

## SIMULAÇÃO PARA A OTIMIZAÇÃO DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Jonis Jecks NERVIS<sup>1</sup>  
Helenice de Oliveira FLORENTINO<sup>2</sup>  
Daniela Renata CANTANE<sup>2</sup>  
Rômulo Pimentel RAMOS<sup>2</sup>  
Paulo Roberto ISLER<sup>3</sup>

- **RESUMO:** A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil no período colonial e transformou-se em uma das principais culturas do país. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana-de-açúcar, mas também o primeiro do mundo na produção de açúcar e o segundo na produção de etanol, e conquista, cada vez mais, o mercado externo com o uso do biocombustível como alternativa energética. Por outro lado, o crescimento acelerado do setor nos últimos anos provocou o surgimento de problemas relacionados à logística de transporte, ao processo de produção, ao manejo da cultura e a tomadas de decisões em geral. Devido à complexidade destes problemas, os gestores do setor sucroalcooleiro têm recorrido a novas ferramentas para auxílio nas tomadas de decisões, manejos otimizados e obtenção de estimativas. Neste contexto, é proposto neste trabalho uma metodologia para auxílio no planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar nas unidades agrícolas que compõem as usinas, de forma a maximizar a produção de POL (porcentagem em massa de sacarose aparente contida na cana-de-açúcar) e a produção de cana-de-açúcar, respeitando restrições impostas pela usina. Para o processo de otimização foi proposto um Algoritmo Genético (AG). Os períodos de colheita dos talhões pertencentes a uma unidade agrícola da usina foram planejados de forma a alcançar a máxima produtividade em um horizonte de planejamento de quatro anos. Os resultados computacionais obtidos são apresentados e discutidos, mostrando que esta metodologia é uma importante ferramenta para auxílio dos gestores de usinas nas tomadas de decisões quanto ao planejamento da colheita da cana-de-açúcar.
- **PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmo genético; problemas combinatorias; manejo e planejamento da colheita da cana-de-açúcar.

---

<sup>1</sup> Universidade Estadual do Norte do Paraná - UENP, Centro de Ciências Humanas e da Educação, Departamento de Matemática, Caixa Postal 103, CEP: 86400-000, Jacarezinho, PR, Brasil. E-mail: jonisjn@uenp.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Instituto de Biociências, Departamento de Bioestatística, Caixa Postal 510, CEP: 18618000, Botucatu, SP, Brasil, E-mail: helenice@ibb.unesp.br; dcantane@ibb.unesp.br; krpr@ibest.com.br

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, Campus Boituva, Departamento de Matemática, Caixa Postal 20273, CEP: 18550000, Boituva, SP, Brasil, E-mail: pauloisler@gmail.com

## 1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (ÚNICA, 2015). O USDA *United States Department of Agriculture* afirma que o Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo (USDA, 2015) e segundo World Watch Institute (2015), o Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo. Estes fatos fizeram do setor sucroalcooleiro o responsável por 1,82 % do PIB nacional e por 28,7 % do PIB da agricultura no Brasil em 2015, e também por ter empregado cerca de 3,9 milhões de pessoas (BRASIL, 2015).

No exercício social encerrado em 31 de março de 2015, conforme dados do Ministério da Agricultura e Pecuária (BRASIL, 2015), o Brasil produziu próximo de 632 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, sendo que a região Centro-Sul foi responsável por aproximadamente 90,38% desta produção, ainda segundo dados da safra 14/15 da UNICA, a região Centro-Sul é responsável por aproximadamente 92% da produção de etanol e 89,98% da produção de açúcar do Brasil (UNICA, 2015). É inegável a importância do setor na economia do país e todo o processo produtivo envolvendo a cana-de-açúcar depende da eficiência no ciclo produtivo.

Em contraste com muitas culturas agrícolas que possuem o ciclo produtivo bem definido, a cana-de-açúcar possui um ciclo produtivo que inicia com o seu plantio e pode estender-se por um intervalo de tempo de quatro anos ou mais até que efetue-se a renovação da cultura. Além disso, não há garantias que o intervalo entre cortes de um mesmo talhão aconteça de forma a gerar o maior rendimento possível e tanto a variação das idades de colheita, como a data da colheita influenciam no rendimento e qualidade da cultura (MAY e MIDDLETON, 1972; INMAN-BAMBER, 1994; MUCHOW *et al.*, 1997; HIGGINS *et al.*, 1998).

Segundo May e Middleton (1972), a natureza do cultivo da cana-de-açúcar é caracterizada pelo fato do período de moagem da cultura ocorrer em um intervalo de tempo prolongado. Como consequência disso, é muito difícil colher toda a cana-de-açúcar pertencente à usina quando a produção e a qualidade da cana-de-açúcar são máximas. Isso ocorre devido às capacidades limitadas dos maquinários de colheita, de processamento na usina e de transporte. Assim é muito importante ter um planejamento antecipado da colheita da cana-de-açúcar.

O planejamento da colheita da cana-de-açúcar tem como objetivo otimizar todas as práticas referentes a esta atividade, possibilitando que o investimento realizado durante o cultivo seja recompensado, trazendo dividendos ao produtor. A cana-de-açúcar deve ser colhida com o máximo teor de açúcar possível e ser planejada para ocorrer no período de pico de maturação da cultura, que varia de acordo com o sistema de cultivo adotado, variedade, região de cultivo, além de outros fatores que vão influenciar diretamente na qualidade da matéria-prima obtida (RIPOLI e RIPOLI, 2004; HIGGINS *et al.*, 1999).

Sob o ponto de vista fisiológico da cultura da cana-de-açúcar, a colheita representa o final do ciclo de crescimento e maturação, atingindo o máximo de produtividade agrícola de colmos permitida pelas condições edafo-climáticas do local, pela tecnologia agrônômica e variedade utilizadas, além, de encerrar qualquer técnica de produção. É de importância fundamental o adequado planejamento e seleção de variedades, para que possam ser colhidas no correto período de maturação, ou seja no chamado Período Útil de Industrialização (PUI). Com este planejamento pode-se obter, ao longo do período de

safra, canaviais com padrões de maturação adequadamente distribuídos por toda a área pertencente a uma agroindústria ou de fornecedores (RIPOLI e VILLANOVA, 1992).

Este trabalho propõe uma metodologia para o planejamento otimizado do período da colheita da cana-de-açúcar visando a maximização da produção da POL e a produção de cana-de-açúcar, respeitando as restrições impostas pela usina. O trabalho descreve a metodologia proposta para o planejamento otimizado do período de colheita da cana-de-açúcar com o auxílio do Algoritmo Genético (AG). Ao final, são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela simulação da aplicação da metodologia proposta.

## **2 A colheita da cana-de-açúcar**

Devido à cana-de-açúcar ser uma cultura semiperene, sua implantação envolve uma série de cuidados. Para que a colheita seja bem sucedida é preciso dar atenção especial ao plantio, uma vez que a longevidade do canavial depende da interação entre estas duas operações. São vários os fatores que interferem na qualidade do plantio, desde sua densidade, preparo do solo, época de plantio, escolha da variedade, qualidade e idade da muda e paralelismo das fileiras de plantio (FRASSON, 2007).

No Estado de São Paulo o plantio da cana-de-açúcar é feito nos meses de janeiro até o começo do mês de abril, sendo a cana-de-açúcar plantada nesse período chamada “cana-de-açúcar de ano e meio”, pois o intervalo entre o plantio e a primeira colheita é de aproximadamente 18 meses. O plantio também pode ocorrer de setembro até o fim de outubro e essa cana-de-açúcar recebe a denominação de “cana-de-açúcar de ano”, devido ao intervalo entre o plantio e o primeiro corte ser de aproximadamente 12 meses. A colheita é realizada no ano subsequente ao plantio. Neste estado, a colheita da cana-de-açúcar concentra-se entre os meses de abril a dezembro e são feitos em média quatro cortes ou safras (NUNES JÚNIOR e SCHOUGHANA, 1984).

A cana-de-açúcar de ano e meio, apresenta taxa de crescimento mínimo ou mesmo nulo de maio a setembro em função das condições pouco favoráveis à cultura no inverno. Já com o início das precipitações, aumento da intensidade luminosa e também da temperatura, a fase de maior desenvolvimento da cultura acontece de outubro a abril e se intensifica a partir de dezembro. A cana-de-açúcar de ano tem seu desenvolvimento máximo ocorrendo de novembro a abril, reduzindo a partir de então devido às condições climáticas adversas do período caracterizado por ausência de chuvas e baixas temperaturas, podendo a colheita ocorrer a partir de julho, em função do cultivar (BRANDÃO *et al.*, 2009).

A definição do momento para a renovação de um canavial está relacionada com a produtividade observada no decorrer do seu envelhecimento. Quanto maior o número de cortes, maior as chances de queda de produtividade e maior a probabilidade de ser necessária a sua renovação. As lavouras de cana-de-açúcar são mais produtivas nos primeiros cortes, apresentando uma forte tendência de declínio em suas produtividades na medida em que os anos de permanência no campo avançam. A produtividade mostra-se mais elevada para as áreas plantadas com cana-de-açúcar na modalidade cana-de-açúcar de ano e meio pois permanecem um tempo mais longo no campo. A produtividade no primeiro corte da cana-de-açúcar na modalidade cana-de-açúcar de ano equivale à produtividade do segundo corte da cana-de-açúcar na modalidade cana-de-açúcar de ano e meio (MILLER, 2013).

Os estágios de corte seguintes ao plantio são denominados de cana-soca, onde após cada corte ocorre a brotação da soqueira e o início de um novo estágio de corte (CTC 2008). Os estágios de corte de cana-soca se repetem em intervalos anuais até que a lavoura não seja mais rentável economicamente, quando a cultura passa pelo manejo denominado de reforma e o ciclo reinicia com o plantio de uma nova muda (SEGATO *et al.*, 2006).

De forma geral, seja qual for o corte a ser realizado (primeiro, segundo, terceiro ou quarto corte), a colheita da cana-de-açúcar deve ser feita quando ela atingir a maturidade (SILVA *et al.*, 2008). As condições climáticas que predominam nesse período, com a gradativa queda da temperatura e a diminuição das precipitações no meio do ano, são determinantes para que o processo de maturação ocorra de forma adequada (GHELLER, 2001).

A determinação da maturação da cana-de-açúcar durante a safra está ligada diretamente ao teor de sacarose, presença de florescimento, “isoporização”, herança genética, clima, solo, manejo e idade do canavial. As variedades diferem quanto ao tempo que levam para alcançar o pico de maturação, estando esta característica relacionada com a extensão do período de desenvolvimento.

Para que ocorra a colheita deve-se dar atenção a um aspecto importante do ciclo da cana-de-açúcar: a maturação. Durante o crescimento vegetativo, a planta acumula energia na forma de sacarose, aumentando portanto o valor da POL. Na fase seguinte, a planta utiliza a energia acumulada no período anterior para a reprodução da espécie. Neste período, ocorre o decréscimo no valor da POL (BEAUCLAIR e PENTEADO, 1984; SEGALLA *et al.*, 1981). A Figura 1 ilustra a curva de maturação de uma cana-de-açúcar padrão.

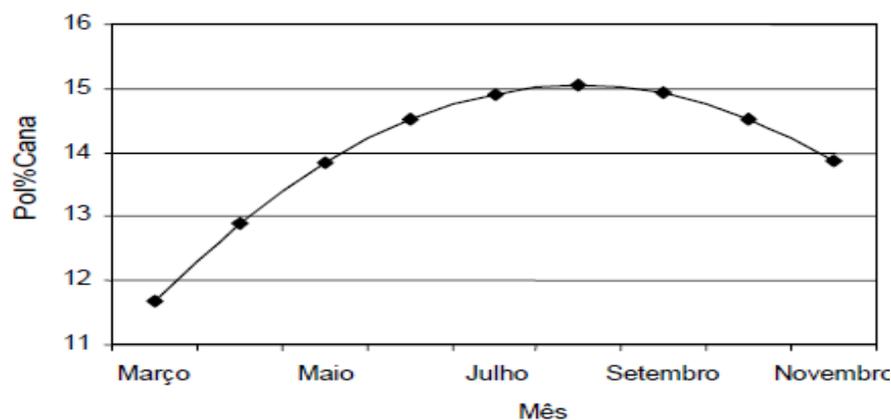


Figura 1 - Curva de maturação de uma cana-de-açúcar padrão (SACHS, 2007).

Os Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) são parâmetros do sistema de pagamento de cana-de-açúcar, e representam a quantidade de Açúcares Recuperados da Cana-de-açúcar (ART) até o xarope, ou seja, é o resultado da diferença entre o ART da cana-de-açúcar e as perdas na lavagem da cana-de-açúcar, bagaço final, torta dos filtros ou prensas, considerando uma eficiência média padrão.

### 3 Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar

Considere uma área agrícola com  $k$  talhões em que estão plantadas  $V$  variedades de cana-de-açúcar sendo uma variedade por talhão. Sabendo-se conhecido o histórico da cana-de-açúcar plantada, como exemplo a variedade  $v$  que está plantada no talhão  $j$ , seu ano de plantio e data da última colheita, deseja-se planejar a colheita da cana-de-açúcar desta área agrícola durante quatro anos, de forma a maximizar a produção de sacarose ou a produção de cana-de-açúcar, respeitando as restrições de fibra, capacidade de moagem e demandas da usina. Ou seja, deseja-se determinar qual o período  $t$  do ano  $y$  que haverá o  $i$ -ésimo ano de corte da variedade  $v$  da cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$ , com  $i = 0, \dots, 4$ ,  $j = 1, \dots, k$  e  $v = 1, \dots, V$ , sabendo-se conhecido o histórico de cada variedade de cana-de-açúcar plantada, maximizando a produção de sacarose e a produção de cana-de-açúcar e respeitando as capacidades e demandas da usina.

A Tabela 1 ilustra um histórico da cana-de-açúcar plantada em cinco talhões e a Tabela 2 ilustra um planejamento para quatro anos da colheita da cana-de-açúcar plantada nestes talhões, a partir dos dados da Tabela 1.

Tabela 1 - Histórico da cana-de-açúcar em uma área de 119 ha contendo cinco talhões

Histórico da cana-de-açúcar em cada talhão					
Descrição	Talhão 1	Talhão 2	Talhão 3	Talhão 4	Talhão 5
Variedade existente	v1	v2	v3	v1	v4
Variedade em caso de replantio		v5	v4		v3
Área (ha)	20	28	23	30	18
Número de corte atual*	0	1	2	0	4
Mês em que ocorreu o corte ou plantio**	9	4	8	2	8

\* 0 é relativo a cana-de-açúcar plantada no ano de planejamento, 1 no ano de planejamento a cana-de-açúcar está no primeiro corte, 2 está no segundo corte e assim sucessivamente.

\*\* 2 corresponde ao mês de fevereiro, 4 ao mês de abril e assim sucessivamente.

A linha 1 da Tabela 1 mostra as variedades plantadas em cada talhão, na linha 2 as variedades planejadas para o caso de replantio e na linha 3 a área de cada talhão. Na linha 4 desta tabela tem-se os números de corte que já houveram neste canavial e na linha 5 mostra o mês do ano que ocorreu o último plantio ou corte. Com isto sabe-se, por exemplo, que no talhão cinco tem plantado a variedade v4, com previsão de replantio da variedade v3. Sabe-se que foi efetuado o quarto corte no mês de agosto do ano corrente, portanto este talhão deverá ser replantado em outubro, tendo disponibilidade de colheita em torno do mês 10, ou seja, outubro do ano seguinte.

Tabela 2 - Planejamento para os quatro anos de colheita da cana-de-açúcar plantada na área agrícola apresentada na Tabela 1

Planejamento para os próximos quatro anos					
Ano	Talhão 1	Talhão 2	Talhão 3	Talhão 4	Talhão 5
Ano 1	10	5	10	10	9
Ano 2	12	7	12	12	10
Ano 3	11	8	0	11	12
Ano 4	9	9	8	9	12

0 representa que não houve colheita e de 5 até 12 representam os meses de maio a dezembro.

A Tabela 2 mostra um planejamento para colheita considerando o histórico apresentado para a cana-de-açúcar plantada em cada talhão apresentado na Tabela 1. Seguindo o exemplo do Talhão 5, as colheitas estão previstas para os meses 9, 10, 12 e 12 consecutivamente para os quatro próximos anos.

Para o planejamento dos períodos de colheita em cada ano, deve ser considerado um intervalo de tempo preferencialmente de 12 meses após o último corte, podendo haver o corte dois meses antes ou dois meses depois deste período. No caso do primeiro corte a cana-de-açúcar deve ser colhida com a idade de  $12 \pm 2$  meses para o caso da cana-de-açúcar de ano e  $18 \pm 2$  meses para a cana-de-açúcar de ano e meio. Estes períodos são recomendados por apresentarem a melhor fase de produção de sacarose da cana-de-açúcar, mas nem sempre é possível a colheita ser feita nestas datas devido às restrições da usina quanto à capacidade de moagem, fibra e de demanda de POL da usina.

Nos cortes seguintes a máxima produtividade de sacarose ocorre no período de 12 meses após o último corte. A produtividade da cana-de-açúcar também diminui à medida que aumenta o número de corte. Assim, considera-se a produtividade de sacarose dependente da variedade, idade da cana-de-açúcar e o do número de cortes sofridos. Então denota-se  $P_{jca}$  a produtividade de sacarose, em tonelada por hectare no  $c$ -ésimo corte da cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$  e colhida  $a$  meses após o último corte ou plantio.

A restrição sobre a capacidade de moagem da cana-de-açúcar é dada em toneladas de cana-de-açúcar por mês. A fibra é restrita dentro de um limitante mínimo e máximo e está também depende da variedade, idade da cana-de-açúcar e o número de cortes sofridos. Denota-se  $FI_{jca}$  a produtividade de fibra, em tonelada por hectare no  $c$ -ésimo corte da cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$  e colhida  $a$  meses após o último corte ou plantio. A restrição de demanda de POL da usina é dada em toneladas de sacarose por mês.

A seguir está apresentado o Algoritmo Genético (AG) proposto com o objetivo de auxiliar na determinação de planejamentos otimizados de colheita da cana-de-açúcar.

### 3.1 Algoritmo genético (AG)

O Algoritmo Genético (AG) é, basicamente, uma técnica de busca e otimização, inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética (GOLDBERG, 1989).

Os princípios da natureza nos quais os AGs se inspiram são simples. De acordo com a teoria de Darwin, o princípio de seleção privilegia os indivíduos mais aptos com maior longevidade e, portanto, com maior probabilidade de reprodução. Indivíduos com mais descendentes têm mais chance de perpetuarem seus códigos genéticos nas próximas

gerações. Tais códigos genéticos constituem a identidade de cada indivíduo e estão representados nos cromossomos (PACHECO, 2013).

Coelho (2003) afirma que estas estruturas de condição permitem contornar inconveniências que muitos problemas apresentam na prática, como a descontinuidade das funções envolvidas e a natureza dos mesmos. Sendo assim, o AG não requer o conhecimento das características do problema de otimização e não depende de certas propriedades da função objetivo e restrições, tais como convexidade e diferenciabilidade. A busca pela solução é apenas guiada por sucessivas avaliações dos cromossomos na função de aptidão.

Neste trabalho é proposto o uso de um AG para auxílio no planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar visando a máxima produção de sacarose ou a produção de cana-de-açúcar. O algoritmo está descrito a seguir:

**Passo 1)** Estruturação do cromossomo;

**Passo 2)** Construção da população inicial;

**Passo 3)** Avaliação dos indivíduos e atualização da Elite;

**Passo 4)** Aplicação dos operadores genéticos: Seleção, *crossover* e mutação;

**Passo 5)** Aplicação do teste de parada: Se satisfeito vá para o passo 6, caso contrário vá para o passo 3;

**Passo 6)** Fim.

### 3.2 Descrição dos passos

#### **Passo 1:** Estruturação do cromossomo (ou indivíduo)

Baseado no histórico da cana-de-açúcar plantada em cada talhão (variedade, data de plantio, data da última colheita, etc.) constrói-se o indivíduo da população. Neste trabalho propõe-se que os indivíduos da população sejam representados por matrizes com  $k$  colunas, onde cada coluna representa um talhão, e quatro linhas representando os anos de colheita. Cada elemento  $t_{ij}$  da matriz é um número entre quatro e doze ou zero ( $t_{ij} \in \{0, 4, 5, \dots, 12\}$ ), representando o mês  $t$  do ano de planejamento  $i$  no qual ocorrerá a colheita da cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$ . No ano em que houver replantio de cana-de-açúcar de ano e meio em um talhão  $j$ , faz-se  $t_{ij} = 0$ , pois nesse caso não haverá colheita nesse ano.

A Figura 2 ilustra a estrutura desse indivíduo, que representa um planejamento de colheita em cada talhão de uma cana-de-açúcar com histórico conhecido.

		TALHÃO $j$				
		1	2	3	..	K
ANO $i$	1	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	..	$t_{1k}$
	2	$t_{21}$	$t_{22}$	$t_{23}$	..	$t_{2k}$
	3	$t_{31}$	$t_{32}$	$t_{33}$	..	$t_{3k}$
	4	$t_{41}$	$t_{42}$	$t_{43}$	..	$t_{4k}$

Figura 2 - Estrutura do cromossomo representando um planejamento para quatro cortes da cana-de-açúcar plantada nos  $k$  talhões.

**Passo 2:** Construção da população inicial

Após a definição da estrutura do indivíduo a população inicial é gerada aleatoriamente, construindo-se  $N$  indivíduos como na Figura 2. Esta construção deve ser baseada no histórico da cana-de-açúcar, como exemplifica a Tabela 1.

**Passo 3:** Avaliação dos indivíduos

Criada a população inicial, cada um dos  $N$  indivíduos é avaliado de acordo com sua aptidão (ou *fitness*). Como o objetivo é obter um planejamento informando em qual período  $t$  de cada ano  $i$  deve ser feita a colheita do talhão  $j$  de área  $L_j$ , de forma a maximizar a produção da POL ou a produção de cana-de-açúcar, respeitando todas as restrições impostas pela usina, propõe-se o cálculo do *fitness* ( $F_n$ ) de cada indivíduo da forma:

$$F_n = \left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 P_{jci_j} a_{ij} L_j \right) - T_n, \quad n = 1, \dots, N,$$

quanto à produção da POL, onde  $T_n$  é a penalidade sofrida pelo indivíduo  $n$  relacionada a POL.

Quanto à produção de cana-de-açúcar, o cálculo do *fitness* ( $R_n$ ) de cada indivíduo é proposto da forma:

$$R_n = \left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 M_{jci_j} a_{ij} L_j \right) - U_n, \quad n = 1, \dots, N,$$

em que  $U_n$  é a penalidade sofrida pelo indivíduo  $n$  relacionada a produção de cana-de-açúcar.

em que:

$j = 1, \dots, k$  índice relacionado aos talhões.

$i = 1, \dots, 4$  índice relacionado ao ano de planejamento.

$c_{ij} = 0, \dots, 4$  corresponde ao número de cortes já feitos na cana plantada no talhão  $j$  no ano  $i$ .

$c_{ij} = c_{0j} + i, \quad j = 1, \dots, k.$

$c_{0j}$  = informa o número de cortes da cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$  na tabela de histórico.

$a_{ij}$  = número de meses entre  $t_{ij}$  e  $t_{(i-1)j}$ ,  $i = 1, \dots, 4, \quad j = 1, \dots, k.$

$t_{0j}$  = informa o período em que houve plantio ou corte na tabela de histórico,  $j = 1, \dots, k.$

$F_n$  é o *fitness* do indivíduo  $n$  em  $t.ha^{-1}$ , relacionado a POL.  $P_{jc_{ij}a_{ij}}$  é a produtividade de POL da cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$  e colhida no  $i$ -ésimo ano, com idade  $a_{ij}$  meses.  $L_j$  é a área do talhão  $j$ . O somatório  $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 P_{jc_{ij}a_{ij}} L_j$  estima a produção total de sacarose para cada indivíduo.  $R_n$  é o *fitness* do indivíduo  $n$ , em  $t.ha^{-1}$ , relacionado a produção de cana-de-açúcar.  $M_{jc_{ij}a_{ij}}$  é a produtividade de cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$  e colhida no  $i$ -ésimo ano, com idade  $a_{ij}$  meses. O somatório  $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 M_{jc_{ij}a_{ij}} L_j$  estima a produção total de cana-de-açúcar para cada indivíduo. A penalidade, quanto a POL, será  $T_n = 0$  se a solução apresentada pelo indivíduo  $n$  respeitar todas as restrições apresentadas pela usina (indivíduo factível) e  $T_n = \alpha \left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 P_{jc_{ij}a_{ij}} L_j \right)$  se alguma das restrições não for respeitada (indivíduo infactível). A penalidade, quanto à produção de cana-de-açúcar, será  $U_n = 0$  se a solução apresentada pelo indivíduo  $m$  respeitar todas as restrições apresentadas pela usina (indivíduo factível) e  $U_n = \alpha \left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 R_{jc_{ij}a_{ij}} L_j \right)$  se alguma das restrições não for respeitada (indivíduo infactível), com  $\alpha$  correspondendo a um valor entre 0 e 1.

A fibra total para o indivíduo  $n$  é calculada na forma:

$$FI_n = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 FI_{jc_{ij}a_{ij}} L_j \quad n = 1, \dots, N$$

O indivíduo  $n$  é factível com relação à fibra se  $FI_{inf} \leq FI_n \leq FI_{sup}$ . Em que  $FI_n$  é dado em toneladas.  $FI_{inf}$  e  $FI_{sup}$  são respectivamente os limitantes inferior e superior para fibra.

A demanda de açúcar fermentescível da usina em toneladas no mês  $\bar{t}_i$  (mês  $t$  do ano  $i$ ) é denotada por  $D_{\bar{t}_i}$ . A quantidade de açúcar fermentescível gerada pelo indivíduo  $n$  no mês  $\bar{t}_i$  é denota por  $D_{\bar{t}_i}^n$  e calculado na forma:

$$D_{\bar{t}_i}^n = \left( \sum_{j=1}^k P_{jc_{ij}a_{ij}} L_j \right), \quad i = 1, \dots, 4, \quad \bar{t}_i = 4, 5, \dots, 12, \quad n = 1, \dots, N.$$

Se  $D_{\bar{t}_i}^n \geq D_{\bar{t}_i}$ , para todo mês de demanda  $\bar{t}_i$ , então o indivíduo  $n$  é factível com relação à demanda de açúcar fermentescível e caso contrário ocorrerá à penalização.

Sejam  $CM$  a capacidade de moagem da usina em tonelada por mês. A quantidade de cana-de-açúcar produzida no mês  $\bar{t}_i$  pelo indivíduo  $n$ , denotado por  $C_{\bar{t}_i}^n$ , é calculada pela equação:

$$C_{\bar{t}_i}^n = \sum_{j=1}^k M_{jci_j a_{ij}} L_j, \quad i = 1, \dots, 4, \quad \bar{t}_i = 4, 5, \dots, 12, \quad n = 1, \dots, N.$$

Se  $C_{\bar{t}_i}^n \leq CM$  o indivíduo  $n$  é factível com relação à capacidade de moagem da usina e caso contrário infactível.

O indivíduo  $n$  é factível se satisfizer todas as restrições impostas, se alguma destas falhar o indivíduo é infactível.

Uma cópia do indivíduo com melhor *fitness*, maior aptidão, é armazenada em todas as iterações, 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.

**Passo 4: Operadores Genéticos:** Os indivíduos da população evoluem de acordo com operadores genéticos de seleção, cruzamento (*crossover*) e mutação, de forma a promover uma tendência dos indivíduos a apresentarem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua.

#### *Seleção*

Nesta etapa propõe-se a utilização do método da roleta, onde os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para a reprodução. Oitenta por cento dos indivíduos da população são escolhidos para fazerem parte de uma população intermediária.

#### *Crossover*

Os indivíduos da população intermediária são utilizados para o *crossover*. O *crossover* é feito escolhendo aleatoriamente dois dos indivíduos (Pai e Mãe), conforme exemplificado na Figura 3, e em seguida é feito um sorteio aleatório de um local de corte dentre as linhas 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.

Pai	10	0	12	5	10	4	10	10	10	4
	9	9	10	6	0	4	10	10	12	4
	11	8	10	11	8	10	9	11	11	11
	9	9	0	12	9	12	10	0	9	10
Mãe	11	0	10	5	12	6	11	11	9	5
	9	7	9	6	0	4	12	9	8	5
	11	6	11	11	10	9	10	8	8	10
	10	7	0	10	9	9	10	9	6	11

Figura 3 - Ilustração do processo de *crossover* proposto.

Suponha que foi sorteado o corte após a segunda linha. Assim o Filho 1 será obtido tomando-se as duas primeiras linhas do Pai e as duas últimas linhas da Mãe, o Filho 2 herdará do pai as linhas 3 e 4 e da Mãe as linhas 1 e 2 conforme mostra a Figura 4.

Filho 1	10	0	12	5	10	4	10	10	10	4
	9	9	10	6	0	4	10	10	12	4
	11	6	11	11	10	9	10	8	8	10
	10	7	0	10	9	9	10	9	6	11
Filho 2	11	0	10	5	12	6	11	11	9	5
	9	7	9	6	0	4	12	9	8	5
	11	8	10	11	8	10	9	11	11	11
	9	9	0	12	9	12	10	0	9	10

Figura 4 - Indivíduos resultantes do *crossover* proposto.

A população intermediária após o *crossover* será duplicada com o acréscimo dos filhos. Indivíduos dessa nova população são escolhidos aleatoriamente para a mutação.

### Mutação

Na mutação, procede-se um sorteio para cada indivíduo da população com probabilidade muito baixa ( $P_m < 0,05$ ) de haver mudança no valor de alguns de seus genes. Se o número sorteado para um dado indivíduo for inferior a  $P_m$  procede-se o sorteio (ou escolha) 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*), os melhores

indivíduos formarão a elite e os demais são eliminados. Para exemplificar a mutação, suponha que um indivíduo foi escolhido pelo processo aleatório, como descrito anteriormente, veja a Figura 5:

10	0	9	4	11	5	12	10	9	5
9	7	9	6	0	4	12	9	8	5
11	6	11	11	10	9	10	8	8	10
10	7	0	10	9	9	10	9	6	11

Figura 5 - Exemplificação de indivíduo selecionado para formar um novo indivíduo a partir da mutação.

Em seguida sorteia-se linhas e colunas para a mutação. Suponha que os genes da linha 1 e colunas 1, 4, 8 e 9 e linha 4 e colunas 2 e 7 foram sorteadas para sofrer mutação. Escolhidas as linhas e as colunas, segue-se a mutação sorteando os novos valores que irão substituir os genes sorteados como na Figura 6:

8	0	9	12	11	5	12	10	8	5
9	7	9	6	0	4	12	9	8	5
11	6	11	11	10	9	10	8	8	10
10	9	0	10	9	9	5	9	6	11

Figura 6 - Indivíduo mutado.

Portanto a nova população composta de  $NP$  indivíduos é criada, seus elementos são avaliados e é atualizada a elite.

**Passo 5:** Teste de parada: O critério de parada adotado é o número máximo de gerações. O processo envolvendo os Operadores Genéticos é repetido um número  $G$  de vezes e a solução ótima aproximada é a solução que apresentar a melhor aptidão na elite, ou seja, a elite final. Se satisfeito vá para o passo 6, caso contrário, vá para o passo 3;

**Passo 6:** Fim

#### 4 Resultados e discussão

Para aplicação da metodologia, foi implementado o método AG para planejar o agendamento da colheita da cana-de-açúcar de uma região agrícola de uma usina para um horizonte de tempo de quatro anos. Esse planejamento tem por objetivo decidir em qual período de cada ano a cana-de-açúcar, plantada nos talhões pertencentes à usina, deve ser colhida de forma a maximizar a produção da POL ou a produção de cana-de-açúcar. A aplicação foi realizada utilizando 7 instâncias, onde 3 são instâncias aleatórias (I50A, I100A e I200A) simulando 3 áreas de plantio de medidas de áreas respectivamente 990,

1980 e 4004 hectares, divididos em 50, 100 e 200 talhões respectivamente. As outras 4 são instâncias reais (I200, I500, I1000 e I1500) com medidas 4004, 11035, 15678 e 32267 hectares, divididas respectivamente em 200, 500, 1000 e 1500 talhões.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos dados de dimensões e capacidade das instâncias aleatórias.

Tabela 3 - Dados das instâncias aleatórias

Instâncias	I50A	I100A	I200A
Área total (ha)	990	1980	4004
Número de talhões (J)	50	100	200
CM <sub>máx</sub> * (toneladas)	17187	32812,5	53125
CM <sub>min</sub> ** (toneladas)	10003	21875	30937

\* Potencial de processamento mensal máximo.

\*\* Potencial de processamento mensal mínimo.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos dados de dimensões e capacidade das instâncias reais.

Tabela 4 - Dados das instâncias reais

Instâncias	I200	I500	I1000	I1500
Área total (ha)	4004	11035	15678	32267
Número de talhões (J)	200	500	1000	1500
CM <sub>máx</sub> * (toneladas)	53125	70312	128812	167946
CM <sub>min</sub> ** (toneladas)	30937	77343	93125	106250

\* Potencial de processamento mensal máximo.

\*\* Potencial de processamento mensal mínimo.

O histórico dos talhões da instancia I50A, de cinquenta talhões, está apresentado na Tabela 5. As Tabelas dos históricos das instâncias com cem, duzentos, quinhentos, mil e mil e quinhentos talhões foram suprimidas devido ao espaço. As Tabelas apresentam informações da área de cada talhão, das variedades existentes, as variedades em caso de replantio e o estágio atual da variedade presente no talhão. A partir dos históricos em cada talhão, foram feitos os planejamentos da colheita da cana-de-açúcar em cada instância.

A Tabela 6 apresenta os resultados do processo de otimização para o planejamento da colheita da cana-de-açúcar plantada nos talhões descritos na Tabela 5. A parte (a) dessa Tabela apresenta o planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar quando o objetivo da usina é produzir açúcar. A parte (b) dessa Tabela apresenta o planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar quando o objetivo é produzir a POL. A presença do número zero na Tabela 6 indica que houve plantio da cana-de-açúcar na modalidade ano e meio, implicando a ausência de produção nesse talhão no respectivo ano. As Tabelas para o planejamento da colheita das instâncias contendo cem, duzentos, quinhentos, mil e mil e quinhentos talhões foram suprimidas devido ao espaço ocupado.

Tabela 5 -Histórico da cana-de-açúcar plantada nos cinquenta talhões da instância I50A

Ta (1)	A. (2)	V. (3)	R. (4)	C. (5)	M. (6)	Ta (1)	A. (2)	V. (3)	R. (4)	C. (5)	M. (6)	Ta (1)	A. (2)	V. (3)	R. (4)	C. (5)	M. (6)
1	33	1		12	9	18	26	1	3	2	8	35	20	8	5	2	6
2	35	1	5	4	12	19	14	9	1	2	12	36	18	9	8	2	5
3	10	5	2	1	11	20	15	8		12	10	37	35	4	1	1	4
4	40	2	1	2	4	21	10	3	10	4	11	38	11	5	3	3	7
5	20	3	8	3	12	22	9	6		12	10	39	22	7	10	4	9
6	15	2	9	2	4	23	21	9	4	1	11	40	12	8	2	1	11
7	15	3	7	4	1	24	27	1	7	2	10	41	13	2		12	9
8	30	4	6	1	12	25	19	2	2	3	9	42	36	3	5	1	11
9	25	3		18	2	26	15	6	5	4	11	43	22	6	3	2	4
10	12	5	7	2	4	27	22	5	9	1	7	44	10	1	1	3	4
11	18	10		12	10	28	16	5		12	10	45	15	10	2	1	6
12	22	10		18	3	29	32	4		12	10	46	25	7	5	1	7
13	8	9	5	1	4	30	11	3	2	1	5	47	22	1		18	1
14	12	8	2	1	5	31	12	10	3	4	6	48	10	3	6	2	8
15	24	7	1	3	4	32	18	3	6	3	8	49	50	2	7	3	7
16	13	6	6	4	7	33	14	1	5	1	7	50	24	6	4	3	10
17	31	6		12	9	34	25	1		18	2						

(1) Talhão.

(2) Área Talhão em ha.

(3) Variedade Existente.

(4) Variedade em caso de replantio.

(5) Estágio no ano de planejamento (1: 1º corte, ..., 4: 4º corte, 12: cana-de-açúcar de ano plantada no ano de planejamento, 18: cana-de-açúcar de ano e meio plantada no ano de planejamento).

(6) Mês em que ocorreu o plantio ou corte no ano de planejamento.

Tabela 6 - Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I50A:  
 (a) Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar com o objetivo de produzir açúcar. (b) Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar com o objetivo de produzir POL

(a)

Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4	Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4	Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4	Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4
1	9, 9, 9, 9	14	7, 4, 6, 9	27	7, 8, 5, 9	40	10, 11, 10, 10
2	0, 10, 12, 11	15	6, 10, 11, 10	28	10, 12, 11, 10	41	7, 9, 11, 10
3	12, 11, 0, 10	16	11, 10, 11, 10	29	12, 11, 12, 11	42	12, 11, 10, 10
4	6, 8, 11, 10	17	9, 11, 10, 10	30	7, 4, 6, 9	43	6, 8, 11, 10
5	11, 0, 8, 5	18	8, 5, 11, 10	31	11, 10, 11, 10	44	6, 10, 11, 10
6	4, 4, 11, 10	19	11, 10, 12, 11	32	9, 10, 10, 10	45	7, 4, 6, 9
7	11, 10, 11, 10	20	12, 11, 10, 10	33	8, 5, 7, 9	46	8, 5, 6, 9
8	11, 10, 10, 10	21	0, 8, 5, 4	34	7, 8, 8, 5	47	7, 4, 6, 8
9	6, 8, 5, 7	22	12, 11, 11, 10	35	8, 5, 11, 10	48	8, 8, 11, 10
10	6, 7, 11, 10	23	12, 11, 10, 10	36	7, 4, 11, 10	49	9, 10, 11, 10
11	10, 12, 11, 10	24	10, 10, 11, 10	37	5, 7, 4, 9	50	10, 10, 11, 10
12	7, 8, 9, 10	25	9, 10, 11, 10	38	9, 10, 11, 10		
13	6, 8, 5, 9	26	0, 8, 5, 7	39	12, 10, 12, 11		

Tabela 7 – (Continuação) - Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I50A: (a) Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar com o objetivo de produzir açúcar. (b) Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar com o objetivo de produzir POL

(b)

Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4	Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4	Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4	Talhão	Mês do corte nos anos 1,2,3,4
1	7, 8, 8, 8	14	5, 5, 6, 10	27	8, 9, 7, 10	40	12, 11, 12, 9
2	0, 7, 5, 4	15	6, 10, 11, 11	28	10, 8, 8, 8	41	9, 10, 11, 11
3	11, 10, 8, 9	16	9, 9, 8, 10	29	10, 12, 11, 12	42	10, 11, 10, 9
4	5, 5, 9, 7	17	10, 12, 12, 11	30	5, 5, 7, 9	43	6, 6, 10, 8
5	11, 0, 6, 6	18	9, 7, 11, 12	31	10, 11, 10, 11	44	5, 10, 10, 11
6	4, 5, 9, 11	19	11, 10, 12, 11	32	8, 10, 8, 10	45	6, 6, 8, 10
7	9, 10, 11, 11	20	11, 12, 11, 10	33	8, 8, 10, 11	46	7, 6, 6, 9
8	12, 11, 10, 12	21	0, 6, 7, 7	34	7, 6, 8, 10	47	5, 4, 4, 5
9	6, 5, 4, 6	22	8, 8, 6, 8	35	5, 7, 9, 9	48	9, 9, 11, 12
10	6, 6, 9, 10	23	10, 10, 8, 10	36	7, 9, 10, 10	49	8, 10, 9, 10
11	10, 8, 8, 10	24	9, 9, 10, 9	37	6, 6, 7, 11	50	10, 0, 5, 7
12	7, 9, 9, 7	25	9, 9, 7, 8	38	8, 10, 8, 9		
13	4, 4, 4, 9	26	0, 6, 6, 7	39	11, 11, 11, 12		

Verificou-se na Tabela 6 que a metodologia proposta conseguiu determinar um planejamento da colheita da cana-de-açúcar para um horizonte de quatro anos, a partir do histórico de cada instância, dentro do período útil de industrialização para todas as instâncias. Este fato é um indicativo que esta metodologia é eficaz para propor planos de colheita otimizado para qualquer dimensão de áreas.

Para análise da convergência o algoritmo genético foi executado dez vezes para cada instância e a partir desses resultados foram obtidos a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para estas dez observações. Os resultados encontram-se na Tabela 7 para dados gerados de instâncias aleatórias e na Tabela 8 para as instâncias reais.

Tabela 8- Produção otimizada média de POL e Produção otimizada média de cana-de-açúcar para as instâncias aleatórias

Instância	I50A	I100A	I200A
Produção POL*	16486	32957	55035
Produção Cana-de-açúcar*	13155	26692	46730
	0	5	0
Desvio padrão	0,012	0,015	0,020
Coefficiente de variação**	0,0023	0,0031	0,0029

\*Em toneladas por ano

\*\*Em porcentagem

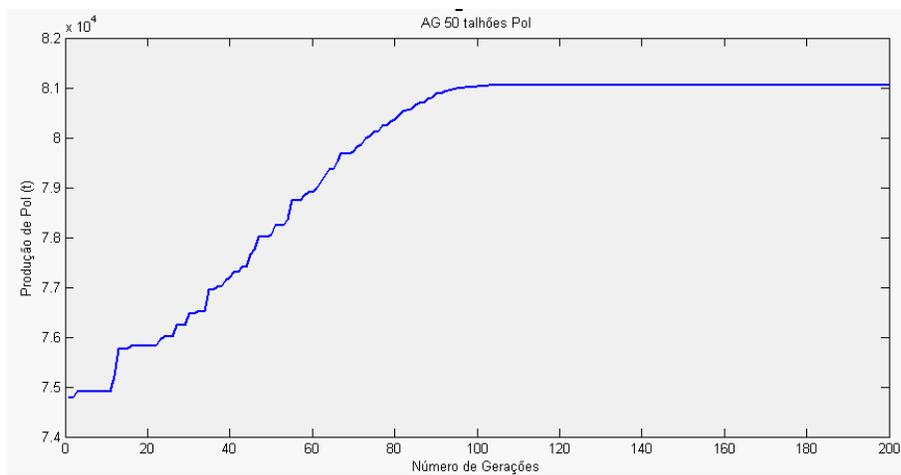
Tabela 9 - Produção otimizada média de POL e Produção otimizada média de cana-de-açúcar para as instâncias reais

Instância	I200	I500	I1000	I1500
Produção POL*	29917	73837	148475	218697
Produção cana-de-açúcar*	243475	641528	1253328	1844425
Desvio padrão	0,0238	0,02	0,017	0,031
Coefficiente de variação**	0,002	0,0019	0,0024	0,0028

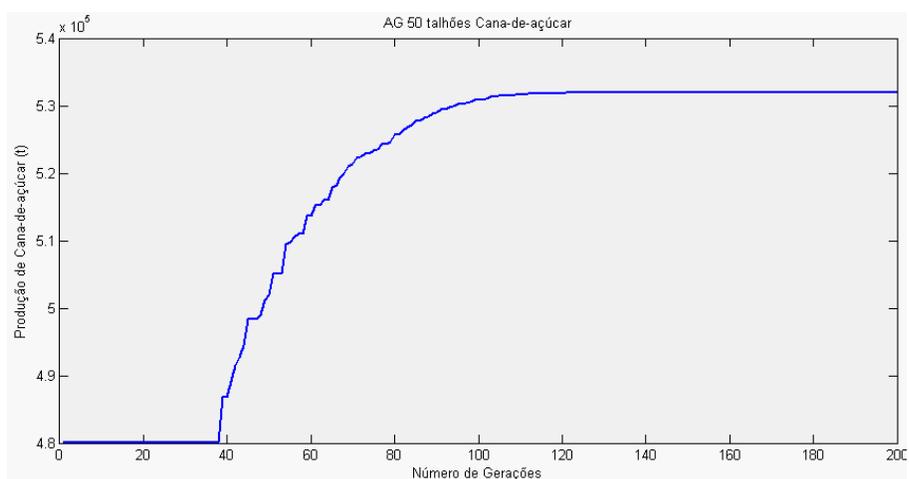
\*Em toneladas por ano

\*\*Em porcentagem

O baixo valor obtido para o desvio padrão e para o coeficiente de variação é um indicativo da robustez do AG. Nas Figuras 7, 8 e 9 mostra-se a convergência do AG em pequenas (50 talhões), médias (500 talhões) e grandes (1500 talhões) instâncias, observando a produção da POL e de cana-de-açúcar para os quatro anos de planejamento ao longo das gerações do AG.



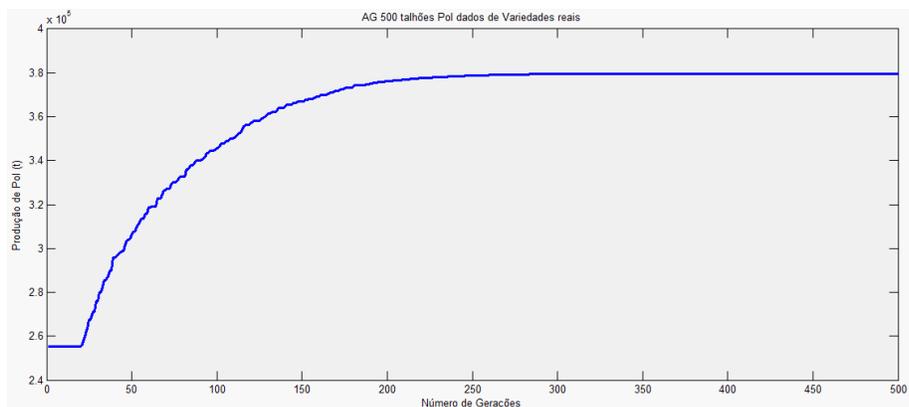
(a)



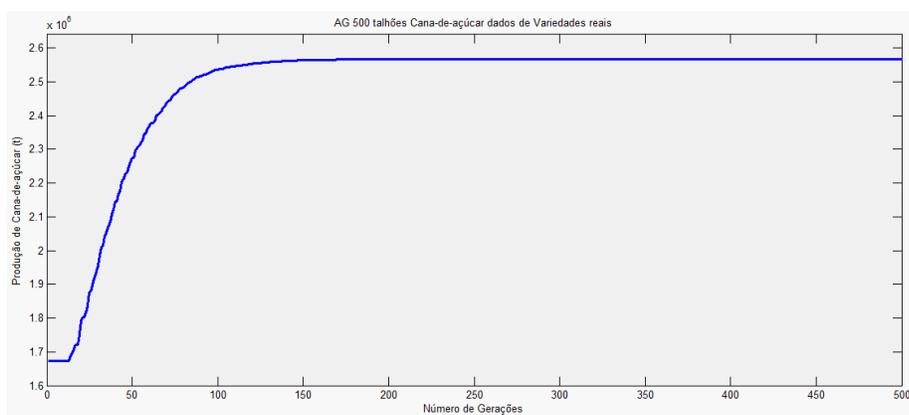
(b)

Figura 7 - (a) Produção da POL em toneladas, em função do número de gerações para a instância I50A. (b) Produção de cana-de-açúcar, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I50A.

O comportamento do processo de otimização para pequenas instâncias, observado na Figura 7 (a), apresenta incrementos sucessivos na produção da POL para a instância I50A, que perduram até a geração 104 onde então ocorre a estabilização e convergência do processo. Na produção de cana-de-açúcar apresentada na Figura 7 (b), verifica-se que a produção da POL recebe incrementos até a geração 121, onde ocorre a estabilização e convergência do processo.



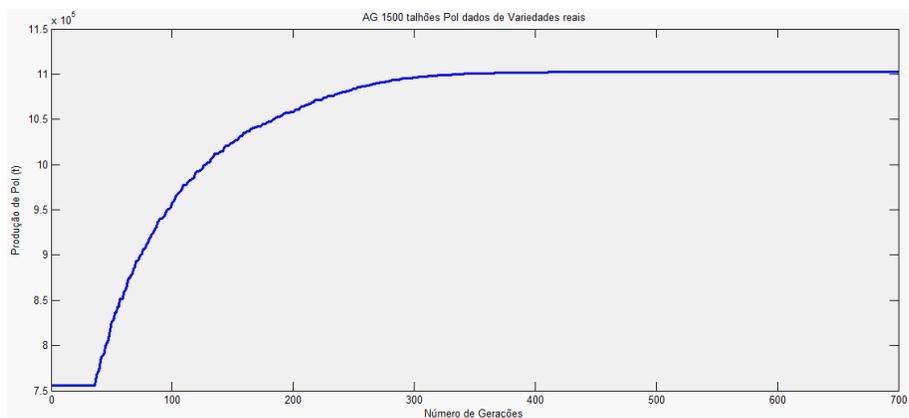
(a)



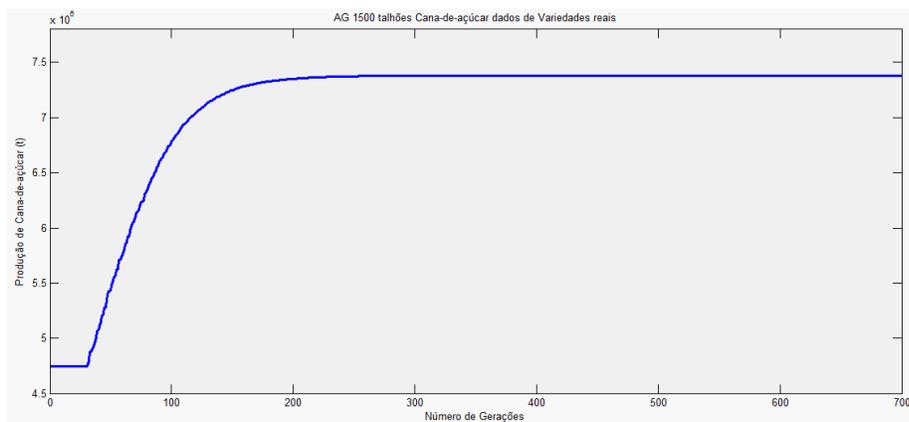
(b)

Figura 8 - (a) Produção da POL, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I500. (b) Produção de cana-de-açúcar, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I500.

A Figura 8 apresenta o comportamento do processo para médias instâncias, caracterizada pela instância I500. Verifica-se o comportamento de incrementos sucessivos com o transcorrer das gerações em seguida a estabilização do processo, que ocorre na geração 267 para a POL, Figura 8 (a), e geração 167 para a cana-de-açúcar, Figura 8 (b).



(a)



(b)

Figura 9 - (a) Produção da POL, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I1500. (b) Produção de cana-de-açúcar, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I1500.

Na Figura 9 tem-se o comportamento do processo de convergência do AG para a instância I1500. Verifica-se o comportamento de incrementos sucessivos com o passar das gerações seguida da estabilização do processo na geração 405 para a POL, Figura 9 (a), e na geração 249 para a cana-de-açúcar, Figura 9 (b).

No processo de convergência do AG, pode-se verificar que a convergência do modelo de otimização da produção de POL é mais lenta que do modelo de otimização da produção de cana-de-açúcar.

As Tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam os resultados do processo de otimização quanto aos objetivos de maximizar a produção de cana-de-açúcar e da POL para as instâncias aleatórias e reais, assim como as porcentagens de talhões cuja cana-de-açúcar foi colhida

no pico de maturação, desvio 0, com 1 mês a mais ou a menos do pico de maturação, desvio 1, e com 2 meses de desvio deste pico.

Tabela 10 - Produção otimizada de cana-de-açúcar nas três instâncias aleatórias

Instância	Produção Otimizada Cana-de-açúcar (t)	Possível Produção POL (t)	Ocorrência dos Desvios*			Média Desvios	Tempo de CPU (horas)**
			0	1	2		
I50A	526200	65944	50,5	30,5	19,0	0,6850	0,53
I100A	1067700	131830	48,7	40,7	10,5	0,9725	1,05
I200A	1903200	220140	44,0	38,9	15,0	0,6087	2,02

\* Porcentagem de talhões cuja cana-de-açúcar foi colhida no pico de maturação (0), com 1 mês de desvio do pico de maturação (1) e com 2 meses de desvio (2).

\*\* *Central Processing Unit*, que, em Português, significa Unidade Central de Processamento.

Tabela 11 - Produção otimizada de cana-de-açúcar nas quatro instâncias reais

Instância	Produção Otimizada Cana-de-açúcar (t)	Possível Produção POL (t)	Ocorrência dos Desvios*			Média Desvios	Tempo de CPU (horas)
			0	1	2		
I200	973900	119670	36,9	41,4	21,7	0,8487	2,10
I500	2566115	295350	42,6	37,2	20,1	0,7750	3,95
I1000	5013312	593901	41,1	38,7	20,2	0,7907	4,56
I1500	7377702	874790	37,9	35,3	26,7	0,8886	8,88

\* Porcentagem de talhões cuja cana-de-açúcar foi colhida no pico de maturação (0), com 1 mês de desvio do pico de maturação (1) e com 2 meses de desvio (2).

\*\* *Central Processing Unit*, que, em Português, significa Unidade Central de Processamento.

Tabela 12- Produção otimizada da POL nas três instâncias aleatórias

Instância	Possível Produção Cana-de-açúcar (t)	Produção Otimizada POL (t)	Ocorrência dos Desvios*			Média Desvios	Tempo de CPU (horas)
			0	1	2		
I50A	417560	81059	23,0	48,5	28,5	1,0550	0,33
I100A	843600	159940	31,2	38,5	30,2	0,9900	0,99
I200A	1481600	248960	28,5	38,6	32,9	1,0437	1,42

\* Porcentagem de talhões cuja cana-de-açúcar foi colhida no pico de maturação (0), com 1 mês de desvio do pico de maturação (1) e com 2 meses de desvio (2).

\*\* *Central Processing Unit*, que, em Português, significa Unidade Central de Processamento.

Tabela 13- Produção otimizada da POL nas quatro instâncias reais

Instância	Possível Produção Cana-de- açúcar(t)	Produção Otimizada POL (t)	Ocorrência dos Desvios*			Média Desvios	Tempo de CPU (horas)
			0	1	2		
I200	779600	166550	30,0	39,0	31,0	1,0100	1,69
I500	1837305	379608	29,8	41,0	29,2	0,9941	2,35
I1000	3551022	744400	30,3	40,0	29,7	0,9942	3,98
I1500	5411101	1102711	32,5	38,2	29,2	0,9671	7,67

\* Porcentagem de talhões cuja cana-de-açúcar foi colhida no pico de maturação (0), com 1 mês de desvio do pico de maturação (1) e com 2 meses de desvio (2).

\*\* *Central Processing Unit*, que, em Português, significa Unidade Central de Processamento.

Os resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10 são referentes ao objetivo de maximização da quantidade de cana-de-açúcar produzida com o planejamento otimizado em quatro anos para as instâncias aleatórias e reais. Nestas tabelas também estão apresentados os resultados para a produção da POL, utilizando o mesmo planejamento. Enquanto as Tabelas 11 e 12 apresentam a produção otimizada da POL para instâncias aleatórias e reais e o cálculo da possível produção de cana-de-açúcar. Pode-se observar que dependendo do objetivo considerado pode-se aumentar uma média de 31,9% na produção de cana-de-açúcar e 25,2% na produção da POL (comparando a coluna 3 das Tabelas 9 e 11 e a coluna 2 das Tabelas 10 e 12).

Em todos os talhões e em todas as instâncias, a metodologia proposta apresentou um planejamento otimizado para a colheita da cana-de-açúcar dentro do Período Útil de Industrialização (PUI), período de maturação da cana-de-açúcar. Observa-se também, nas Tabelas 9, 10, 11 e 12, que a maioria das instâncias apresentam uma Média de Desvio inferior a 1. Esses resultados indicam que a metodologia é eficaz para a determinação de planejamentos de colheita da cana-de-açúcar no correto período de maturação, para pequenas, médias e grandes unidades agrícolas.

## Conclusões

O sucesso de uma empresa sucroalcooleira está ligado ao adequado sistema de produção agrícola que fornecerá a matéria prima. Mas, o gerenciamento deste sistema tem se tornado cada vez mais complexo devido a rápida ampliação desse setor. Assim, as metodologias matemáticas podem auxiliar muito na determinação de estimativas e tomadas de decisões. Desta forma, as ferramentas matemáticas que auxiliam nesse sistema de produção agrícola tem ganhado muito espaço no gerenciamento do setor sucroalcooleiro.

Este trabalho apresentou uma metodologia matemática de otimização para auxiliar nas decisões relacionadas ao planejamento do fornecimento de cana-de-açúcar com o objetivo de maximizar a produção de cana-de-açúcar e POL. Isso ocorreu por meio da obtenção do melhor arranjo para o agendamento da colheita da cana-de-açúcar para um horizonte de planejamento de quatro anos.

Como o problema é de natureza combinatorial, com uma elevada quantidade de variáveis, e portanto, de alta complexidade computacional, optou-se pela aplicação de métodos heurísticos de otimização para resolvê-lo. Dentre os métodos heurísticos

existentes foi escolhido o Algoritmo Genético, uma meta-heurística baseada no princípio Darwiniano de seleção natural.

O Algoritmo Genético desenvolvido é passível de inserção de novas restrições que possam ocorrer e de mudanças nos objetivos sem demandar grandes modificações ou dificuldades.

Constata-se que a metodologia utilizada é capaz de efetuar um planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar dentro de um objetivo proposto, seja para maximizar a produção de cana-de-açúcar ou da POL, no correto período de maturação, produzindo aumentos significativos nestas produções.

Analisando os resultados obtidos verificou-se que a metodologia proposta é eficaz em realizar o planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para diferentes tamanhos de unidades agrícolas, em um horizonte de planejamento determinado. Assim pode-se concluir que esta metodologia é uma importante ferramenta para auxílio dos gestores de usinas nas tomadas de decisões quanto ao planejamento da colheita da cana-de-açúcar.

## Agradecimentos

Os autores agradecem as fundações CNPq (302454/2016-0), PROPE (Pró-Reitoria de Pesquisa da UNESP), FUNDUNESP (Fundação para o Desenvolvimento da UNESP), FAPESP (2014 / 01604-0 e 2014/04353 -8) e UENP (Universidade Estadual do Norte do Paraná) pelo apoio financeiro.

- NERVIS, J. J.; FLORENTINO, H. O.; CANTANE, D. R.; RAMOS, R. P.; ISLER, P. R. Simulation for optimization of sugar cane management harvest. *Rev. Bras. Biom. Lavras*, v.35, n.2, p.415-439, 2017.
- *ABSTRACT: Sugar cane was introduced in Brazil in the colonial period and it has become one of the most important crops for the Brazilian economy. Brazil is not only the largest sugarcane producer, but it is also the first in sugar production and the second in ethanol production and, increasingly, it has been conquering the international market with the biofuel use as an alternative energy. This position has been achieved due to accelerated growth in the last years and it has contributed to the emergence of issues related to logistical transport production process, management and decision-making. The problems caused by this situation to the sugar cane management are large and tools to aid in decision-making, management optimization and estimate are necessary. Within this context, it is discussed, in this paper, a study of the sugar cane management harvest in the mills, proposing a methodology to assist in sugarcane harvest planning in order to maximize the POL in sugarcane, sugarcane productivity and respect the restrictions imposed by the mill. The optimization process was accomplished using GA, heuristic used in large combinatorial problems with computational complexity. Periods of harvesting in stands which belong to a mill were planned and the highest productivity was achieved in a four-year planning. The results are presented and discussed at the end of this study, showing that this approach is an important tool to aid agricultural managers in decision-making in planning the harvest of sugar cane.*
- *KEYWORDS: Genetic algorithm; combinatorial problems; sugar cane management; planning harvest.*

## Referências

- BEAUCLAIR, E. G. F.; PENTEADO, C. R. Cronograma de corte da cana-de-açúcar através da programação linear. In : *SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA*, 2., Piracicaba, 1984. Anais. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, p.424 – 434, 1984.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Agroenergia*. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/-desenvolvimento-sustentavel/agroenergia>. Acesso em: 28 de nov. de 2015.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Agroenergia*. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/-desenvolvimento-sustentavel/agroenergia>. Acesso em: 09 de set. de 2015.
- BRANDÃO, D. Distinção de classes de cana-de-açúcar através do NDVI. Em *XIV Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto*, p 105-111, Natal, Brasil, 2009.
- CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (CTC). *Censo varietal e de produtividade em 2008*. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 2008. 16 p.
- COELHO, L. S. Fundamentos Potencialidades e Aplicações de Algoritmos Evolutivos. In: 2, SBMAC, 2003. Notas de Matemática Aplicada; resumos. São Carlos: *XXVI CNMAC*, p. 1 – 111, 2003.
- FRASSON, F. R. *Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar*. 76 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura - “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2007.
- GHELLER, A. C. A. Resultados da aplicação de maturadores vegetais em cana-de-açúcar, variedades RB72454 e RB835486 na região de Araras, SP. In: *Jornada Científica da UFSCar*, 2001, São Carlos. Resumos... São Carlos: UFSCar, 2001.p. 30-35.
- GOLDBERG, D. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison- Wesley 1989.
- HIGGINS, A. J. Optimizing cane supply decisions within a sugar mill region. *Journal of Scheduling*, v2, p.229–244, 1999.
- HIGGINS, A. J.; MUCHOW, R. C.; RUDD, A.; FORD, A. Optimising harvest date in sugar production: a case study for the Mossman Mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. *Field Crops Research*, n.57, p.151–160, 1998.
- INMAN-BAMBER, N. G. Effect of Age and Season on Components of Yield of Sugarcane in South Africa. *Proceedings of the South African Sugar Technologists Association*, p.23–27, 1994.
- MILLER, L. C. *Tecnologia agrícola para exploração e manejo cultural da cana-de-açúcar*. Disponível em: <[http://www.sigacana.com.br/b\\_PLANTIO%5C2\\_PLANTIO.htm](http://www.sigacana.com.br/b_PLANTIO%5C2_PLANTIO.htm)> Acesso em: 15 nov. 2013.
- MAY, K. K.; MIDDLETON, F. H. Age-of-harvest, a historical review. *Haw Planters Records*, n.58, p.241-263, 1972.
- MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W.; KEATING, B. A. Assessing Limits to Sugarcane Yield. *Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technologists*, p.221-228, 1997.

- NUNES JÚNIOR, S. M.; SCHOUCHANA, D. T. Determinação do valor econômico de variedade de cana-de-açúcar em função das épocas de corte e das distâncias da Usina. *Boletim Técnico Copersucar*, n.25, p.2-10, 1984.
- PACHECO, M. A. *Algoritmos genéticos: princípios e aplicações*. ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. 1999. Disponível em <<http://www.ica.ele.puc-rio.br/home/index.rails>> Acesso em: 09 dez. 2013.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba: Edição dos autores, 2004. 302 p.
- RIPOLI T. C.; VILLANOVA N. A. Colheita Mecanizada da Cana-de-Açúcar: Novos Desafios. *STAB*, v.11, n.1, p.28-31, 1992.
- SACHS, R. C. C. Remuneração da tonelada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. *Informações Econômicas*, São Paulo, v.37, n.2, 2007.
- SEGALLA, A. L.; OLIVEIRA, H. D.; POMER, C. V.; SPIRONELO, A.; BASTOS, C. R. Determinação do período de colheita de variedades de cana-de-açúcar através de suas curvas de maturação. In: *CONGRESSO NACIONAL DA STAB*, v. 2, Rio de Janeiro, 1981. Anais. Rio de Janeiro: STAB, 1981. p. 227- 245.
- SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. *Atualizações em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba, CP 2, 2006. 415p.
- SILVA, M. A.; JERONIMO, E. M.; LÚCIO, A. D. C. Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.43, n.8, p. 979-986, 2008.
- UNICA – *União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Posição em 31/04/2015*. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>> . Acesso em: 09 de dez. de 2015.
- USDA - *United States Department of Agriculture*. Disponível em :<<http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>>. Acesso em: 28 de dez. de 2015.
- WORLDWATCH INSTITUTE (Ed.) *Biofuels for transportation. Global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21st century*. Washington: s. n., 2015.

Recebido em 22.01.2016

Aprovado após revisão em 17.03.2017