

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Planejamento Otimizado do Manejo da Cana-de-açúcar em Unidades Agrícolas

Helenice de Oliveira Florentino¹, Daniela Renata Cantane²

Departamento de Bioestatística, IB, UNESP, Botucatu, SP.

Dylan Jones³, Chandra Irawan⁴, Banafsheh Khosravi⁵, Djamila Ouelhadj⁶

Department of Mathematics and Centre for Operational Research and Logistics, University of Portsmouth, UK.

Resumo. O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de açúcar. É o segundo colocado na produção de etanol, e tem conquistado o mercado externo com o uso de biocombustíveis. Assim, este país possui grandes companhias sucroenergéticas e estas possuem complexos sistemas de gerenciamento, tanto na parte industrial como no campo. Tendo os gestores que recorrer a diversas ferramentas computacionais e matemáticas para auxílio nos planejamentos e tomadas de decisões. Neste contexto, o proposto trabalho apresenta uma metodologia para auxílio no planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar nas unidades agrícolas que compõem as usinas. Para isto foi proposto um modelo de otimização linear inteira com a finalidade de determinar o período ótimo de plantio e colheita da cana em cada talhão, de forma a maximizar a produção de cana-de-açúcar. Os resultados computacionais obtidos são apresentados e discutidos.

Palavras-chave. Problema de programação linear inteira, planejamento otimizado, cana-de-açúcar, algoritmo genético.

1 Introdução

O problema de seleção de variedades de cana (SSVP-selection of sugarcane varieties problem) é muito importante devido às suas implicações no auxílio do planejamento econômico e ambiental necessários nas empresas sucroenergéticas. Portanto, uma extensa pesquisa tem sido conduzida abordando a escolha das variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas e o planejamento da cultura da cana com diversos objetivos, entre eles: minimizar custos, aproveitar resíduos de colheita, maximizar lucro e otimizar a produção de açúcar [2–4, 7].

Mas a maioria dos autores trabalhou com casos simples e tamanhos moderados de SSVP, o que não condiz com a realidade atual. Estes sempre citam a complexidade

¹helenice@ibb.unesp.br

²dcantane@ibb.unesp.br

³dylan.jones@port.ac.uk

⁴chandra.irawan@port.ac.uk

⁵banafsheh.khosravi@port.ac.uk

⁶djamila.ouelhadj@port.ac.uk

computacional dos problemas e a necessidade de novas técnicas para resolver casos mais complexos. Além disso, a qualidade da cana colhida, que é um fator importante, não foi considerada por estes autores. A melhoria na qualidade de cana-de-açúcar é alcançada quando a colheita é realizada durante o período de máxima maturação. Assim, é muito importante planejar o período de plantio e colheita da cana considerando o pico de maturidade.

Este trabalho propõe um modelo de programação linear inteira para o SSVP integrado com o planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar, com o objetivo de otimizar a produção de cana e satisfazer as principais restrições impostas pela empresa. É proposta uma abordagem heurística para resolver problemas de grande porte, a fim de obter boas soluções em um tempo computacional razoável.

2 Plantio e Colheita de Cana

O sistema de plantio da cana-de-açúcar no Brasil é geralmente dividido em três tipos, que são chamados: cana de ano, cana de ano-e-meio e cana de inverno.

No sistema cana de ano o plantio é realizado no início da estação das chuvas e a planta tem o seu desenvolvimento paralisado nos meses mais frios. Após cerca de 12 meses do plantio, a cana tem a maturidade necessária e pode ser colhida. No sistema de cana de ano-e-meio o plantio é feito nos meses com as condições ideais de temperatura e umidade para o desenvolvimento das plantas, e a primeira colheita é realizada cerca de 18 meses após o plantio. O sistema cana de inverno é adotado em locais onde a irrigação está disponível, pois o plantio é realizado na estação seca. Neste sistema, a cana é colhida a cada 12 meses. Em todos estes sistemas a cana é colhida a cada 12 meses a partir do segundo corte.

Se a cultura da cana é bem conduzida, o replantio será feito a cada 5 ou 6 anos após o plantio inicial. No entanto, ela só vai ser de alta produtividade e boa qualidade se houver uma correta gestão pelas usinas. [1] descreve o processo para calcular as medidas que caracterizam a qualidade da cana, tais como Pol %cana (sacarose), a porcentagem de Brix (sólidos solúveis totais) e porcentagem de fibras e pureza da cana comercial. Entre as medidas de qualidade da cana, o Pol % cana deve ser enfatizado, pois a porcentagem de Pol na cana está diretamente relacionada ao ponto de maturação desta; no ponto de máxima maturação os níveis de sacarose são os mais elevados. No entanto, se a cana é colhida antes ou após esta fase, uma diminuição significativa na produção de cana e de Pol podem ocorrer.

3 Modelo Matemático

Sejam n o número de variedades de cana adaptáveis ao clima e solo local, k o número de talhões destinados ao plantio e C o número de anos do horizonte de planejamento da safra, o qual é dividido em T meses. Sejam M o conjunto de meses adequados para o plantio e $(m + t^*)$ o mês ideal para a colheita, $m \in M$. Se for a primeira colheita da cana de ano-e-meio então $t^* = 18$, em caso contrário $t^* = 12$. Deve notar-se que

$(m + t^*) \in Q$, em que Q é o conjunto de períodos recomendados para colheita de cada variedade de cana. Dev denota o conjunto de desvios da correta data de colheita, ou seja, $Dev = d_l, l = 1, \dots, a$ onde d_l pode ser um desvio positivo, negativo ou zero, dependendo se a cana é colhida após o mês ideal, antes do mês ideal ou na data ideal respectivamente, e a é o desvio máximo permitido.

Com base na redução real da produtividade da cana, propõe-se um função de correção $f(d)$ para reduzir a produtividade da variedade de cana i quando é colhida com desvio d (zero, positivo ou negativo): $f(d) = \begin{cases} -0,0243d^2 + 1 & \text{se } d_1 \leq d \leq d_a \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

A produtividade da variedade de cana i no c -ésimo corte com desvio d do período ideal de colheita pode ser calculada por: $P_{ic}(d) = f(d)Prod_{ic}$. A função de correção $f(d)$ penaliza a produtividade da cana quando a colheita não é realizada no ponto de máxima maturação.

Seja x_{ijmd} a variável de decisão binária, em que se $x_{ijmd} = 1$ a variedade i deverá ser plantada no talhão j , no mês m e deverá ser colhida no mês $(m + t_{ij}^* + d) \in Q_i$, e em caso contrário $x_{ijmd} = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k, m \in M, d \in Dev$. Q_i é o conjunto de períodos recomendados para a colheita variedade i .

Propõe-se o modelo de otimização para o planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar (1)-(14).

O objetivo deste problema é planejar o plantio e a colheita da cana-de-açúcar durante um horizonte de C anos, selecionando a variedade de cana a ser plantados em cada um dos K talhões da usina de forma a maximizar a produção total de cana, como descrito na equação (1). As restrições (2) impõem que em cada talhão deve ser plantada apenas uma variedade. As equações (3) definem o mês para o plantio em cada talhão. As restrições (4) definem o mês para a primeira colheita em cada talhão. As equações (5) e (6) garantem a colheita em meses em que existe demanda. As restrições (7) impõem que a colheita da cana seja feita no período indicado pela empresa produtora da variedade. As restrições (8) garantem o atendimento da demanda de Pol % cana e (9) impõe restrições de capacidade da usina. As restrições (10) definem a máxima área para o plantio de cada variedade escolhida, (11) define o mês para o c -ésimo corte em cada talhão ($c > 1$). As restrições (12) impõem que a colheita das variedades sejam feitas no período recomendado pela companhia e, por fim, as restrições (13) e (14) definem as variáveis binárias. Para resolver o modelo de programação linear inteira 0 – 1, propõe-se a utilização de métodos exatos para determinar soluções ótimas em um tempo computacional razoável para pequenos e médios problemas (até 500 talhões). No entanto, para grandes problemas propõe-se um algoritmo genético.

Sejam h é o índice associado aos meses em que há demanda a ser satisfeita; H é o conjunto de meses com demanda de cana a ser satisfeita; F é a porcentagem máxima da área total a ser plantada com uma única variedade; A_i é a produtividade de Pol % cana da variedade i ; R_{ic} é a média de redução na produtividade de cana no c -ésimo corte da variedade i ; $Prod_i$ representa a produtividade da cana de variedade i ; D é o valor do Pol % cana recomendado pela usina; Ml e Mu são os limitantes inferior e superior para capacidade de moagem mensal; L_j é a área do talhão j .

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} \left(P_{i1}(d) + \sum_{c=2}^C R_{ic} P_{ic}(d) \right) L_j x_{ijmd} \quad (1)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} x_{ijmd} = 1, \quad j = 1, \dots, k \quad (2)$$

$$t_{0j} = \sum_{i=1}^n \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} x_{ijmd}, \quad j = 1, \dots, k \quad (3)$$

$$t_{1ij} = t_{0j} + \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} t_{ij}^* x_{ijmd} + \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} dx_{ijmd}, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k \quad (4)$$

$$t_{1ij} = \sum_{h \in H} ht_{1hij}, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{h \in H} t_{1hij} = 1, \quad j = 1, \dots, k \quad (6)$$

$$t_{1ij} = \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} \sum_{i \in \bar{T}} \bar{t}_i x_{ijmd}, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (Pol_i - D) t_{1hij} \geq 0, \quad h \in H \quad (8)$$

$$Ml \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Prod_i L_j t_{1hij} \leq Mu, \quad h \in H \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} L_j x_{ijmd} \leq F \sum_{j=1}^k L_j, \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

$$t_{cj} = t_{(c-1)j} + t_j^*, \quad c = 1, \dots, C \quad (11)$$

$$t_{1ij} \in Q_i, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k \quad (12)$$

$$x_{ijmd} = 0 \text{ ou } 1, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k, m \in M, d \in D \quad (13)$$

$$t_{1hij} = 0 \text{ ou } 1, \quad h \in H, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k, m \in M, d \in D \quad (14)$$

4 Algoritmo Genético (AG)

Neste algoritmo genético (AG), o cromossomo é formado por uma matriz com 3 linhas e k colunas, como mostrado na Figura 1. As colunas representam os talhões. A primeira linha contém a variedade escolhida para plantio no talhão correspondente, a linha 2 contém o mês para o plantio no talhão e a linha 3 o desvio, em meses, do período ideal para a primeira colheita em cada talhão.

Principais etapas do AG proposto:

	$j=1$	$j=2$...	$j=k$
Variedade a ser plantada $i \in \{1,2, \dots, n\}$	3	1	...	10
Mês de plantio $m \in M=\{1,2,3,9,10\}$	3	10	...	2
Desvio $d_j \in Dev=\{-2,-1,0,1,2\}$	0	-2	...	1

Figura 1: Exemplo de estrutura do cromossomo.

1. Criar população inicial aleatória com N cromossomos, como na Figura 1.
2. Avaliar cada indivíduo da população inicial: A aptidão é calculada como o valor da função objetivo (1). O melhor indivíduo é armazenado.
3. Aplicar os operadores genéticos: Repita as seguintes etapas G vezes:
 - (a) Selecionar pares de cromossomos da população atual ($Pc\%$): Método da Roleta [5].
 - (b) Cruzar os pares: Crossover 1-ponto. Um par de cromossomos é escolhido, com uma probabilidade uniforme para formar dois filhos. O cruzamento é realizado cortando as colunas das matrizes que representam os pais e a separação dos genes para produzir dois novos indivíduos.
 - (c) Fazer mutação dos indivíduos com probabilidade Pm .
 - (d) Avaliar cada cromossomo e atualizar o melhor indivíduo.
 - (e) Criar a nova população com os N indivíduos melhores avaliados.
4. Tomar o melhor indivíduo como solução do problema.

5 Resultados Computacionais

Os resultados computacionais foram obtidos utilizando as instâncias estudadas em [6] e também outras geradas aleatoriamente para simular grandes fazendas de usinas do estado de São Paulo, com 20 variedades e diferentes tamanhos de talhões conforme Tabela 1. Para resolução do modelo de pequenas instâncias foi utilizado o software IBM ILOG CPLEX versão 12.6. O AG foi implementado usando o software MATLAB 7.14.0.739 (R2012a). Foi utilizado um computador Intel Core i7-2620M Dual-Core 2.70GHz 4.0GB.

Os parâmetros utilizados no AG estão apresentados na Tabela 2.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para o modelo (1)-(14) usando os dados das Tabelas 1 e 2, e dados agrônômicos de [6], utilizando o software (CPLEX) para obter um planejamento em um horizonte de 6 anos.

Os resultados na Tabela 3 mostram que as soluções ótimas para o modelo proposto podem ser alcançadas para os casos 16, 50, 180, 300 e 500 talhões usando CPLEX, mas não foi possível resolver problemas com grandes dimensões.

Tabela 1: Características das instâncias.

Instância	Número de talhões	Área (ha)	N	G	MI	MS
I-1	16	346.23	200	200	2576	7141
I-2	50	1092.35	200	200	8128	22530
I-3	180	4298.92	200	300	31987	88665
I-4	300	7060.60	300	300	52537	145620
I-5	500	11785.41	400	400	87693	243074
I-6	1000	24249.67	500	500	180440	500150

Tabela 2: Parâmetros usados para implementação do algoritmo genético para todas as instâncias.

Pc	Pm	n	D	F	Dev	M	H
0,8	0,05	20	13%	25%	{-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5}	{1,2,...,10}	{4,...,12}

A Tabela 4 apresenta os resultados da aplicação do AG para resolver o modelo (1)-(14) em todos os casos. O AG foi executado 10 vezes para cada instância. Verificou-se que todas as soluções geradas pelo AG foram viáveis e foram obtidas, em média, em um tempo baixo de processamento quando comparado com o método exato.

Tabela 3: Resultados do método exato usando o CPLEX.

Instância	Produção de cana (ton)	Soma dos $ d_l $	Máximo $ d_l $	Média $ d_l $	Tempo de CPU (s)
I-1	186479.46	17	3	1,06	83
I-2	609406.56	46	3	0,92	1565
I-3	2406883.79	140	3	0,78	326
I-4	3955194.79	265	3	0,88	235
I-5	6602512.09	403	3	0,81	520
I-6	-	-	-	-	-

- O CPLEX não conseguiu resolver. $|d_l|$ valor absoluto dos desvios.

A Tabela 4 mostra que a metodologia proposta para determinar o planejamento otimizado para a cultura da cana é capaz de resolver problemas com diferente número de talhões, mesmo aqueles com 500 e 1000 talhões. Isso significa que o modelo é capaz de ajudar os tomadores de decisão em empresas de pequeno, médio e grande portes.

O modelo proposto para o planejamento ótimo da cultura da cana foi resolvido usando método exato para instâncias pequenas e médias e um algoritmo genético foi criado para resolver instâncias de grande porte, gerando soluções de boa qualidade em um tempo computacional relativamente pequeno em comparação com o método exato. A metodologia

Tabela 4: Resultados da aplicação do algoritmo genético para resolver o modelo (1)-(14).

Instância	Produção de cana (ton)	Soma dos $ d_l $	Máximo $ d_l $	Média $ d_l $	Iteração de convergência	Tempo de CPU (s)
I-1	186216.7	25	4	1,60	138	16,79
I-2	599613.05	64	4	1,29	194	140,18
I-3	2342471.32	220	4	1,32	205	104,30
I-4	3800257.78	375	4	1,35	218	204,00
I-5	6287730.21	680	4	1,36	226	918,83
I-6	12707899.25	558	5	1,43	266	3155,77

proposta permitiu a determinação do planejamento da colheita no período correto, ou seja, perto de ponto de máxima maturação da cana. Portanto, esta pode ser uma ferramenta de apoio à decisão apropriada para gestores de indústrias sucroenergéticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências de fomentos: CNPq (No. 303267/2011-9), PROPE (Pró-Reitoria de Pesquisa da UNESP), FUNDUNESP (Fundação para o Desenvolvimento da UNESP) e FAPESP (Nos. 2014/01604-0 e 2014/04353-8).

Referências

- [1] J. Engelke. Sugarcane: Measuring Commercial Quality. *FARMNOTE Department of Agriculture*, Kununurra, Australia, n. 23, 2002.
- [2] H. O. Florentino, A. D. Lima, L. R. Carvalho, A. R. Balbo and T. P. D. Homem. Multiobjective 0-1 integer programming for the use of residual biomass in energy cogeneration. *International Transactions in Operational Research*, 18:605-615, 2011.
- [3] H. O. Florentino, E. V. Moreno and M. M. P. Sartori. Multiobjective optimization of economic balances of sugarcane harvest biomass. *Scientia Agricola*, 65:561-564, 2008.
- [4] H. O. Florentino and M. V. Pato. A bi-objective genetic approach for the selection of sugarcane varieties to comply with environmental and economic requirements. *Journal of the Operational Research Society*, 65: 842-854, 2014.
- [5] J. H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, USA, 1992.
- [6] R. P. Ramos. Planning of planting and harvesting of sugarcane using technical mathematics of optimization, 69 p. Thesis. (in Portuguese), FCA Botucatu SP, 2014.
- [7] M. S. Scarpari and E. G. F. Beauclair. Optimized agricultural planning of sugarcane using linear programming. *Investigacion operacional*, 31: 126-132, 2010.