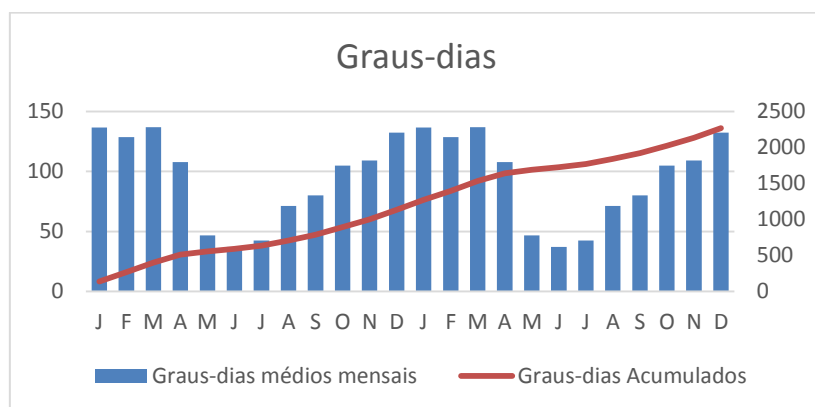


Figura 5: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano e meio

Nota-se que em aproximadamente 55% dos casos os momentos do primeiro corte encontram-se muito distantes do Graus-dias acumulado ótimo (1250 GDA), sendo que 35% dos casos ocorrem com baixos valores de GDA, ou seja, a planta ainda não apresenta teores de POL aceitáveis para a colheita, salvo para variedades precoces que podem completar seu desenvolvimento.

A faixa de Graus-dias para corte da cana de ano e meio apresenta valores distantes do ótimo de Graus-dias acumulado (1700 GDA), neste caso 100% dos resultados obtidos ocorreram com valores abaixo do ideal, novamente temos valores baixos para os teores de POL, sendo que para dois casos os GDA estão abaixo de 1300 o que para as variedades de ano e meio representa grande prejuízo, até mesmo considerando-se as variedades precoces.

Para a cana soca (2°, 3° e 4° cortes) temos que o Graus-dias acumulado ótimo seria 1250, mas nos resultados computacionais para o modelo que não considera a influência do GDA temos uma ampla faixa de cortes oscilando entre 1100 GDA e 1400 GDA, para os valores próximos de 1100 GDA 16,5% do total a planta ainda não apresenta teores de POL adequados para o corte e em 5,5% dos casos a planta apresenta valores elevados de GDA, onde o risco de florescimento aumenta significativamente.

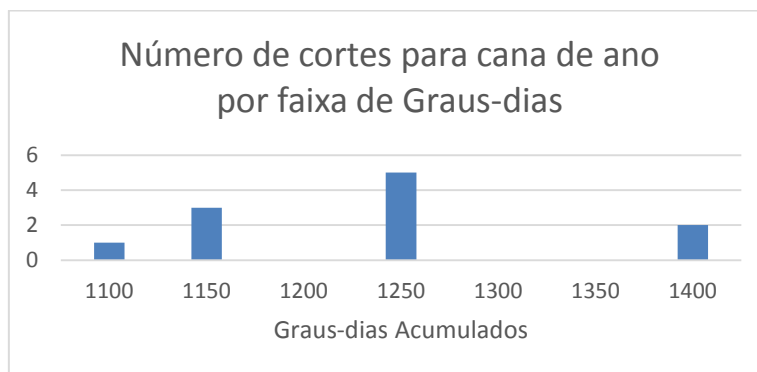


Figura 6: Número de cortes para a cana de ano por faixa de Graus-dias acumulados

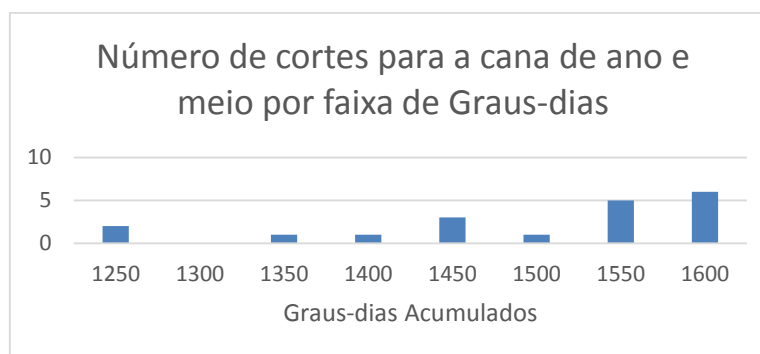


Figura 7: Número de cortes para a cana de ano e meio por faixa de Graus-dias acumulados

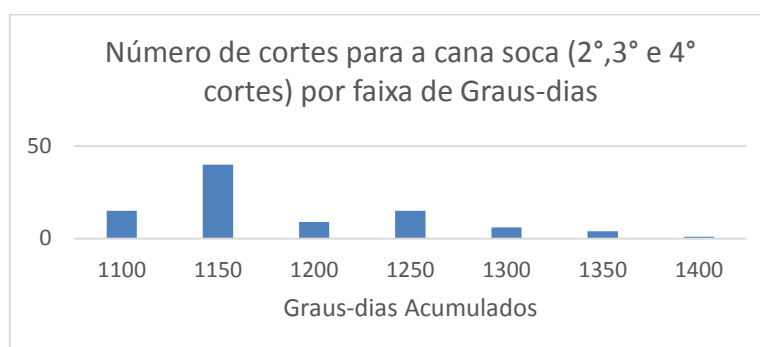


Figura 8: Número de cortes para a cana soca por faixa de Graus-dias acumulados

Diante destes resultados preliminares fica evidente a influência dos Graus-dias acumulados para determinar os períodos de plantio e corte, ressaltando que uma escala mensal apresenta grande variabilidade nos meses com temperaturas elevadas de Novembro a Março um mês representaria uma variabilidade de Graus-dias de aproximadamente 120 GDA o que por sua vez pode induzir o gestor agrícola a um mal planejamento, em alguns casos extremos poderá até mesmo inviabilizar os processos industriais. Na literatura encontra-se uma variedade de trabalhos sobre métodos de Graus-dias, para determinar as temperaturas bases, comparando a eficiência

dos métodos, comparando as necessidades de GDA por variedades, porém, em nenhum destes trabalhos os GDA são utilizados para otimizar os processos de plantio e corte da cana-de-açúcar, obedecendo os teores de POL e Fibra exigidos pela indústria canavieira. Portanto, propomos o modelo matemático (1)-(20) que integra todos os dados acima citados. A implementação do mesmo está em fase de acabamento.

Agradecimentos

Agradecemos à FUNDUNESP, PROPE (UNESP), PROPG (UNESP), FAPESP, CNPq e CAPES.

Referências

- Brieger, F. O.; Paranhos, S. B.** (1964), Cultura e adubação da cana-de-açúcar, *Anais do Instituto Brasileiro de Potassa*.
- Calça, S. A.; Colletti, L. A.; Glória, N. A.** (1983), Ciclo da cana - um dos fatores da maior lucratividade da lavoura canavieira, *STAB*, 6, 9-10.
- Câmara, G. M. S.** Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar, *Produção da cana-de-açúcar* (Eds.), FEALQ, Piracicaba, 31- 34, 1993.
- Carolo, A.** (2008), Florescimento é um belo sinal de alerta, *Jornal Cana*, 1-32.
- Casagrande, A. A.** Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar, *Funep*, Jaboticabal, 1991.
- Coleti, J. T.; Stuppiello, J. J.** Plantio da cana-de-açúcar, Segato S. V. et al. (Eds), *Atualização em produção de cana-de-açúcar*, Livrocere, Piracicaba, 2006.
- Companhia Nacional de Abastecimento (Conab)**, Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, quarto levantamento, Brasília, 2013.
- Consecana.** Regulamento dos negócios de compra e venda de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Manual de instruções, Piracicaba, 1998.
- Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo** (1983), Recomendações e manejo, *Copersucar*, 44-56.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética (Brasil)]**, Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011, 2012.
- FLORENTINO, H. O.; ISLER, P.; RAMOS, R.P.; NERVIS, J. ; HOMEM, T. P. D.** (2013) Modelo Matemático para plantio e colheita da cana-de-açúcar, *Anais do CMAC - Congresso de Matemática Aplicada e Computacional*, 2013, Bauru SP, 21-26.
- Fernandes, A. C.** Cálculos na agroindústria canavieira, *STAB*, Piracicaba, 2000.
- Frazão, D. A. C.** Influência do intervalo entre a colheita e o plantio na germinação de cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado) - Piracicaba, ESALQ/USP, 1976. 59p.
- Humbret, H. P.** The Growing of Sugarcane, *Elsevier*, Amsterdam, 1968.
- Liu, D. L.; Kingston, G.; Bull, T. A.** (1998), A new technique for determining the thermal parameters of phonological development in sugarcane, including sub optimum and supre-optimum temperature regiments, *Agricultural and Forest Meteorology*, 90, 119-139.
- Maule, R. F.; Mazza, J. A.; 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.
- Segato, S.V.; Pereira, L.L.** Colheita da cana-de-açúcar: corte manual, *Atualização em produção de cana-de-açúcar* (Eds), FUNEP, Piracicaba, 2006.
- Silva, M. A.; Jeronimo, E. M.; Lúcio, A. D. C.** (2008), Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 979-986.
- Stuppiello, J. P.** A cana-de-açúcar como matéria prima, *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização* (Eds), Fundação Cargil, Campinas, 761-804, 1987.
- Yamori, W.; Noguchi, K.; 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.