

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

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

JONIS JECKS NERVIS

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP - Campus de  
Botucatu, para obtenção do título de Doutor  
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP

Novembro – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

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

JONIS JECKS NERVIS

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Helenice de Oliveira Florentino Silva  
Co-orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Daniela Renata Cantane

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP - Campus de  
Botucatu, para obtenção do título de Doutor  
em Agronomia (Energia na Agricultura).

**BOTUCATU-SP**  
Novembro – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

N456s Nervis, Jonis Jecks, 1979-  
Simulação para a otimização da colheita da cana-de-açúcar / Jonis Jecks Nervis. - Botucatu : [s.n.], 2015  
vii, 67 f. : grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015  
Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva  
Coorientador: Daniela Renata Cantane  
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Colheita. 2. Algoritmos genéticos. 3. Análise combinatória. 4. Simulação (Computadores). I. Silva, Helenice de Oliveira Florentino. II. Cantane, Daniela Renata. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "SIMULAÇÃO PARA A OTIMIZAÇÃO DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR"

AUTOR: JONIS JECKS NERVIS

ORIENTADORA: Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA F SILVA

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. DANIELA RENATA CANTANE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA) , pela Comissão Examinadora:

  
Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA F SILVA  
Departamento de Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu

  
Prof. Dr. ADRIANO ROGÉRIO BRUNO TECH  
Departamento de Ciências Básicas / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos de Pirassununga

  
Prof. Dr. MARCO ANTONIO GANDOLFO  
Departamento de Ciências Agrárias / Universidade Estadual do Norte do Paraná

  
Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS  
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO  
Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru

Data da realização: 12 de novembro de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pelos caminhos que me trouxeram até aqui e pela força e fé sem as quais não teria conseguido vencer as batalhas necessárias.

Aos meus pais Nelson e Cecília pelo apoio, educação e carinho.

À minha esposa pela paciência e incentivo imprescindíveis para concluir a jornada.

À professora Helenice, pela oportunidade, paciência, competência, incentivo, sugestões e pela confiança dispensada, que foram fundamentais para a elaboração e conclusão deste trabalho.

Agradeço à professora Daniela, pela ajuda, pelos seus conselhos, sugestões e dicas que foram indispensáveis para o aperfeiçoamento do trabalho.

Aos professores e funcionários do departamento de Bioestatística e da secção de Pós-graduação pelo bom atendimento.

À UENP por possibilitar a disponibilidade de tempo necessária para a realização deste trabalho.

À todas as pessoas que de uma maneira ou de outra contribuíram com o trabalho.

## SUMÁRIO

1. RESUMO .....	1
2. SUMMARY .....	2
3. INTRODUÇÃO.....	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4.1 A cana-de-açúcar .....	7
4.1.1 O plantio da cana-de-açúcar.....	8
4.1.2 A colheita da cana-de-açúcar .....	9
4.1.3 Variedades de cana-de-açúcar.....	10
4.2 Técnicas de otimização.....	13
4.2.1 Métodos Heurísticos .....	15
4.2.2 Meta-heurística.....	16
4.2.2.1 Algoritmo genético (AG) .....	17
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
5.1 O Problema.....	25
5.2 Algoritmo genético .....	27
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
7. CONCLUSÃO.....	60
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de maturação de uma cana-de-açúcar padrão (SACHS, 2007). .....	13
Figura 2. Cromossomo de cadeia binária (CASTRO, 2013).....	18
Figura 3. Roleta-russa para uma população (N) de cinco indivíduos do AG (RODRIGUES et al., 2004). .....	19
Figura 4. <i>Crossover</i> de um ponto (RODRIGUES et al., 2004).....	21
Figura 5. Mutação e pós-mutação para obtenção de cromossomos viáveis. (RODRIGUES et al., 2004).....	22
Figura 6. Estrutura do AG proposto. ....	28
Figura 7. Estrutura do cromossomo representando um planejamento para quatro cortes da cana-de-açúcar plantada nos $k$ talhões.....	29
Figura 8. Ilustração do processo de <i>crossover</i> proposto.....	33
Figura 9. Indivíduos resultantes do <i>crossover</i> proposto.....	33
Figura 10. Exemplificação de indivíduo selecionado para formar um novo indivíduo a partir da mutação.....	34
Figura 11. Indivíduo mutado. ....	34
Figura 12. (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. ....	55
Figura 13. (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. ....	56
Figura 14. (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. ....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produtividade em toneladas de cana-de-açúcar por hectare (TCH), Pol e Fibra das variedades mais plantadas na região Centro-Sul do Brasil (PECEGE, 2011).....	12
Tabela 2. Histórico da cana-de-açúcar em uma área de 119 ha contendo cinco talhões. ....	26
Tabela 3. Planejamento para os quatro anos de colheita da cana-de-açúcar plantada na área agrícola apresentada na Tabela 2.....	26
Tabela 4. Dados aleatórios das variedades utilizadas para aplicação da metodologia. ....	37
Tabela 5. Dados reais das variedades utilizadas para aplicação da metodologia.....	37
Tabela 6. Parâmetros utilizados para implementação do Algoritmo Genético. ....	38
Tabela 7. Dados das instâncias aleatórias.....	38
Tabela 8. Dados das instâncias reais. ....	39
Tabela 9. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos cinquenta talhões na instância I50A.	40
Tabela 10. 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. ....	41
Tabela 11. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos cinquenta talhões na instância I100A. ....	42
Tabela 12. Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I100A: (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. ....	43
Tabela 13. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos cinquenta talhões na instância I200A. ....	45



Tabela 14. Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I200A: (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. .....	46
Tabela 15. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos cinquenta talhões na instância I200.	49
Tabela 16. Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I200: (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. .....	50
Tabela 17. Produção otimizada média de Pol e Produção otimizada média de cana-de-açúcar para as instâncias aleatórias. ....	53
Tabela 18. Produção otimizada média de Pol e Produção otimizada média de cana-de-açúcar para as instâncias reais. ....	54
Tabela 19. Produção otimizada de cana-de-açúcar nas três instâncias aleatórias. ....	58
Tabela 20. Produção otimizada de cana-de-açúcar nas quatro instâncias reais. ....	58
Tabela 21. Produção otimizada da Pol nas três instâncias aleatórias. ....	58
Tabela 22. Produção otimizada da Pol nas quatro instâncias reais. ....	59

## 1. RESUMO

A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil no período colonial e transformou-se em uma das principais culturas da economia brasileira. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana-de-açúcar, é 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. Essa posição foi alcançada devido ao crescimento acelerado nos últimos anos e contribuiu para o surgimento de problemas relacionados à logística de transporte, ao processo de produção, ao manejo e a tomada de decisão. Os problemas gerados por essa situação aos gestores do setor sucroalcooleiro são grandes e ferramentas para auxílio nas tomadas de decisões, manejos otimizados e para a obtenção de estimativas são necessárias. Dentro desse contexto, é abordado neste trabalho um estudo do manejo da colheita da cana-de-açúcar nas unidades agrícolas que compõem a usinas, propondo uma metodologia para auxiliar no planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar de forma a maximizar a produção de POL (porcentagem em massa de sacarose aparente contida na cana-de-açúcar), a produção de cana-de-açúcar e respeitando restrições impostas pela usina. O processo de otimização foi realizado utilizando o Algoritmo Genético (AG), heurística utilizada em problemas combinatoriais de grande porte com grandes complexidades computacionais. Os períodos de colheita dos talhões pertencentes a uma unidade agrícola da usina foram planejados alcançando a máxima produtividade em um horizonte de planejamento de quatro anos. Os resultados numéricos obtidos são apresentados e discutidos no final do trabalho, 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.

SIMULATION FOR OPTIMIZATION OF SUGARCANE HARVEST. Botucatu, 2015. 77p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”.

Author: Jonis Jecks Nervis.

Adviser: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Co-adviser: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Daniela Renata Cantane

## 2. SUMMARY

Sugarcane was introduced in Brazil in the colonial period and it has become one of the most important crop 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 sugarcane management are large and tools to aid in decision making, management optimization and estimate are necessary. Within that context it is discussed, in this paper, a study of the sugarcane 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 managers plants in decision-making in planning the harvest of sugarcane.

---

**Keywords:** Genetic Algorithm, combinatorial problems, sugarcane management and planning harvest.

### 3. INTRODUÇÃO

Relatos históricos indicam que a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma planta proveniente da Nova Guiné e que foi levada para a Índia, país do qual se originou a palavra açúcar. O contato com o Ocidente ocorreu em dois momentos: na Índia, através de alguns generais de Alexandre, o Grande, em 327 a.C. e no século XI, durante as Cruzadas. Os árabes foram os responsáveis por introduzirem o cultivo da cana-de-açúcar no Egito, em Chipre, na Sicília e na Espanha (MACHADO, 2013).

A história da cana-de-açúcar no Brasil teve início com Cristóvão Colombo, genro de um grande produtor de açúcar na Ilha Madeira que introduziu o plantio da cana-de-açúcar na América, em sua segunda viagem ao continente, em 1493, onde hoje é a República Dominicana, porém a primeira muda de cana-de-açúcar plantada no Brasil ocorreu em 1532, quando Martim Affonso de Souza iniciou o cultivo da planta na Capitania de São Vicente. Sendo ele próprio o construtor do primeiro engenho de açúcar. Mas foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram (MACHADO, 2013). Essa trajetória histórica culminou com o Brasil sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA (2013). O USDA United States Department of Agriculture (USDA, 2013) afirma que atualmente o Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo e o WORLDWATCH INSTITUTE (2013) afirma que o Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo. Estes fatos fizeram do setor sucroalcooleiro o responsável por cerca de 1,85 % do PIB nacional e 29% do PIB da agricultura no Brasil nos últimos anos, e também por ter empregado cerca de 4,1 milhões de pessoas (BRASIL, 2014).

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 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).

O Brasil atingiu a posição atual no cenário mundial da produção de cana-de-açúcar utilizando tecnologia de ponta, pesquisa avançada, investimento e muito trabalho. Com o intuito de manter o domínio no que se refere à cana-de-açúcar é primordial buscar incessantemente meios de aumentar a eficiência do processo produtivo. Dentre os fatores que aumentam a eficiência do processo produtivo da cana-de-açúcar estão os manejos associados ao cultivo, como exemplo o plantio e a colheita. Os planejamentos de plantio e colheita devem ser feitos de forma a respeitar dentre outros o período de moagem desta cultura.

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, como a data da colheita influenciam no rendimento e qualidade da cultura (MAY; MIDDLETON, 1972), (INMAN-BAMBER, 1994), (MUCHOW et al., 1997) e (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 prolongando. Como consequência disso, é impossível colher toda a cana-de-açúcar pertencente à usina quando a produção e a qualidade são máximas. Isso ocorre devido às capacidades limitadas dos maquinários de colheita, de processamento na usina e de transporte. Portanto é muito importante ter um planejamento antecipado da colheita da cana-de-açúcar (ALEXANDER, 1973).

O planejamento da colheita da cana-de-açúcar tem como objetivo organizar todas as práticas referentes a esta atividade, possibilitando que o investimento realizado durante o cultivo seja recompensado, trazendo dividendos ao produtor (BRIEGER; PARANHOS, 1964) e (RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000).

A cana-de-açúcar deve ser colhida com o máximo teor de açúcar possível, portanto a colheita deve ser planejada para o 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; RIPOLI, 2004).

A matéria-prima, que é constituída de colmos industrializáveis, brotos “*chupões*”, matéria estranha mineral (terra, metais) e vegetal (palhas, folhas verdes, ponteiros, restos de cultura, plantas daninhas) deve refletir todo o trabalho desenvolvido no planejamento da colheita e na implantação da cultura, desde o preparo periódico do solo até a operação de corte e retirada do produto do campo (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Este universo de ações de planejamento e execução deve iniciar-se pela correta seleção da variedade a ser plantada, em funções das condições edafo-climáticas locais, terminando em condições adequadas da malha viária, do subsistema de transporte, do subsistema de recepção da matéria-prima na indústria e do potencial e da adequada qualificação da mão-de-obra disponível (trabalhadores braçais, operadores de máquinas, mecânicos, técnicos de nível superior, gerentes de áreas etc.) (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

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, quanto aos seus (Período Útil de Industrialização). Pois se deseja 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; VILLANOVA,1992).

Como no Brasil o período de safra se estende de abril até dezembro, o planejamento da colheita deve levar em consideração todos os fatores que permitam maximizar os ganhos em sacarose e produtividade durante todo o período da safra, mesmo sabendo-se que, normalmente, agosto-outubro, seria o período natural para o pico de maturação (RIPOLI; VILLANOVA,1992).

Variedades de baixa intensidade de florescimento e de P.U.I. (Período Útil de Industrialização) longo, favorecem bastante o planejamento de corte por permitirem maior flexibilidade no seu manejo (YIRSAW et al. 2013).

Adversidades de toda ordem podem ocorrer (climáticas, administrativas, sociais, econômicas etc.), mas o planejamento deverá contemplar alternativas previsíveis, que contornem as situações sem graves desvios dos objetivos das

operações de colheita. Da mesma forma, técnicas diversas podem ser adotadas de modo a favorecer o planejamento, por meio de uma atuação mais distinta sobre o planejamento do período de colheita.

Este trabalho propõe uma metodologia para o planejamento otimizado do período da colheita da cana-de-açúcar visando à maximização da produção da Pol (porcentagem em massa de sacarose aparente contida na cana-de-açúcar) e a produção de cana-de-açúcar, respeitando todas as restrições impostas pela usina.

O trabalho apresenta uma revisão de literatura do cultivo da cana-de-açúcar e sua importância para o Brasil. É apresentado também a revisão de Algoritmo Genético (AG), que é uma heurística utilizada em processos de otimização de problemas combinatoriais de grande porte e que apresentam grandes complexidades computacionais. Também é descrita a metodologia proposta para o planejamento otimizado do período de colheita da cana-de-açúcar com o auxílio do método AG. Ao final, são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela simulação da aplicação da metodologia proposta para a construção de planejamentos otimizado da colheita da cana-de-açúcar utilizando o AG.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea cultivada principalmente nos climas tropicais e subtropicais, entre as latitudes 35° N a 38° S. Estas localizações favorecem o desenvolvimento da cana-de-açúcar, pois esta cultura necessita de uma época quente e chuvosa para o desenvolvimento vegetativo, e uma época fria e/ou seca para o enriquecimento em açúcares, período este conhecido como maturação (FERNANDES, 1984) e (DOOREMBOS; KASSAM, 1979).

Os estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar podem ser descritos como em Gascho Shih (1983) e Doorembos e Kassam (1979): brotação e emergência, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos.

Na brotação e emergência o broto rompe as folhas da gema e se desenvolve em direção à superfície do solo. Ao mesmo tempo surgem as raízes do tolete. A emergência do broto ocorre de 20 a 30 dias após o plantio. O broto é um caule em miniatura que surge acima da superfície do solo (chamado de colmo primário). Esta fase depende da qualidade da muda, ambiente, época e manejo do plantio. Neste estágio ocorre, ainda, o enraizamento inicial (duas a três semanas após a emergência) e o aparecimento das primeiras folhas.

O perfilhamento é o processo de emissão de colmos por uma mesma planta, os quais recebem a denominação de perfilhos. O processo de perfilhamento é regulado por hormônios e resulta no crescimento de brotos que vão em direção à superfície do solo. Esses brotos aparecem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário. Por



meio desse processo, ocorre a formação da touceira da cana-de-açúcar e a população de colmos que será colhida. É importante destacar que a formação do sistema radicular da touceira é resultado do desenvolvimento das raízes de cada perfilho.

O crescimento dos colmos tem início a partir do auge do perfilhamento, os colmos sobreviventes continuam o crescimento e desenvolvimento, ganhando altura e iniciando o acúmulo de açúcar na base. O crescimento é estimulado por luz, umidade e calor. Durante essa fase, as folhas mais velhas começam a ficar amareladas e secam. O canavial pode atingir altura acima de três metros, com a população final de colmos, variando em função das condições de clima e solo.

A maturação inicia-se junto com o crescimento intenso dos colmos sobreviventes do perfilhamento das touceiras. No período entre o outono e o inverno, com a presença de chuvas variáveis e temperaturas mais baixas, existe maior atividade de maturação e menor atividade de crescimento, sendo que há intenso armazenamento de açúcar.

Finalmente tem-se o momento de colheita que é definido em função da variedade, época de plantio e consequente duração do ciclo, manejo da maturação e condições climáticas no ambiente.

#### 4.1.1 O plantio da cana-de-açúcar

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 (JANINI, 2007). A importância das operações iniciais exige bom planejamento e muito conhecimento técnico. As tomadas de decisões nessa fase são importantes e vão influenciar todo o ciclo da cultura (COLETI; STUPELLO, 2006).

Devido a cana-de-açúcar ser uma cultura semiperene, sua implantação envolve uma série de cuidados. Para que a colheita, principalmente a mecanizada, 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 12 meses. A colheita é realizada no ano subsequente ao plantio. 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; SCHOUGHANA, 1984).

#### 4.1.2 A colheita da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar de ano e meio (18 meses), plantada de janeiro ao início de abril, 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 (12 meses), plantada entre setembro e outubro, 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, 2009) e (PICOLI et al., 2013).

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 ano e meio, quando comparadas com as canas de ano, uma vez que permanecem um tempo mais longo no campo. As canas-de-açúcar plantadas na modalidade cana-de-açúcar de ano, quando comparadas à produtividade das canas-de-açúcar de ano e meio, apresentam produtividades

semelhantes ao estágio de segundo corte das canas-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. Com o aumento do número de estágios de corte ocorre uma perda gradativa na produtividade agrícola (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).

Em todos os estágios descritos acima, seja qual for o corte a ser realizado, a colheita da cana-de-açúcar deve ser feita quando ela atingir a maturidade. Na região sudeste do Brasil, o processo de maturação da cana-de-açúcar ocorre naturalmente a partir de abril/maio, atingindo seu pico máximo no mês de setembro. 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) e (CARDOZO; SENTELHAS, 2013). A cana-de-açúcar é colhida de abril a dezembro, nos diferentes ambientes de produção da região Centro-Sul do Brasil (SILVA et al., 2008).

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 (HOFSETZ; SILVA, 2012).

#### 4.1.3 Variedades de cana-de-açúcar

As variedades de cana-de-açúcar são classificadas como precoces, quando apresentam um teor da Pol acima de 13% no início de maio, médias, quando atingem a maturação em Julho, e tardias, quando o pico de maturação ocorre em agosto/setembro, supondo uma mesma data de plantio ou corte para essas variedades (HORII, 2004).

As diversas variedades plantadas além de responderem de forma diferenciada as influências naturais, também proporcionam respostas diferentes em relação

à produtividade quando colhidas em períodos diferentes, durante a mesma época de colheita (MENDONÇA, 1983).

Essa afirmação é comprovada em trabalho realizado por Mendonça et al. (1984) que estudando diferentes épocas de corte da cana-de-açúcar, onde foram comparadas as curvas de ganho de massa verde e sacarose ao longo do ano em 19 variedades em oito diferentes épocas e em duas safras, Os autores observaram importantes diferenças tanto entre variedades quanto entre épocas de corte, apontando comportamentos contrastantes entre variedades floríferas e não floríferas e grandes e fracas produtoras de colmos, com reflexos nas reais curvas de ganho de sacarose por unidade de área. Esse trabalho ressalta ainda a importância de avaliar pontos ótimos de colheita sempre de maneira relativa, considerando o conjunto de variedades disponíveis na lavoura e não apenas curvas isoladas de maturação.

Mendonça et al. (1984), citam também que, quando a variedade se destaca tanto pela sua riqueza em sacarose quanto por sua produção agrícola e não floresce, sua curva de Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) mostra sua real maturação do ponto de vista prático. Se florescer, entretanto, deve haver uma antecipação de sua colheita em relação a seu pico de ATR por um período variável em cada caso, não sendo, entretanto necessário colher tão logo ocorra o florescimento. Toda medida que vise à liberação de talhões para corte deve ser baseada na comparação conjunta de todas as variedades de cana-de-açúcar disponíveis para essa finalidade, avaliadas tanto para seu conteúdo de sacarose como para sua tonelagem de colmos por unidade de área e não na observação de curvas isoladas de maturação.

Scarpari e Beauclair (2004) e Beauclair e Penteadó (1984) asseguram que o procedimento usual para determinar a época ideal de corte para as áreas cultivadas, consiste inicialmente na seleção de áreas a serem amostradas para análise tecnológica, nas quais os parâmetros de maturação são considerados. Em seguida escolhem-se para o corte, os locais com os maiores valores de açúcar teoricamente recuperável (ATR). Eles também consideram que a maior preocupação é a consequência da época de corte sobre a produtividade da cana-de-açúcar na safra seguinte, sendo, para o cronograma de corte, considerado o dimensionamento da frota, bem como as variedades, idade, estágio, solo, clima, adubação, tratamentos culturais, entre outros.

A escolha da variedade de cana-de-açúcar é a tecnologia mais importante e de menor custo para o produtor, sendo à base de todas as demais tecnologias

de produção e processamento da matéria-prima (NUNES JÚNIOR; SCHOUCHANA, 1984). As variedades assumem papel decisivo na produtividade da cultura e, por conseguinte, possibilitam produzir cana-de-açúcar de qualidade e com menor custo. As variedades devem apresentar características desejáveis como alta produtividade, alto teor de açúcar, rebrota, ausência de tombamento e resistência a pragas e doenças (SILVEIRA et al., 2002). Na Tabela 1 são apresentadas algumas das variedades mais plantadas no Centro-Sul do Brasil.

Tabela 1. Produtividade em toneladas de cana-de-açúcar por hectare (TCH), Pol e Fibra das variedades mais plantadas na região Centro-Sul do Brasil (PECEGE, 2011).

Variedade	Produtividade em toneladas de cana-de-açúcar por hectare (TCH) <sup>1</sup>	Pol <sup>2</sup>	Fibra <sup>3</sup>
SP 83 2847	117,95	14,5	13,0
SP 81 32 50	118,05	14,7	15,0
RB 86 7515	121,77	15,1	12,7
RB 85 5156	138,96	16,0	12,3
RB 85 5443	120,90	15,4	12,8
RB 96 6928	150,82	15,5	12,7

1. Os valores da produtividade são uma média referente ao primeiro corte.
2. A Pol é dada em porcentagem.
3. A Fibra é dada em porcentagem.

De acordo com Lavanholi (2008), a “cana-padrão”, em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial, deve apresentar o teor de sacarose (Pol%cana) de 12,257%. Do ponto de vista tecnológico, a fibra compreende todas as substâncias insolúveis em água contidas na matéria-prima e sua importância está relacionada à colheita mecanizada da cana-de-açúcar, com implicações no porte ereto e no menor tombamento das plantas, e a industrialização, com impactos na moagem e no balanço térmico da fábrica. Os níveis de fibra, em uma cana-de-açúcar padrão, devem oscilar de 8 a 14% (LAVANHOLI, 2008) e (LANDERS, 2007).

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; PENTEADO, 1984) e

(SEGALLA et al., 1981). A Figura 1 ilustra a curva de maturação de uma cana-de-açúcar padrão.

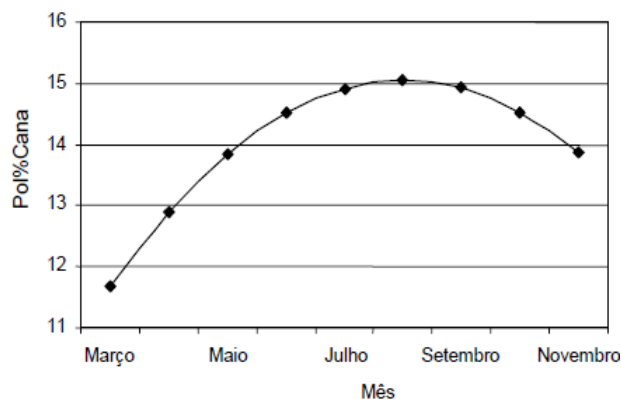


Figura 1. Curva de maturação de uma cana-de-açúcar padrão (SACHS, 2007).

Os Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) são um dos 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.

Existe um ponto máximo em que a fase de acúmulo de energia está completa, mas ainda não se iniciou a fase reprodutiva. Este ponto da POL máximo corresponde à época ideal para a colheita da cana-de-açúcar, especialmente em termos de eficiência de rendimento da matéria prima na produção de açúcar (HIGGINS et al., 1998).

Apesar da melhor época para a colheita ser a data da POL máximo, torna-se impraticável efetuar a colheita completa das áreas das unidades agrícolas pertencente a usina nesta data. Dessa maneira, deve-se realizar a colheita num período próximo ao ponto da POL máximo (HIGGINS et al., 1998) e (HIGGINS, 1999).

Nos próximos tópicos discute-se algumas técnicas matemáticas que podem auxiliar nas tomadas de decisões e em otimizações de processos na área sucroalcooleira.

#### 4.2 Técnicas de otimização

Segundo Bassanezi (2006) é possível transformar problemas reais em modelos matemáticos e utilizar processos computacionais para obter soluções válidas destes modelos, as quais auxiliam na resolução dos problemas reais. Outros autores, também discutem a possibilidade de construir um sistema na linguagem matemática, mediante simplificações deste sistema (ENGEL, 1984) e (BUNGE, 1974).

A metodologia proposta por Bassanezi e Ferreira Junior (1988), aborda inicialmente o estudo de problemas e situações reais, buscando um tema de grande relevância. A partir desse estudo, o processo matemático é usado como linguagem para compreensão, simplificação e resolução desse sistema complexo, por meio da devida escolha das variáveis e suas relações. Em seguida inicia-se a formulação de hipóteses ou “leis”, baseadas em conhecimentos de fenômenos análogos anteriores, visando tomadas de decisões com relação ao problema levantado, entendendo-se da melhor maneira possível o fenômeno estudado.

A substituição da linguagem natural, por uma linguagem matemática específica e seu estudo, depende da complexidade do problema. Se os argumentos matemáticos conhecidos não são eficientes, podem ser criados novos processos matemáticos, ou reformular os já existentes. A próxima fase consiste na investigação de métodos matemáticos e computacionais para resolução do problema. As dificuldades destes métodos dependem da complexidade matemática e/ou numérica do problema. Para aceitação ou negação do processo de otimização, existe a fase da simulação computacional, que consiste na realização de várias implementações para a averiguação do comportamento apresentado (BASSANEZI; FERREIRA JUNIOR, 1988).

O grau de aproximação desejado será o fator preponderante na decisão, e o principal obstáculo para a aceitação de um processo de otimização é sua praticidade. Ele deve envolver novos resultados práticos e justificar as hipóteses ou intuições. A busca do aperfeiçoamento é o que dinamiza o processo (ENGEL, 1984).

Após a aceitação do processo de otimização, ele está pronto para ser aplicado na situação real, para fazer previsões, tomar decisões, explicar e entender o fenômeno numa linguagem universal, enfim, participar com capacidade de influenciar com mudanças (BASSANEZI; FERREIRA JUNIOR, 1988) e (TSUJI, UEHARA E BALAS, 1994).

Muitos dos modelos matemáticos de otimização formulados apresentam uma alta complexidade computacional e necessitam de técnicas heurísticas para resolução. A seguir são discutidas estas técnicas.

#### 4.2.1 Métodos Heurísticos

Para atingir o conceito que engloba as heurísticas de otimização, é necessário abordar os problemas de otimização combinatória. Estes problemas são pertencentes à área de Pesquisa Operacional (PO) para os quais o espaço de soluções possíveis é finito e discreto e busca-se dentro desse espaço a solução ótima para o problema (REEVES; BEASLEY, 1993).

Os problemas de otimização discreta com  $n$  variáveis e que apresentam  $2^n$  possibilidades de soluções podem apresentar dificuldade ou até mesmo impossibilidade de determinação da solução ótima, visto que para um  $n$  pequeno o problema é de fácil solução, mas para um  $n$  grande o problema pode se tornar incalculável ou gerando uma complexidade computacional extremamente grande.

A complexidade computacional de um problema está relacionada ao custo de execução de um algoritmo. Quando existe um algoritmo polinomial que resolve o problema, determinando uma solução ótima, esse problema pertence à classe P (polinomial). Porém quando ainda não foi encontrado um algoritmo polinomial para solucionar o problema, ele pertence à classe NP-difícil o que significa que possui ordem de complexidade exponencial (CUNHA, 1997). Em termos práticos, isto significa que não é possível obter soluções ótimas para problemas reais de grande porte pertencentes à classe NP-difícil em um tempo finito (CUNHA, 1997).

Devido à dificuldade em encontrar uma solução ótima, conforme a situação anterior, e sabendo-se que na prática uma boa solução não fica tão aquém da solução ótima, as pesquisas atuais voltam seus esforços para os métodos de otimização não determinísticos conhecidos como heurísticos (MICHALEWICZ; FOGEL, 2000). Esses métodos apresentam boas soluções para problemas de alta complexidade, graças ao desenvolvimento computacional que permite a execução de milhares de cálculos por segundo (DUARTE; COELHO, 2002).

Um método heurístico tem como ponto de partida uma solução viável, ou seja, esse método não é aplicado para obter a solução ótima, ele baseia-se em



sucessivas aproximações direcionadas a um ponto ótimo. Logo, estes métodos costumam encontrar as melhores soluções possíveis para problemas, e não soluções exatas, perfeitas, definitivas (COLIN, 2007).

Os métodos heurísticos fazem busca contínua e empírica, com vários ótimos locais, cujo resultado é o melhor que se pode encontrar sob determinadas condições.

Segundo os trabalhos de Bernardino (2008), as heurísticas são algoritmos baseados em duas etapas distintas: construção e refinamento. Na fase da construção da heurística o objetivo é obter uma solução, elemento por elemento. A forma de escolha de cada elemento a ser inserido a cada passo varia de acordo com a função de avaliação adotada, a qual, por sua vez, depende do problema abordado. Outra possibilidade na escolha de cada elemento a ser inserido é fazer uma construção aleatória, isto é, a escolha de cada elemento será feita de maneira arbitrária. A fase de refinamento consiste em encontrar, a cada interação, uma solução que melhore a solução atual, através de uma busca realizada em sua vizinhança. O ponto inicial é construído por um método aleatório e essa solução é melhorada através de operações de troca, remoção ou inserção até que a melhora não seja mais possível (COLIN, 2007).

Os variados tipos de heurísticas existentes têm apresentado excelente desempenho na resolução de problemas de otimização, muitas apresentam estruturadas bastante avançadas para exploração da região de busca de soluções, estas são classificadas como Meta-heurísticas (DEB, 2001).

#### 4.2.2 Meta-heurística

Uma meta-heurística pode ser compreendida como uma ferramenta algorítmica geral que pode ser aplicada a diferentes problemas de otimização, com modificações relativamente pequenas para torná-la adaptável a um problema específico (METAHEURISTICS NETWORK, 2013) e (ALIANO FILHO, 2012).

Meta-heurística pode ser definida também como uma estratégia de busca, não específica para um determinado problema, que tenta explorar eficientemente o espaço das soluções viáveis desse problema. São algoritmos aproximados que incorporam mecanismos para evitar confinamento em mínimos ou máximos locais. Conhecimentos específicos do problema podem ser utilizados na forma de heurística para auxiliar no processo de busca (METAHEURISTICS NETWORK, 2013).

Segundo Blum e Roli (2003), uma característica que pode ser usada para a classificação de uma meta-heurística é o número de soluções usadas ao mesmo tempo. Existem algoritmos que trabalham com uma única solução, ou algoritmos não-populacionais, sendo métodos que descrevem uma trajetória no espaço de busca, durante sua execução. Assim, a exploração do espaço de soluções é feita por meio de movimentos, os quais são aplicados a cada passo sobre a solução corrente, gerando outra solução promissora em sua vizinhança.

Existem também as meta-heurísticas baseadas em população que executam um processo de busca que descrevem a evolução de um conjunto de soluções no espaço de busca. Nesse conjunto de meta-heurísticas encontra-se o Algoritmo Genético (AG), um algoritmo populacional inspirado na evolução natural das espécies (DEB, 2001), como descrito seguir.

#### 4.2.2.1 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).

Segundo Goldberg (1989), indivíduos ou cromossomos são estruturas computacionais que representam uma solução do problema. Os cromossomos são formados por caracteres que representam informações relativas às variáveis do problema. O gene é a unidade fundamental do cromossomo. A população corresponde ao conjunto de cromossomos ou indivíduos. A interação em que o AG está sendo executado é chamada de Geração. Aptidão ou *fitness* é a informação numérica de cada cromossomo na população. Um exemplo de cromossomo com cadeia binária de comprimento fixo pode ser observado na Figura 2;

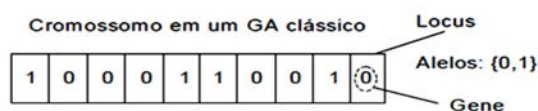


Figura 2. Cromossomo de cadeia binária (CASTRO, 2013).

O pioneiro a trabalhar com Algoritmos Genéticos foi John Holland na década de 70 ao perceber que a estrutura biológica natural poderia ser expressa matematicamente e simulada computacionalmente.

Coelho (2003) afirma que estas estruturas de condição permitem contornar inconvenientes 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.

Sendo assim, o AG constitui um método de busca de propósito geral que apresenta um balanço notável entre aproveitamento das melhores soluções encontradas e exploração do espaço de busca (GOLDBERG, 1989).

Na inicialização deve-se definir o número de gerações a ser utilizada e o número de indivíduos da população ( $N$ ). Posteriormente gera-se a população inicial com  $N$  indivíduos, que pode ser através do uso de funções aleatórias ou de forma construtiva. Cada um dos indivíduos da população representa uma possível solução para o problema, ou seja, um ponto no espaço de soluções. A construção desses indivíduos visa garantir a biodiversidade genética, fator crucial para uma boa abrangência do espaço de soluções.

A escolha do tamanho  $N$  da população é muito importante, pois segundo Lacerda e Carvalho (2013), uma população com poucos elementos estabiliza-se muito facilmente perdendo a diversidade necessária para convergir para um ótimo global. Por outro lado, populações com muitos cromossomos perderão sua eficiência computacional consideravelmente.

A avaliação de cada indivíduo da população é realizada para que possa ser medido o seu grau de adaptabilidade no meio. A avaliação é feita através de uma função que melhor representa o problema e tem por objetivo fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo na população corrente, esse procedimento irá dirigir o processo de busca

(FLORENTINO; PATO, 2013). A aptidão de cada indivíduo pode ser medida a partir do valor da função objetivo, podendo haver penalizações neste valor caso a solução seja infactível, ou seja, não satisfaça alguma restrição apresentada pelo problema.

O operador de seleção é um componente essencial nos algoritmos genéticos (RAZALI; GERAGHTY, 2011). Nesta etapa uma porcentagem dos indivíduos é selecionada para realizar o cruzamento. A literatura identifica cinco principais mecanismos de seleção: proporcional, por torneios, com truncamento, por normalização linear e por normalização exponencial (BLICKLE, 1996). O mecanismo proporcional é bastante utilizado e se baseia na aptidão. Os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para a reprodução (PACHECO, 2013).

A seleção pelo método da roleta é um mecanismo proporcional que apresenta bom desempenho para vários problemas. Neste método, cada indivíduo é representado por uma fatia proporcional a sua aptidão relativa em uma roleta. Com isso os indivíduos com elevada aptidão receberão um intervalo maior na roleta, enquanto aqueles que têm mais baixa aptidão receberão menor intervalo na roleta. Considere um círculo, como na Figura 4, dividido em  $N$  regiões (tamanho da população), onde a área de cada região é proporcional à aptidão do indivíduo, então coloca-se sobre este círculo uma "roleta" com  $j$  cursores, igualmente espaçados; após um giro da roleta a posição dos cursores indica os indivíduos selecionados. Este método é denominado amostragem universal estocástica. Evidentemente, os indivíduos cujas regiões possuem maior área terão maior probabilidade de serem selecionados (RODRIGUES et al., 2004). A Figura 4 ilustra uma roleta para uma população de cinco indivíduos.

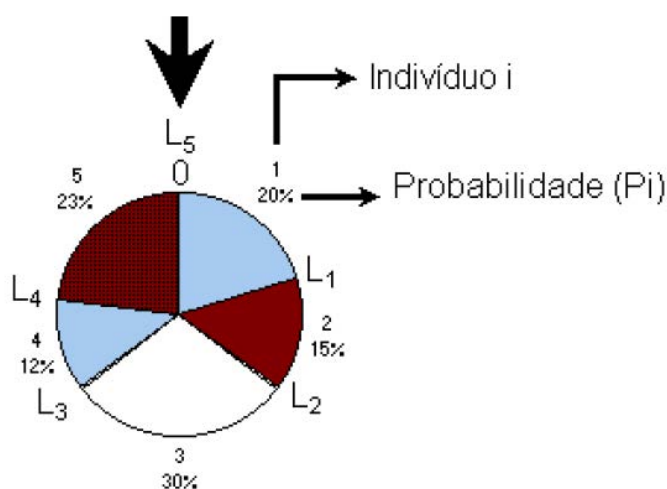


Figura 3. Roleta-russa para uma população ( $N$ ) de cinco indivíduos do AG (RODRIGUES et al., 2004).

Os indivíduos selecionados são guardados em uma população intermediária e recombinados através do operador *crossover*. O operador *crossover* é considerado a característica fundamental dos AGs. Pares de genitores são escolhidos aleatoriamente da população intermediária e novos indivíduos são criados a partir da troca do material genético destes. Os descendentes serão diferentes de seus pais, mas com características genéticas de ambos os genitores (PACHECO, 2013).

Há vários tipos de *crossover*, no entanto os quatro mais conhecidos são: *crossover* de um-ponto, *crossover* de dois-pontos, *crossover* de  $p$ -pontos e *crossover* uniforme (LIVRAMENTO, 2004). No *crossover* de um ponto, o cromossomo dos pais, com  $m$  genes, têm um ponto de corte  $k$  escolhido aleatoriamente e cada filho será composto pelo prefixo de tamanho  $k$  de um pai e do sufixo de tamanho  $m-k$  da mãe como na Figura 5. O *crossover* de dois pontos é semelhante ao *crossover* de um ponto, no entanto, duas posições são selecionadas e apenas os genes que estão entre essas posições são trocados. No *crossover* de  $p$  pontos o diferencial em relação aos métodos anteriores é que  $p$  posições são selecionadas e apenas os genes localizados entre as posições ímpares e pares são trocados.

Entre os diferentes tipos de *crossover* presentes na literatura apresenta-se o *crossover* de um ponto que devido a sua simplicidade é o modo mais comum presente nos algoritmos. Para aplicá-lo, os pais são pareados utilizando uma metodologia *mating* e dois filhos são obtidos. Cada um dos cromossomos pais tem sua cadeia de bits cortada em uma posição aleatória, produzindo duas “cabeças” e duas “caudas”. As caudas são trocadas, gerando dois filhos. Na Figura 5 apresenta-se um *crossover* de um ponto

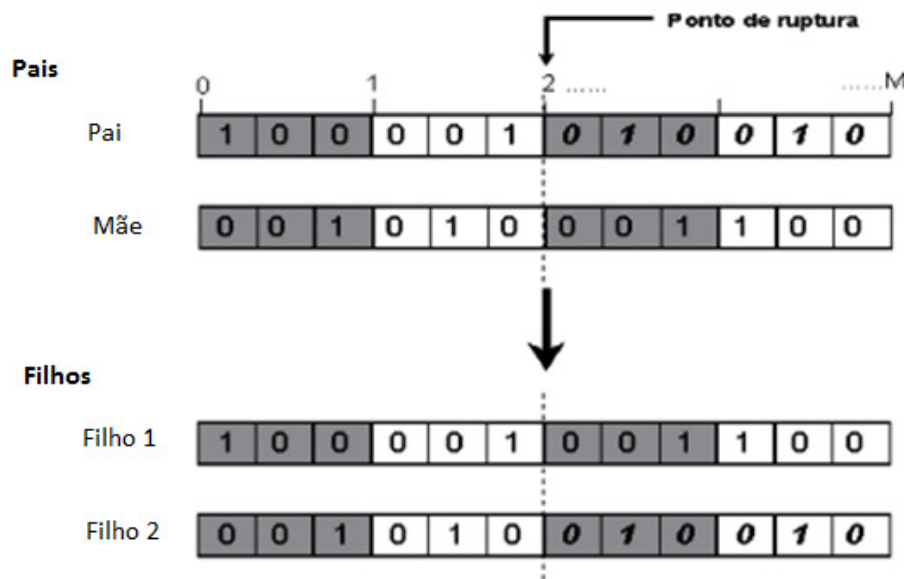


Figura 4. *Crossover* de um ponto (RODRIGUES et al., 2004).

Após a aplicação do *crossover*, o indivíduo ainda pode sofrer uma ou mais mutações. O objetivo da mutação é aumentar a diversidade na população. O operador de mutação troca o conteúdo de uma posição do cromossomo (alelo ou valor do gene), com uma determinada probabilidade, em geral baixa, normalmente entre 1 a 5% (PACHECO, 2013). A Figura 6 representa um esquema de mutação pontual, onde após escolhido o cromossomo e os seus genes a serem mutados, os valores de seus alelos foram invertidos de um para zero e vice-versa.

O operador de mutação pode, entretanto, alterar a condição de viabilidade dos cromossomos. A Figura 6 ilustra dois problemas com a operação de mutação. Considerando dois casos de restrição: na área de manejo do cromossomo algum gene deve ser não nulo e que não pode ocorrer mais de um gene com valor igual um. No primeiro caso, após a mutação do cromossomo um, todos os genes (isto é, as variáveis de decisão) da unidade de manejo dois (cromossomo 2) possuem valores nulos. O segundo caso ocorre quando mais de um gene é assinalado com valor igual a um em uma mesma unidade de manejo, conforme pode ser visto na unidade de manejo três do cromossomo dois. Assim, ao desejar o assinalamento de exatamente uma alternativa de manejo (gene) em cada unidade de manejo e evitar a geração de cromossomos inviáveis, segundo a restrição de singularidade, torna-se necessário corrigir o problema. Tal correção é feita através de uma operação pós-mutação. Esta operação foi efetuada de duas formas distintas: (i) se as variáveis de decisão de uma dada unidade de manejo forem todas nulas, uma nova variável,

diferente daquela selecionada para ser mutada, é escolhida aleatoriamente para receber valor um, o que garante o assinalamento de exatamente uma variável em cada unidade de manejo; (ii) no caso de duas variáveis receberem valores iguais a um (1) (violação da restrição de singularidade), a variável que receberá valor igual a zero (0) é aquela que possuía valor igual a um antes da mutação. O cromossomo 3 da Figura 6 apresenta a operação pós-mutação para corrigir estes dois problemas (RODRIGUES et al., 2004).



Figura 5. Mutação e pós-mutação para obtenção de cromossomos viáveis. (RODRIGUES et al., 2004).

O operador de mutação é responsável pela exploração global do espaço de busca introduzindo novo material genético em indivíduos já existentes. O método busca manter um nível mínimo de abrangência na busca e impedir a convergência prematura do método, principalmente quando a população se estabiliza devido à baixa diversidade e à pressão seletiva (GOLDBERG, 1989).

Alguns AGs trabalham com elitismo, a função do elitismo é reter certo número de "melhores" indivíduos em cada geração. Caso isso não ocorra tais indivíduos podem ser perdidos se eles forem selecionados para reprodução ou se eles forem destruídos por cruzamento ou mutação (De JONG, 1975).

São duas as etapas que constituem o Elitismo, segundo De Jong, (1975). A primeira consiste em selecionar uma elite de membros entre os melhores da população inicial, os quais poderão ser incorporados diretamente na população final, sem passar pela população auxiliar. A segunda etapa é selecionar a população auxiliar entre os membros restantes da população inicial.

Este processo força a cópia do melhor cromossomo de cada geração na geração seguinte, reduz o efeito aleatório do processo seletivo, garantindo a presença do melhor membro de uma população na próxima geração.

A escolha dos parâmetros genéticos que controlam o processo evolutivo do AG podem ser divididos em qualitativos e quantitativos (LACERDA; CARVALHO, 2013).

Dentre os parâmetros qualitativos tem-se o tamanho populacional, a taxa de cruzamento, mutação e migração. Já os parâmetros quantitativos englobam o pareamento dos cromossomos (*matting*), tipo de cruzamento, tipo de seleção, mutação e migração.

Uma boa escolha dos parâmetros permite ao algoritmo uma convergência rápida e segura. Essa escolha é muito particular e depende da complexidade e dimensão de cada problema.

Quando se analisa a convergência de um AG, podem surgir dois problemas: a convergência prematura que ocorre devido à população ser finita, às vezes indivíduos de alta aptidão (mas não de aptidão ótima) levam o AG a convergir para um ponto ótimo local e não global; o outro problema diz respeito à lenta convergência que ocorre quando a aptidão dos melhores indivíduos é próxima da média da população (costuma ocorrer perto do fim do algoritmo). Este problema, muitas vezes, pode ser melhorado com o uso de migração, em que novos indivíduos são criados e introduzidos na população.

Pacheco (2013) afirma que uma forma de amenizar ambos os problemas é modificando o modo de seleção de indivíduos para a reprodução. Quanto maior for a taxa de cruzamento, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população, mas corre-se o risco de estruturas com boas aptidões serem retiradas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores estruturas. Com um valor baixo desta taxa, o algoritmo pode se tornar lento ou estagnar. Em geral usa-se uma taxa de 80%.

Quanto a taxa de mutação, Constantino et al. (2003) recomendam que a taxa de mutação utilizada seja baixa, algo entre 1 a 5 %. Esse cuidado permite que qualquer ponto do espaço de busca possa ser atingido e previne que a busca se torne essencialmente aleatória. O autor ainda afirma que é possível utilizar uma taxa de mutação variável que aumenta de acordo com a convergência da população. Deste modo, com o passar das gerações, a ocorrência da mutação é maior.



É muito importante a elaboração do critério de parada, pois em todo problema de otimização, o ideal seria que o algoritmo AG terminasse assim que a solução ótima fosse encontrada. Mas na maioria dos casos de interesse, não se pode afirmar com certeza se uma dada solução corresponde a um ótimo global. Assim, o critério de parada mais utilizado é o número de gerações previamente estabelecido. Outras metodologias baseadas no próprio acompanhamento do processo evolutivo preconizam que se não houver melhoria na média da população depois de um número predefinido de gerações, o processo evolutivo finaliza (PACHECO, 2013).

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Descrição do Problema

Dada uma área agrícola com  $k$  talhões em que estão plantadas  $V$  variedades de cana-de-açúcar sendo uma variedade por talhão. Sabendo-se conhecida cada variedade  $v$  que está plantada no talhão  $j$  e sua data de plantio, 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, potencial de processamento da cana-de-açúcar e demanda impostas pela usina. Ou seja, deseja-se determinar qual o mês  $t$  do ano  $y$  que haverá o  $i$ -ésimo 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.

Para auxiliar o entendimento da metodologia a ser apresentada, a Tabela 2 exemplifica um histórico da cana-de-açúcar plantada em cinco talhões e a Tabela 3 ilustra um planejamento para quatro anos da colheita da cana-de-açúcar plantada nestes talhões, a partir dos dados contidos na Tabela 2. A Tabela 2 mostra, na linha 1 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 o número de corte que já houve no canavial de cada talhão e na linha 5 mostra o mês do ano que ocorreu o último plantio ou corte. Com isto sabe-se, por exemplo, que o talhão cinco está plantado com a variedade CTC6, com previsão de replantio da variedade CTC2 e sabe-se que foi efetuado o quarto corte no mês de agosto do ano corrente. Portanto este deverá ser replantado e como a colheita

foi feita no mês de agosto, o replantio será feito em outubro, tendo disponibilidade de colheita em torno do mês 10, ou seja, outubro do ano seguinte.

Tabela 2. 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	SP83-5073	SP80-3280	CTC2	SP80-3280	CTC6
Variedade em caso de replantio		SP83-5073	CTC6		CTC2
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

\* Os números contidos nessa linha correspondem: 0 a cana-de-açúcar foi plantada no ano de planejamento, 1 a cana-de-açúcar está no primeiro corte, 2 está no segundo corte e assim sucessivamente.

\*\* Os números contidos nessa linha correspondem: 2 ao mês de fevereiro, 4 a abril, 8 a agosto e assim sucessivamente.

A Tabela 3 exemplifica um planejamento para colheita considerando o histórico apresentado para a cana-de-açúcar plantada em cada um dos talhões apresentados na Tabela 2. Seguindo o exemplo do talhão 5, as colheitas estão previstas para os meses 9, 10, 12 e 12 (setembro, outubro, dezembro e dezembro) consecutivamente para os quatro próximos anos.

Tabela 3. Planejamento para os quatro anos de colheita da cana-de-açúcar plantada na área agrícola apresentada na Tabela 2.

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 representa os meses de maio a dezembro.

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 ano, como definida anteriormente, deve ser colhida com a idade de 12 mais ou menos dois meses e no caso da cana de ano e meio, 18 mais ou menos dois meses. 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 capacidades da usina quanto à moagem, fibra e demanda da POL.

Para um planejamento otimizado da colheita deve-se observar o período de máxima produtividade de sacarose e produção de cana-de-açúcar, o qual ocorre no período de 12 meses após o plantio da cana-de-açúcar de ano e 18 meses para a cana-de-açúcar de ano e meio. Nos cortes seguintes a máxima produtividade de sacarose e produção de cana-de-açúcar 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 e a produtividade da cana-de-açúcar dependentes da variedade, idade da cana-de-açúcar e o do número de cortes sofridos.

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.  $M_{jca}$  representa a produtividade de cana-de-açúcar, em tonelada por hectare no  $c$ -ésimo corte, 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 também depende da variedade, idade da cana-de-açúcar e do 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 da POL da usina é dada em toneladas de sacarose por mês.

Propõe-se o uso de um algoritmo genético para auxílio no planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar visando à máxima produção de sacarose ou produção de açúcar, o qual está apresentado a seguir.

## 5.2 Algoritmo genético

O algoritmo consiste em:

**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*, mutação e obtenção da nova população;

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

**Passo 6)** Fim.

Na Figura 6 apresenta-se a estrutura do AG proposto:

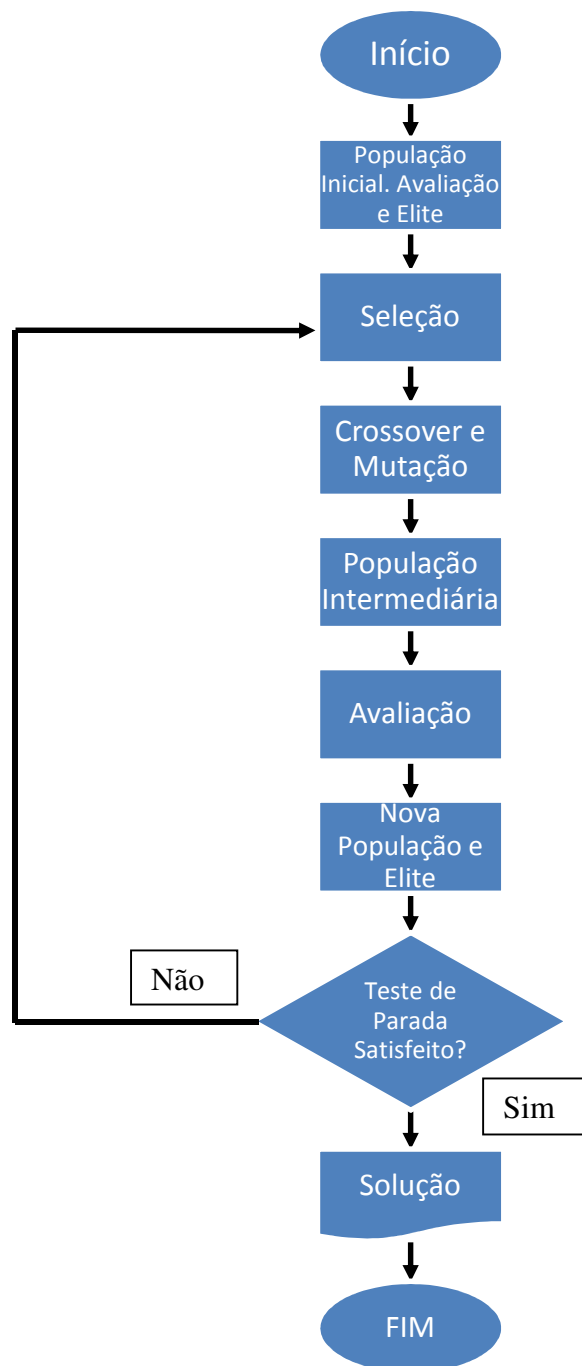


Figura 6. Estrutura do AG proposto.

## 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 de quatro a doze (de abril a dezembro), representando o mês  $t$  do ano de planejamento  $i$  no qual ocorrerá a colheita da cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$ . Quando houver replantio de cana-de-açúcar de ano e meio, no ano  $i$  em um talhão  $j$  faz-se  $t_{ij} = 0$ , pois nesse caso não haverá colheita nesse ano. A Figura 7 apresenta a estrutura desse indivíduo, representando 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 7. 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, propõe-se que a população inicial seja gerada aleatoriamente, construindo-se  $N$  indivíduos como na Figura 7. Esses indivíduos devem ser gerados em concordância com o histórico da cana-de-açúcar, como exemplificado na Tabela 2.

### 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:

Quanto à produção da Pol:

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

onde  $T_n$  é uma penalidade sofrida pelo indivíduo  $n$  relacionada a Pol.

Quanto à produção de cana-de-açúcar:

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

onde  $U_n$  é uma 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 acumulados no ano  $i$  e talhão  $j$ .

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

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

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

$t_{0j}$  = valor informador do 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.  $P_{c_j a_{ij}}$  é a produtividade da 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  $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 P_{c_j a_{ij}} L_j$  estima a produção de sacarose para cada indivíduo.  $R_n$  é o *fitness* do indivíduo  $n$  em  $t.ha^{-1}$ , relacionado a produção de cana-de-açúcar.  $M_{c_j a_{ij}}$  é a produtividade de cana-de-açúcar plantada no talhão  $j$  e colhida

no  $i$ -ésimo ano, com idade  $a_{ij}$  meses. O somatório  $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 M_{ji a_{ij}} L_j$  estima a produção de cana-de-açúcar para cada indivíduo. A penalidade, quanto a Pol, será  $T_n = 0$  se a solução apresentada pelo indivíduo  $n$  respeita todas as restrições apresentadas pela usina (indivíduo factível) e  $T_n = \alpha \left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 P_{j c_{ij} a_{ij}} L_j \right)$  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  $m$  respeita todas as restrições apresentadas pela usina (indivíduo factível) e  $U_n = \alpha \left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^4 R_{j c_{ij} a_{ij}} L_j \right)$  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:

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

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  $i$  é denotada por  $D_i$ . A quantidade de açúcar fermentescível gerada pelo indivíduo  $n$  no mês  $i$  é denota por  $D_i^n$  e calculado na forma:

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

Se  $D_i^n \geq D_i$  para todo  $i$ , então o indivíduo  $n$  é factíveis com relação à demanda de açúcar fermentescível e caso contrário ocorrerá à penalização.

Sejam  $CM$  a capacidade de moagem da usina e  $Prod$  a produção da cana-de-açúcar. A quantidade de cana-de-açúcar produzida no mês  $i$  pelo indivíduo  $n$ , denotado por  $C_i^n$ , é calculada pela equação:

$$C_i^n = \sum_{j=1}^k Prod_{j c_{ij} a_{ij}} L_j \quad i = 1, \dots, 4 \quad n = 1, \dots, N.$$



Se  $C_i^n \leq CM$  o indivíduo é factível com relação à capacidade de moagem da usina e caso contrário o indivíduo  $n$  é infactível.

O indivíduo  $n$  é factíveis 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.

Para o operador seleção foi proposto o método da roleta, onde os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para a reprodução. Oitenta por cento dos indivíduos da população foram escolhidos para fazerem parte de uma população intermediária.

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 8, 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. A Figura 8 ilustra este *crossover*:

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 8. 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.

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 9. 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.

Para a mutação, propõe-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 o número sorteado para um dado indivíduo for inferior a  $pm$  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 10:

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 10. 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 11:

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 11. Indivíduo mutado.

Portanto a nova população composta de  $MP$  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, volte ao passo 3;

**Passo 6: Fim**

Para a implementação do AG como descrito, utilizou-se o software Matlab (versão 7.4.0 R2007a), instalado em micro-computadores Core 2 Quad com 2GB de memória e 250 GB de disco rígido do Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta para o planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar em diferentes áreas agrícolas.

Para aplicação da metodologia, o processo matemático de otimização foi construído utilizando o método AG para planejar o agendamento da colheita da cana-de-açúcar de uma unidade agrícola pertencente a 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 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.

Para as instâncias aleatórias foram utilizados dados para a produtividade de variedades de cana-de-açúcar, no primeiro corte, gerados aleatoriamente com base nos valores apresentados na literatura. Os dados obtidos aleatoriamente estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados aleatórios das variedades utilizadas para aplicação da metodologia.

i. Variedade	Produtividade (t.ha <sup>-1</sup> )	Pol (%)	Fibra (%)
1. variedade 1	182,63	14,78	12,44
2. variedade 2	120,00	15,00	11,80
3. variedade 3	192,03	13,99	12,93
4. variedade 4	150,00	13,33	12,38
5. variedade 5	196,36	14,16	12,93
6. variedade 6	180,86	14,74	12,91
7. variedade 7	180,01	14,99	12,38
8. variedade 8	133,70	15,33	11,42
9. variedade 9	143,50	14,63	12,44
10. variedade 10	123,50	14,33	12,55

Na Tabela 5 são apresentados os dados reais de dezoito variedades pertencente a uma unidade agrícola da usina de cana-de-açúcar situada na região Centro-Oeste do Estado de São Paulo.

Tabela 5. Dados reais das variedades utilizadas para aplicação da metodologia

i. Variedade	Produtividade (t.ha <sup>-1</sup> )	Pol (%)	Fibra (%)
1. CTC 15	132,80	14,50	12,36
2. CTC 9	100,00	15,84	12,34
3. RB925211	89,29	14,67	12,30
4. CTC 6	136,00	14,98	11,16
5. RB855156	117,80	14,50	12,41
6. CTC 2	129,10	14,31	12,21
7. RB857515	148,20	14,82	11,47
8. SP80-1842	112,80	14,90	12,90
9. SP83-2847	126,70	13,20	12,74
10. SP80-3280	121,70	14,80	11,30
11. RB928062	113,00	15,75	12,38
12. RB966928	123,10	13,32	11,97
13. CTC 20	165,00	13,50	11,50
14. CTC 17	112,30	14,98	12,38
15. SP81-3250	140,60	15,02	12,91
16. CTC 4	130,90	13,54	11,80
17. RB92579	142,40	15,70	12,93
18. RB855453	133,35	13,90	12,38

Os parâmetros necessários para a implementação do processo de otimização e que nortearam a construção do Algoritmo Genético para cada instância foram calibrados para cada instancia e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros utilizados para implementação do Algoritmo Genético.

Instâncias	Dados Variedades	Nº Talhões	G	N	E	Pc	Pm	$\alpha$	V
I50A	Aleatórios	50	200	200	10	0.8	0.05	0,6	10
I100A	Aleatórios	100	300	500	10	0.8	0.05	0,6	10
I200A	Aleatórios	200	500	500	10	0.8	0.05	0,6	10
I200	Reais	200	500	500	10	0.8	0.05	0,6	18
I500	Reais	500	500	500	10	0.8	0.05	0,6	18
I1000	Reais	1000	500	500	10	0.8	0.05	0,6	18
I1500	Reais	1500	500	500	10	0.8	0.05	0,6	18

Em que:

G é o número máximo de gerações;

N é o número de indivíduos da população;

E é o número de indivíduos armazenado na da elite a cada geração;

Pc é a taxa de *crossover*;

Pm é a taxa de mutação;

$\alpha$  é o valor utilizado no cálculo das restrições;

V é o número de variedades.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos dados de dimensões e capacidade das instâncias aleatórias.

Tabela 7. 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 8 apresenta um resumo dos dados de dimensões e capacidade das instâncias reais.

Tabela 8. 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.

Os históricos dos talhões estão apresentados nas Tabelas de 9, 11, 13 e 15. Na Tabela 9 são apresentadas as informações para a instância I50A de cinquenta talhões, na Tabela 11 para I100A com cem talhões, na Tabela 13 para I200A com duzentos talhões e na Tabela 15 para a instância real I200 com duzentos talhões. As Tabelas dos históricos das instâncias com 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, serão feitos os planejamentos da colheita da cana-de-açúcar em cada instância.

As Tabelas 10, 12, 14 e 16 apresentam os resultados do Algoritmo Genético para o planejamento da colheita da cana-de-açúcar plantada nos talhões descritos respectivamente nas Tabelas 9, 11, 13 e 15. A parte (a) dessas Tabelas apresentam o planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar quando o objetivo da usina é produzir açúcar. A parte (b) dessas Tabelas apresentam o planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar quando o objetivo é produzir a Pol. A presença do número zero nas Tabelas 10, 12, 14 e 16 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 quinhentos, mil e mil e quinhentos talhões foram suprimidas devido ao espaço ocupado.



Tabela 9. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos cinquenta talhões na instância I50A.

Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)
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) Variedade Existente.

(3) Variedade em caso de replantio.

(4) Estágio no ano de planejamento (1: 1º corte, 2: 2º 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).

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

Tabela 10. 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		

(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		

Tabela 11. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos cem talhões na instância I100A.

Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)
1	33	1		12	9	35	20	8	5	2	6	69	30	9	1	2	12
2	35	1	5	4	12	36	18	9	8	2	5	70	10	8		12	10
3	10	5	2	1	11	37	35	4	1	1	4	71	15	3	10	4	11
4	40	2	1	2	4	38	11	5	3	3	7	72	10	6		12	10
5	20	3	8	3	12	39	22	7	10	4	9	73	19	9	4	2	11
6	15	2	9	2	4	40	12	8	2	1	11	74	21	1	7	2	9
7	15	3	7	4	1	41	13	2		12	9	75	17	2	2	3	11
8	30	4	6	1	12	42	36	3	5	1	11	76	19	6	5	4	11
9	25	3		18	2	43	22	6	3	2	4	77	15	1	9	1	7
10	12	5	7	2	4	44	10	1	1	3	4	78	30	5		12	10
11	18	10		12	10	45	15	10	2	1	6	79	16	4		12	10
12	22	10		18	3	46	25	7	5	1	7	80	32	3	2	1	5
13	8	9	5	1	4	47	22	1		18	1	81	11	10	3	3	6
14	12	8	2	1	5	48	10	3	6	2	8	82	12	3	6	3	8
15	24	7	1	3	4	49	50	2	7	3	7	83	10	1	5	4	7
16	13	6	6	4	7	50	24	6	4	3	10	84	14	1		18	2
17	31	6		12	9	51	23	2		12	9	85	25	8	5	2	6
18	26	1	3	2	8	52	45	1	5	4	11	86	30	9	8	2	5
19	14	9	1	2	12	53	10	5	2	2	11	87	18	4	1	1	4
20	15	8		12	10	54	40	2	3	2	4	88	25	5	3	3	7
21	10	3	10	4	11	55	25	9	8	3	12	89	11	7	10	4	1
22	9	6		12	10	56	20	2	10	2	5	90	22	8	2	1	11
23	21	9	4	1	11	57	15	3	7	1	7	91	12	2		12	9
24	27	1	7	2	10	58	20	4	6	1	10	92	13	3	5	2	11
25	19	2	2	3	9	59	20	3		18	1	93	31	6	3	2	6
26	15	6	5	4	11	60	25	5	7	2	4	94	22	1	1	3	4
27	22	5	9	1	7	61	22	2		12	10	95	10	10	2	1	10
28	16	5		12	10	62	18	10		18	2	96	15	7	5	1	7
29	32	4		12	10	63	22	9	5	1	4	97	30	7		18	1
30	11	3	2	1	5	64	8	8	2	1	5	98	22	3	6	2	8
31	12	10	3	4	6	65	12	7	2	3	4	99	10	2	7	3	7
32	18	3	6	3	8	66	14	6	6	2	7	100	50	6	4	3	10
33	14	1	5	1	7	67	13	6		12	9						
34	25	1		18	2	68	31	1	3	2	8						

(1) Talhão.

(2) Variedade Existente.

(3) Variedade em caso de replantio.

(4) Estágio no ano de planejamento (1: 1º corte, 2: 2º 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).

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

Tabela 12. Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I100A: (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, 7, 7, 9	26	0, 6, 6, 7	51	7, 8, 8, 9	76	0, 6, 8, 8
2	0, 7, 8, 8	27	7, 8, 9, 11	52	0, 7, 4, 4	77	8, 6, 7, 11
3	10, 11, 10, 10	28	11, 10, 12, 11	53	10, 10, 11, 10	78	10, 11, 12, 11
4	6, 8, 10, 11	29	12, 11, 12, 11	54	6, 6, 9, 9	79	11, 11, 9, 8
5	11, 0, 6, 8	30	5, 5, 6, 10	55	11, 0, 5, 5	80	6, 6, 6, 9
6	6, 7, 9, 8	31	11, 10, 12, 11	56	6, 8, 11, 10	81	8, 10, 12, 11
7	9, 11, 10, 10	32	9, 10, 8, 9	57	8, 8, 8, 9	82	10, 10, 8, 10
8	11, 11, 10, 12	33	8, 8, 8, 9	58	10, 8, 10, 11	83	9, 9, 9, 11
9	6, 4, 4, 6	34	6, 8, 9, 9	59	6, 4, 4, 6	84	6, 7, 5, 6
10	6, 8, 9, 11	35	8, 9, 11, 10	60	6, 6, 11, 10	85	7, 8, 9, 8
11	10, 12, 11, 10	36	7, 8, 10, 11	61	10, 9, 9, 9	86	7, 7, 11, 11
12	7, 8, 8, 8	37	4, 4, 5, 9	62	6, 8, 6, 6	87	5, 6, 6, 9
13	4, 5, 6, 9	38	9, 9, 11, 10	63	5, 6, 7, 9	88	9, 10, 12, 11
14	5, 7, 7, 9	39	12, 11, 10, 10	64	5, 6, 8, 9	89	12, 11, 12, 11
15	6, 10, 11, 10	40	12, 11, 10, 12	65	6, 10, 11, 10	90	10, 11, 10, 10
16	10, 12, 11, 10	41	8, 8, 8, 9	66	8, 9, 11, 10	91	8, 8, 8, 9
17	9, 7, 7, 7	42	10, 11, 10, 10	67	9, 9, 9, 9	92	10, 10, 10, 9
18	10, 10, 10, 12	43	6, 7, 11, 10	68	10, 10, 11, 10	93	8, 9, 10, 12
19	11, 10, 10, 8	44	6, 10, 12, 11	69	11, 10, 12, 11	94	6, 10, 8, 8
20	11, 10, 8, 8	45	7, 4, 6, 9	70	11, 10, 11, 10	95	12, 11, 10, 11
21	0, 6, 8, 8	46	8, 8, 8, 9	71	0, 6, 8, 8	96	7, 7, 7, 11
22	10, 12, 11, 11	47	5, 7, 4, 5	72	12, 11, 11, 10	97	5, 5, 5, 6
23	10, 11, 10, 10	48	9, 9, 9, 10	73	10, 10, 10, 11	98	9, 9, 9, 9
24	10, 10, 10, 11	49	9, 10, 10, 10	74	11, 10, 9, 10	99	9, 10, 8, 9
25	9, 9, 7, 7	50	10, 9, 7, 8	75	12, 10, 10, 12	100	10, 9, 7, 8

(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	9, 8, 6, 8	26	0, 6, 8, 8	51	7, 5, 5, 6	76	0, 6, 6, 8
2	0, 7, 7, 7	27	8, 8, 8, 9	52	0, 6, 5, 4	77	8, 8, 8, 9
3	10, 9, 9, 10	28	10, 11, 11, 12	53	11, 10, 11, 12	78	11, 11, 10, 10
4	6, 6, 10, 11	29	11, 11, 11, 11	54	6, 8, 9, 10	79	10, 11, 12, 11
5	11, 0, 6, 8	30	5, 5, 6, 9	55	11, 0, 5, 7	80	5, 5, 4, 9
6	5, 6, 10, 10	31	10, 11, 12, 11	56	7, 7, 9, 9	81	7, 10, 10, 10
7	9, 9, 9, 9	32	10, 10, 9, 9	57	8, 8, 8, 9	82	10, 10, 8, 8
8	12, 11, 10, 11	33	8, 8, 10, 10	58	11, 10, 9, 11	83	9, 9, 9, 9
9	6, 7, 7, 7	34	7, 8, 8, 8	59	5, 5, 5, 5	84	6, 7, 7, 7
10	6, 6, 9, 9	35	7, 7, 9, 9	60	6, 6, 11, 12	85	6, 7, 11, 11
11	11, 11, 12, 11	36	7, 7, 9, 10	61	10, 11, 11, 12	86	7, 7, 9, 9
12	8, 10, 11, 11	37	4, 6, 6, 9	62	6, 6, 7, 8	87	4, 4, 4, 10
13	4, 5, 4, 10	38	9, 10, 10, 10	63	4, 4, 6, 9	88	8, 10, 10, 11
14	6, 6, 6, 9	39	11, 12, 11, 11	64	5, 7, 7, 9	89	11, 11, 11, 12
15	6, 10, 10, 8	40	11, 11, 10, 10	65	6, 10, 10, 10	90	11, 12, 12, 0
16	9, 9, 10, 9	41	9, 9, 7, 8	66	8, 8, 11, 12	91	11, 12, 11, 10
17	9, 9, 11, 11	42	11, 11, 10, 10	67	9, 8, 8, 9	92	11, 10, 11, 11
18	8, 8, 9, 7	43	6, 6, 11, 11	68	9, 9, 10, 11	93	6, 7, 9, 11
19	11, 10, 11, 11	44	6, 10, 8, 8	69	11, 10, 11, 11	94	5, 10, 11, 12
20	9, 9, 7, 9	45	6, 6, 6, 9	70	10, 8, 8, 9	95	10, 11, 19, 9
21	0, 6, 8, 8	46	7, 7, 7, 9	71	0, 6, 8, 10	96	8, 8, 8, 9
22	11, 11, 11, 12	47	5, 5, 6, 6	72	10, 8, 9, 9	97	5, 5, 5, 5
23	10, 10, 9, 11	48	8, 9, 11, 12	73	11, 10, 11, 10	98	8, 9, 10, 10
24	10, 10, 10, 10	49	9, 10, 10, 10	74	7, 9, 12, 12	99	9, 10, 11, 11
25	9, 9, 7, 8	50	11, 9, 7, 7	75	11, 0, 6, 8	100	10, 10, 8, 10

Tabela 13. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos duzentos talhões na instância I200A.

Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)
1	33	1		12	9	68	31	1	3	2	8	135	25	8	5	2	6
2	35	1	5	4	12	69	30	9	1	2	12	136	8	9	8	2	5
3	10	5	2	1	11	70	10	8		12	10	137	18	4	1	1	4
4	40	2	1	2	4	71	15	3	10	4	11	138	35	1	3	3	7
5	20	3	8	3	12	72	10	6		12	10	139	11	7	10	4	9
6	15	2	9	2	4	73	19	9	4	2	11	140	22	8	2	1	11
7	15	3	7	4	1	74	21	1	7	2	9	141	12	1		12	9
8	30	4	6	1	12	75	17	2	2	3	11	142	13	2	5	1	11
9	25	3		18	2	76	19	6	5	4	11	143	36	6	3	2	4
10	12	5	7	2	4	77	15	1	9	1	7	144	22	1	1	3	4
11	18	10		12	10	78	30	5		12	10	145	10	1	2	1	6
12	22	10		18	3	79	16	4		12	10	146	15	7	5	1	7
13	8	9	5	1	4	80	32	3	2	1	5	147	25	1		18	1
14	12	8	2	1	5	81	11	10	3	3	6	148	17	3	6	2	8
15	24	7	1	3	4	82	12	3	6	3	8	149	10	2	7	3	7
16	13	6	6	4	7	83	10	1	5	4	7	150	50	6	4	3	10
17	31	6		12	9	84	14	1		18	2	151	23	5		12	9
18	26	1	3	2	8	85	25	8	5	2	6	152	45	1	5	4	11
19	14	9	1	2	12	86	30	9	8	2	5	153	10	5	2	2	11
20	15	8		12	10	87	18	4	1	1	4	154	40	2	3	2	4
21	10	3	10	4	11	88	25	5	3	3	7	155	25	9	1	3	12
22	9	6		12	10	89	11	7	10	4	1	156	20	2	10	2	5
23	21	9	4	1	11	90	22	8	2	1	11	157	10	5	7	1	7
24	27	1	7	2	10	91	12	2		12	9	158	20	4	6	1	10
25	19	2	2	3	9	92	13	3	5	2	11	159	20	3		18	1
26	15	6	5	4	11	93	31	6	3	2	6	160	25	5	1	2	4
27	22	5	9	1	7	94	22	1	1	3	4	161	22	2		12	10
28	16	5		12	10	95	10	10	2	1	10	162	15	2		18	2
29	32	4		12	10	96	15	7	5	1	7	163	22	2	5	1	4
30	11	3	2	1	5	97	30	7		18	1	164	8	8	2	1	5
31	12	10	3	4	6	98	22	3	6	2	8	165	12	7	2	3	4
32	18	3	6	3	8	99	10	2	7	3	7	166	14	6	6	2	7
33	14	1	5	1	7	100	50	6	4	3	10	167	13	6		12	9
34	25	1		18	2	101	33	1		12	9	168	31	1	3	2	8
35	20	8	5	2	6	102	35	4	5	4	12	169	30	4	1	2	12
36	18	9	8	2	5	103	10	5	2	1	11	170	10	3		12	10
37	35	4	1	1	4	104	40	2	1	2	4	171	15	3	8	4	11
38	11	5	3	3	7	105	20	3	8	3	12	172	10	6		12	10
39	22	7	10	4	9	106	15	5	9	2	5	173	9	9	4	2	11
40	12	8	2	1	11	107	15	7	7	4	7	174	21	1	7	2	9
41	13	2		12	9	108	30	4	6	1	12	175	17	2	2	3	11
42	36	3	5	1	11	109	20	3		18	2	176	19	6	8	4	11
43	22	6	3	2	4	110	25	9	7	2	4	177	15	1	9	1	7
44	10	1	1	3	4	111	12	10		12	10	178	30	5		12	10
45	15	10	2	1	6	112	18	10		18	3	179	16	8		12	10
46	25	7	5	1	7	113	22	9	5	1	4	180	32	3	2	1	5
47	22	1		18	1	114	8	8	2	1	5	181	11	3	3	3	6
48	10	3	6	2	8	115	12	7	1	3	4	182	12	6	6	3	8
49	50	2	7	3	7	116	24	6	6	4	7	183	10	1	5	4	7
50	24	6	4	3	10	117	13	2		12	9	184	14	1		18	2
51	23	2		12	9	118	31	1	3	2	8	185	25	8	5	2	6
52	45	1	5	4	11	119	26	4	1	2	12	186	30	9	8	2	5
53	10	5	2	2	11	120	14	8		12	10	187	18	4	1	1	4

54	40	2	3	2	4	121	15	3	1	4	11	188	25	5	3	3	7
55	25	9	8	3	12	122	10	6		12	10	189	11	7	8	4	9
56	20	2	10	2	5	123	9	3	4	1	11	190	22	1	1	1	11
57	15	3	7	1	7	124	21	1	7	2	10	191	11	2		12	9
58	20	4	6	1	10	125	27	2	2	3	9	192	13	3	5	2	11
59	20	3		18	1	126	19	6	5	4	11	193	31	6	3	2	6
60	25	5	7	2	4	127	15	5	9	1	7	194	22	1	1	3	4
61	22	2		12	10	128	22	5		12	10	195	10	10	2	1	10
62	18	10		18	2	129	16	4		12	10	196	15	2	5	1	7
63	22	9	5	1	4	130	32	3	2	1	5	197	30	7		18	1
64	8	8	2	1	5	131	11	0	3	4	6	198	22	3	6	2	8
65	12	7	2	3	4	132	12	1	6	3	8	199	10	2	7	3	7
66	14	6	6	2	7	133	18	1	5	1	7	200	50	6	9	3	10
67	13	6		12	9	134	14	1		18	2						

(1) Talhão.

(2) Variedade Existente.

(3) Variedade em caso de replantio.

(4) Estágio no ano de planejamento (1: 1º corte, 2: 2º 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).

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

Tabela 14. Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I200A: (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	11, 12, 11, 9	51	10, 0, 5, 6	101	11, 11, 12, 11	151	11, 9, 11, 11
2	0, 7, 5, 4	52	8, 8, 9, 8	102	0, 9, 6, 11	152	0, 6, 6, 6
3	12, 9, 11, 11	53	0, 9, 4, 4	103	10, 9, 10, 0	153	11, 10, 0, 7
4	4, 4, 9, 8	54	10, 9, 0, 4	104	4, 4, 9, 7	154	4, 4, 11, 12
5	11, 0, 9, 7	55	11, 0, 8, 6	105	10, 0, 9, 7	155	12, 0, 9, 9
6	6, 6, 10, 11	56	5, 5, 10, 11	106	7, 8, 9, 9	156	5, 5, 10, 12
7	11, 12, 12, 12	57	6, 6, 7, 9	107	10, 11, 11, 11	157	5, 4, 5, 9
8	12, 11, 12, 0	58	12, 12, 12, 10	108	12, 12, 12, 0	158	8, 8, 8, 0
9	6, 6, 7, 5	59	5, 5, 7, 5	109	6, 8, 8, 7	159	5, 7, 7, 5
10	4, 4, 9, 8	60	5, 5, 9, 10	110	6, 4, 9, 8	160	4, 6, 9, 7
11	9, 11, 12, 12	61	9, 8, 11, 12	111	12, 11, 10, 11	161	10, 6, 7, 6
12	7, 6, 7, 5	62	9, 11, 5, 11	112	7, 9, 9, 12	162	6, 5, 7, 6
13	4, 4, 5, 10	63	4, 7, 9, 8	113	4, 7, 9, 10	163	4, 4, 4, 10
14	5, 5, 6, 9	64	5, 5, 6, 11	114	7, 9, 9, 10	164	5, 4, 6, 10
15	6, 10, 9, 7	65	4, 10, 12, 8	115	4, 10, 9, 10	165	4, 10, 11, 7
16	11, 8, 8, 9	66	8, 8, 9, 8	116	9, 7, 8, 8	166	8, 6, 9, 10
17	9, 8, 10, 10	67	9, 10, 9, 7	117	7, 5, 6, 6	167	7, 7, 6, 6
18	10, 8, 0, 9	68	9, 9, 9, 12	118	10, 10, 10, 11	168	9, 11, 0, 9

19	12, 9, 11, 12	69	12, 10, 10, 10	119	12, 10, 12, 12	169	12, 12, 10, 8
20	10, 11, 10, 8	70	10, 8, 9, 9	120	9, 7, 9, 9	170	8, 7, 6, 5
21	0, 9, 9, 7	71	0, 6, 6, 4	121	0, 10, 9, 10	171	0, 6, 4, 5
22	9, 8, 6, 6	72	9, 10, 10, 9	122	10, 8, 8, 6	172	10, 10, 8, 9
23	10, 11, 12, 12	73	11, 12, 0, 11	123	12, 11, 12, 10	173	12, 11, 0, 6
24	11, 9, 10, 9	74	9, 8, 10, 11	124	11, 10, 9, 11	174	8, 8, 9, 10
25	8, 0, 7, 6	75	12, 0, 6, 4	125	7, 0, 6, 5	175	11, 0, 6, 4
26	0, 7, 4, 4	76	0, 7, 5, 5	126	0, 6, 4, 4	176	0, 6, 7, 6
27	8, 6, 7, 11	77	7, 9, 7, 9	127	5, 8, 6, 10	177	8, 4, 6, 9
28	12, 8, 12, 11	78	11, 11, 11, 12	128	9, 9, 9, 7	178	11, 11, 8, 12
29	8, 10, 9, 12	79	12, 12, 12, 12	129	11, 12, 11, 12	179	8, 7, 7, 5
30	5, 7, 5, 10	80	4, 4, 4, 10	130	5, 5, 6, 10	180	5, 7, 5, 11
31	10, 8, 7, 7	81	7, 9, 10, 7	131	10, 9, 5, 7	181	7, 10, 8, 10
32	8, 9, 10, 8	82	8, 0, 9, 10	132	10, 10, 8, 10	182	9, 9, 9, 9
33	7, 7, 9, 9	83	11, 8, 10, 9	133	8, 7, 9, 0	183	9, 7, 10, 10
34	7, 7, 8, 8	84	8, 8, 9,	134	9, 11, 12, 12	184	9, 7, 7, 9
35	4, 4, 9, 10	85	6, 7, 11, 11	135	6, 6, 0, 12	185	6, 5, 9, 9
36	7, 5, 9, 9	86	6, 4, 9, 7	136	7, 7, 10, 10	186	4, 5, 9, 10
37	5, 6, 7, 11	87	6, 4, 5, 10	137	6, 8, 6, 11	187	5, 4, 4, 11
38	6, 9, 12, 12	88	7, 10, 8, 6	138	6, 10, 12, 12	188	9, 9, 8, 7
39	11, 11, 11, 10	89	11, 11, 12, 12	139	11, 11, 11, 12	189	12, 10, 11, 8
40	10, 9, 9, 0	90	9, 9, 9, 10	140	10, 8, 9, 0	190	11, 12, 10, 12
41	7, 5, 4, 4	91	7, 6, 6, 5	141	11, 5, 5, 6	191	10, 7, 7, 6
42	12, 11, 12, 12	92	9, 9, 10, 8	142	11, 10, 10, 0	192	10, 11, 0, 9
43	6, 6, 11, 9	93	7, 7, 11, 8	143	6, 6, 11, 7	193	6, 8, 10, 11
44	5, 9, 9, 8	94	6, 10, 9, 7	144	4, 10, 9, 7	194	6, 10, 9, 11
45	8, 7, 6, 9	95	11, 11, 12, 0	145	8, 10, 4, 11	195	11, 10, 9, 10
46	9, 7, 8, 9	96	9, 9, 9, 10	146	8, 7, 9, 9	196	5, 5, 4, 11
47	8, 9, 10, 11	97	7, 7, 9, 7	147	9, 9, 6, 8	197	7, 8, 9, 9
48	8, 8, 9, 10	98	6, 5, 9, 9	148	9, 7, 10, 10	198	7, 5, 10, 9
49	6, 9, 9, 11	99	7, 10, 11, 12	149	6, 11, 11, 12	199	6, 10, 11, 12
50	10, 0, 5, 6	100	12, 11, 12, 11	150	10, 0, 6, 6	200	10, 0, 9, 8

(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	9, 9, 9, 9	51	10, 10, 10, 9	101	9, 9, 9, 9	151	9, 9, 9, 9
2	0, 9, 9, 9	52	0, 9, 9, 9	102	0, 7, 9, 9	152	2, 9, 9, 9
3	11, 10, 10, 11	53	11, 10, 10, 10	103	11, 10, 10, 10	153	10, 9, 10, 11
4	6, 7, 9, 9	54	6, 7, 9, 9	104	6, 6, 9, 9	154	6, 7, 9, 9



5	11, 0, 6, 8	55	11, 0, 9, 9	105	12, 0, 5, 7	155	11, 0, 7, 9
6	7, 9, 10, 11	56	7, 7, 9, 9	106	7, 7, 9, 9	156	5, 6, 9, 9
7	9, 9, 10, 11	57	7, 9, 9, 11	107	10, 10, 10, 11	157	8, 6, 7, 9
8	11, 10, 10, 11	58	10, 10, 9, 10	108	11, 10, 10, 10	158	10, 10, 10, 11
9	6, 7, 7, 5	59	6, 6, 5, 4	109	8, 10, 10, 10	159	5, 5, 5, 7
10	6, 6, 10, 11	60	6, 7, 10, 11	110	6, 7, 9, 9	160	6, 7, 9, 10
11	10, 10, 10, 10	61	11, 10, 10, 10	111	10, 10, 9, 10	161	10, 10, 10, 9
12	8, 10, 10, 10	62	7, 8, 10, 11	112	8, 9, 9, 9	162	8, 10, 10, 10
13	6, 7, 7, 10	63	6, 7, 7, 9	113	4, 6, 6, 9	163	4, 5, 5, 9
14	6, 6, 6, 9	64	5, 5, 7, 10	114	5, 7, 7, 9	164	6, 6, 7, 9
15	6, 10, 10, 10	65	6, 10, 10, 10	115	6, 10, 11, 11	165	6, 10, 9, 10
16	9, 9, 9, 9	66	7, 8, 9, 9	116	9, 9, 10, 11	166	8, 10, 10, 11
17	9, 9, 9, 9	67	9, 9, 9, 9	117	9, 9, 9, 10	167	9, 9, 10, 10
18	9, 9, 10, 10	68	8, 8, 9, 10	118	8, 9, 10, 11	168	9, 9, 10, 9
19	11, 10, 10, 11	69	11, 10, 10, 10	119	11, 10, 10, 11	169	11, 10, 10, 11
20	10, 10, 10, 11	70	10, 11, 11, 11	120	10, 10, 10, 10	170	10, 10, 10, 9
21	0, 7, 9, 10	71	0, 6, 6, 7	121	0, 6, 8, 9	171	0, 6, 8, 9
22	11, 10, 10, 10	72	10, 10, 10, 10	122	11, 10, 10, 10	172	11, 11, 11, 10
23	10, 10, 10, 10	73	11, 10, 10, 11	123	12, 11, 10, 11	173	11, 10, 11, 11
24	9, 9, 10, 11	74	10, 10, 11, 11	124	10, 10, 11, 11	174	9, 9, 10, 10
25	9, 10, 10, 11	75	11, 10, 9, 9	125	11, 10, 10, 11	175	10, 10, 10, 10
26	0, 6, 8, 9	76	0, 7, 9, 9	126	0, 7, 9, 9	176	0, 9, 9, 10
27	9, 9, 9, 11	77	8, 8, 9, 10	127	7, 7, 9, 11	177	7, 7, 9, 11
28	11, 10, 10, 11	78	10, 9, 10, 11	128	10, 10, 10, 11	178	10, 10, 9, 9
29	11, 10, 11, 11	79	11, 10, 11, 11	129	9, 9, 9, 9	179	9, 9, 9, 9
30	5, 7, 8, 9	80	5, 6, 7, 9	130	5, 7, 9, 9	180	6, 6, 6, 9
31	10, 11, 11, 11	81	8, 9, 10, 10	131	11, 12, 11, 12	181	7, 10, 10, 10
32	9, 10, 10, 11	82	9, 10, 10, 10	132	10, 10, 10, 11	182	9, 10, 10, 10
33	7, 9, 9, 10	83	9, 9, 10, 11	133	8, 8, 9, 10	183	9, 9, 9, 9
34	6, 8, 9, 9	84	8, 9, 9, 9	134	6, 8, 9, 9	184	6, 8, 9, 9
35	6, 6, 9, 9	85	6, 7, 9, 10	135	6, 8, 9, 10	185	6, 6, 9, 9
36	5, 6, 10, 11	86	5, 7, 9, 9	136	6, 6, 9, 9	186	6, 6, 10, 10
37	4, 4, 4, 9	87	6, 6, 6, 9	137	6, 6, 7, 9	187	6, 6, 7, 9
38	9, 10, 10, 10	88	8, 10, 10, 11	138	9, 10, 10, 11	188	9, 10, 10, 10
39	11, 11, 11, 11	89	10, 10, 11, 11	139	10, 10, 10, 11	189	11, 12, 12, 11
40	10, 10, 10, 11	90	11, 10, 10, 11	140	11, 11, 10, 11	190	11, 10, 10, 11
41	9, 9, 9, 9	91	9, 10, 10, 8	141	9, 9, 9, 9	191	9, 10, 10, 11
42	11, 10, 9, 11	92	11, 10, 10, 11	142	10, 10, 9, 11	192	10, 10, 10, 10
43	6, 6, 9, 9	93	6, 6, 9, 9	143	6, 7, 9, 9	193	6, 7, 9, 9
44	6, 10, 10, 10	94	6, 10, 10, 11	144	6, 10, 10, 11	194	6, 10, 9, 9
45	6, 6, 8, 9	95	10, 10, 10, 10	145	6, 6, 6, 9	195	9, 9, 9, 11
46	9, 7, 8, 9	96	9, 9, 9, 11	146	7, 7, 9, 11	196	9, 9, 9, 11

47	5, 5, 5, 6	97	5, 7, 7, 6	147	5, 7, 6, 7	197	5, 7, 9, 7
48	8, 9, 10, 11	98	9, 9, 11, 11	148	8, 8, 9, 9	198	8, 8, 9, 9
49	9, 10, 11, 11	99	9, 10, 10, 10	149	9, 10, 10, 10	199	9, 10, 11, 11
50	11, 10, 10, 11	100	11,10, 10, 11	150	10, 10, 10, 10	200	11, 10, 10, 11

Tabela 15. Histórico da cana-de-açúcar plantada nos duzentos talhões na instância I200.

Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)	Ta (1)	Area (ha)	Vex. (2)	Rep (3)	C (4)	M (5)
1	33	1		12	9	68	31	1	13	3	8	135	25	8	5	2	6
2	35	18	5	4	12	69	30	11	1	2	12	136	8	9	18	2	5
3	10	5	2	1	11	70	10	8		12	10	137	18	4	1	1	4
4	40	2	13	2	4	71	15	13	18	2	11	138	35	15	13	3	7
5	20	3	8	3	12	72	10	6		2	10	139	11	7	10	4	9
6	15	15	9	2	5	73	19	9	4	12	11	140	22	8	2	1	11
7	15	3	7	4	7	74	21	1	7	4	9	141	12	12		12	9
8	30	11	6	1	12	75	17	2	12	12	11	142	13	2	5	1	11
9	25	3		18	2	76	19	6	5	2	11	143	36	16	3	2	4
10	12	5	7	2	4	77	15	1	12	2	7	144	22	1	1	3	4
11	18	10		12	10	78	30	13		3	10	145	10	17	2	1	6
12	22	12		18	3	79	16	4		4	10	146	15	7	5	1	7
13	8	9	5	1	4	80	32	14	2	1	5	147	25	11		18	1
14	12	13	2	1	5	81	11	10	3	12	6	148	17	13	16	2	8
15	24	7	1	3	4	82	12	3	15	12	8	149	10	2	7	3	7
16	13	6	14	4	7	83	10	1	5	1	7	150	50	6	14	3	10
17	31	6		12	9	84	14	1		3	2	151	23	5		12	9
18	26	15	3	2	8	85	25	16	5	3	6	152	45	1	15	4	11
19	14	9	1	2	12	86	30	9	8	4	5	153	10	5	2	2	11
20	15	16		12	10	87	18	17	1	18	4	154	40	2	13	2	4
21	10	3	10	4	11	88	25	5	3	2	7	155	25	9	1	3	12
22	9	6		12	10	89	11	18	10	2	9	156	20	12	10	2	5
23	21	9	17	1	11	90	22	8	2	1	11	157	10	5	7	1	7
24	27	1	7	2	10	91	12	2		3	9	158	20	14	6	1	10
25	19	2	18	3	9	92	13	17	15	4	11	159	20	3		18	1
26	15	6	5	4	11	93	31	6	3	1	6	160	25	15	17	2	4
27	22	13	13	1	7	94	22	1	1	12	4	161	22	2		12	10
28	16	5		12	10	95	10	10	12	2	10	162	15	12		18	2
29	32	18		12	10	96	15	7	15	2	7	163	22	2	5	1	4
30	11	3	2	1	5	97	30	7		3	1	164	8	18	2	1	5
31	12	11	12	4	6	98	22	13	16	1	8	165	12	7	2	3	4
32	18	3	6	3	8	99	10	2	7	1	7	166	14	16	6	2	7
33	14	17	15	1	7	100	50	11	11	18	10	167	13	6		12	9
34	25	1		18	2	101	33	1		2	9	168	31	11	3	2	8
35	20	12	5	2	6	102	35	4	5	3	12	169	30	4	1	2	12
36	18	9	8	2	5	103	10	15	12	3	11	170	10	3		12	10
37	35	13	11	1	4	104	40	2	1	12	4	171	15	3	18	4	11
38	11	5	3	3	7	105	20	3	8	4	12	172	10	6		12	10
39	22	7	10	4	9	106	15	15	9	1	5	173	9	9	14	2	11
40	12	8	12	1	11	107	15	17	7	2	7	174	21	1	7	2	9
41	13	2		12	9	108	30	4	6	3	12	175	17	2	12	3	11

42	36	13	5	1	11	109	20	13		2	2	176	19	16	18	4	11
43	22	6	3	2	4	110	25	9	17	4	4	177	15	1	9	1	7
44	10	15	17	3	4	111	12	10		1	10	178	30	5		12	10
45	15	10	2	1	6	112	18	10		18	3	179	16	18		12	10
46	25	7	5	1	7	113	22	9	15	2	4	180	32	3	2	1	5
47	22	1		18	1	114	8	8	2	12	5	181	11	13	3	3	6
48	10	3	16	2	8	115	12	17	11	18	4	182	12	16	6	3	8
49	50	2	7	3	7	116	24	6	6	1	7	183	10	1	5	4	7
50	24	6	12	3	10	117	13	12		1	9	184	14	1		18	2
51	23	17		12	9	118	31	1	3	3	8	185	25	18	5	2	6
52	45	1	5	4	11	119	26	14	1	4	12	186	30	9	8	2	5
53	10	15	14	2	11	120	14	8		12	10	187	18	14	1	1	4
54	40	2	3	2	4	121	15	13	11	2	11	188	25	5	3	3	7
55	25	9	8	3	12	122	10	6		2	10	189	11	7	18	4	9
56	20	2	10	2	5	123	9	13	14	12	11	190	22	1	11	1	11
57	15	3	17	1	7	124	21	11	7	4	10	191	11	2		12	9
58	20	4	6	1	10	125	27	2	2	12	9	192	13	13	15	2	11
59	20	3		18	1	126	19	16	5	1	11	193	31	6	3	2	6
60	25	13	7	2	4	127	15	5	9	2	7	194	22	11	1	3	4
61	22	2		12	10	128	22	15		3	10	195	10	10	2	1	10
62	18	11		18	2	129	16	4		4	10	196	15	12	5	1	7
63	22	9	5	1	4	130	32	13	12	1	5	197	30	7		18	1
64	8	18	12	1	5	131	11	10	3	12	6	198	22	3	6	2	8
65	12	7	2	12	4	132	12	1	6	12	8	199	10	12	7	3	7
66	14	6	6	4	7	133	18	1	15	1	7	200	50	6	9	3	10
67	13	6		1	9	134	14	1		4	2						

(1) Talhão.

(2) Variedade Existente.

(3) Variedade em caso de replantio.

(4) Estágio no ano de planejamento (1: 1º corte, 2: 2º 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).

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

Tabela 16. Planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar para a instância I200: (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	11, 10, 8, 9	51	7, 8, 8, 10	101	10, 8, 10, 12	151	9, 5, 4, 5
2	0, 11, 5, 5	52	0, 6, 4, 5	102	0, 9, 5, 5	152	0, 7, 7, 7
3	9, 11, 9, 11	53	10, 10, 1, 10	103	10, 10, 10, 1	153	10, 8, 2, 11
4	4, 6, 10, 12	54	4, 5, 11, 9	104	4, 6, 11, 10	154	4, 6, 11, 12
5	11, 0, 6, 8	55	11, 0, 6, 8	105	12, 0, 7, 7	155	11, 0, 7, 8
6	6, 8, 11, 12	56	7, 6, 11, 12	106	6, 8, 10, 12	156	7, 6, 9, 9
7	11, 10, 12, 11	57	6, 7, 7, 10	107	9, 11, 11, 11	157	5, 8, 9, 10
8	11, 11, 12, 2	58	11, 11, 10, 9	108	11, 11, 12, 11	158	11, 8, 8, 10
9	8, 6, 7, 8	59	5, 7, 6, 8	109	6, 6, 8, 9	159	7, 5, 5, 7

10	5, 4, 9, 9	60	5, 7, 11, 12	110	5, 5, 9, 9	160	6, 7, 9, 9
11	12, 11, 10, 11	61	11, 9, 7, 6	111	12, 11, 12, 11	161	12, 12, 7, 6
12	7, 6, 5, 7	62	10, 12, 11, 10	112	8, 10, 11, 10	162	7, 6, 4, 6
13	4, 7, 7, 9	63	4, 7, 9, 9	113	4, 7, 9, 9	163	6, 6, 7, 9
14	5, 5, 7, 0	64	6, 4, 6, 9	114	6, 6, 8, 9	164	4, 5, 6, 11
15	6, 10, 11, 10	65	5, 10, 8, 8	115	4, 10, 12, 11	165	6, 10, 10, 9
16	10, 7, 5, 6	66	8, 8, 9, 9	116	9, 7, 8, 8	166	8, 8, 9, 10
17	9, 9, 7, 8	67	9, 8, 8, 8	117	7, 6, 7, 12	167	7, 8, 8, 8
18	6, 7, 9, 10	68	9, 9, 12, 11	118	8, 9, 11, 9	168	9, 9, 10, 11
19	11, 11, 10, 9	69	11, 10, 12, 11	119	11, 9, 12, ,11	169	10, 9, 11, 10
20	8, 8, 9, 11	70	10, 8, 9, 8	120	8, 8, 8, 8	170	8, 6, 8, 8
21	0, 7, 9, 9	71	0, 6, 6, 6	121	0, 10, 10, 11	171	0, 6, 7, 6
22	10, 8, 8, 10	72	8, 7, 8, 10	122	9, 9, 9, 8	172	8, 10, 10, 8
23	11, 11, 9, 9	73	11, 10, 11, 11	123	11, 11, 10, 2	173	10, 12, 1, 7
24	12, 12, 11, 12	74	9, 9, 11, 11	124	10, 9, 12, 11	174	9, 9, 11, 12
25	8, 0, 5, 6	75	9, 0, 5, 6	125	7, 0, 5, 6	175	9, 0, 5, 7
26	0, 6, 4, 5	76	0, 10, 4, 5	126	0, 7, 5, 5	176	0, 6, 6, 6
27	6, 6, 8, 11	77	8, 8, 9, 11	127	7, 4, 10, 10	177	8, 8, 8, 9
28	9, 11, 9, 10	78	11, 11, 10, 12	128	8, 8, 8, 9	178	10, 10, 5, 4
29	11, 7, 5, 7	79	10, 11, 12, 11	129	12, 11, 10, 10	179	11, 11, 7, 7
30	5, 5, 6, 10	80	4, 5, 6, 11	130	5, 5, 6, 9	180	5, 6, 8, 10
31	9, 12, 6, 7	81	6, 11, 11, 12	131	9, 9, 8, 8	181	8, 9, 7, 7
32	8, 10, 8, 8	82	8, 9, 7, 8	132	9, 10, 8, 10	182	9, 9, 9, 10
33	8, 8, 8, 10	83	11, 10, 11, 9	133	7, 7, 8, 10	183	10, 12, 10, 10
34	8, 8, 9, 9	84	10, 8, 9, 8	134	7, 7, 7, 7	184	7, 8, 10, 10
35	5, 7, 11, 12	85	7, 7, 9, 11	135	8, 9, 9, 7	185	6, 7, 10, 9
36	7, 9, 10, 8	86	7, 8, 10, 9	136	7, 7, 9, 11	186	7, 7, 10, 9
37	5, 6, 7, 11	87	6, 7, 7, 10	137	4, 8, 9, 10	187	4, 6, 6, 9
38	7, 9, 7, 6	88	7, 9, 7, 8	138	9, 10, 12, 11	188	9, 10, 7, 8
39	12, 11, 10, 10	89	11, 10, 12, 11	139	12, 12, 11, 10	189	12, 12, 11, 9
40	9, 8, 9, 10	90	9, 9, 9, 10	140	9, 9, 8, 10	190	12, 11, 10, 9
41	11, 11, 6, 9	91	7, 7, 6, 7	141	10, 6, 7, 6	191	7, 7, 6, 6
42	12, 11, 10, 0	92	10, 10, 11, 0	142	11, 9, 11, 11	192	10, 11, 9, 8
43	6, 8, 10, 10	93	8, 8, 9, 10	143	6, 7, 11, 11	193	8, 8, 11, 11
44	5, 10, 8, 9	94	4, 10, 11, 10	144	6, 9, 10, 10	194	5, 10, 12, 11
45	7, 7, 7, 0	95	11, 10, 9, 0	145	8, 10, 10, 9	195	11, 12, 11, 1
46	9, 11, 10, 11	96	7, 7, 7, 9	146	7, 7, 8, 11	196	6, 6, 5, 10
47	7, 7, 7, 7	97	7, 7, 8, 8	147	9, 11, 10, 10	197	8, 9, 7, 8
48	6, 8, 10, 11	98	9, 9, 1, 11	148	9, 9, 11, 10	198	6, 8, 9, 10
49	7, 10, 12, 11	99	7, 10, 10, 12	149	6, 10, 12, 10	199	7, 9, 11, 11
50	10, 0, 5, 7	100	11, 9, 11, 11	150	10, 0, 6, 8	200	10, 10, 8, 8

(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	11, 12, 11, 9	51	8, 8, 9, 8	101	11, 11, 12, 11	151	11, 9, 11, 11
2	0, 7, 5, 4	52	2, 9, 4, 4	102	3, 9, 6, 11	152	0, 6, 6, 6
3	12, 9, 11, 11	53	10, 9, 0, 10	103	10, 9, 10, 0	153	11, 10, 3, 7
4	4, 4, 9, 8	54	4, 5, 11, 11	104	4, 4, 9, 7	154	4, 4, 11, 12
5	11, 0, 9, 7	55	11, 0, 8, 6	105	10, 0, 9, 7	155	12, 3, 9, 9
6	6, 6, 10, 11	56	5, 5, 10, 11	106	7, 8, 9, 9	156	5, 5, 10, 12
7	11, 12, 12, 12	57	6, 6, 7, 9	107	10, 11, 11, 11	157	5, 4, 5, 9
8	12, 11, 12, 0	58	12, 12, 12, 10	108	12, 12, 12, 0	158	8, 8, 8, 0
9	6, 6, 7, 5	59	5, 5, 7, 5	109	6, 8, 8, 7	159	5, 7, 7, 5
10	4, 4, 9, 8	60	5, 5, 9, 10	110	6, 4, 9, 8	160	4, 6, 9, 7
11	9, 11, 12, 12	61	9, 8, 11, 12	111	12, 11, 10, 11	161	10, 6, 7, 6
12	7, 6, 7, 5	62	9, 11, 5, 11	112	7, 9, 9, 12	162	6, 5, 7, 6
13	4, 4, 5, 10	63	4, 7, 9, 9	113	4, 7, 9, 10	163	4, 4, 4, 10
14	5, 5, 6, 9	64	5, 5, 6, 11	114	7, 9, 9, 10	164	5, 4, 6, 10
15	6, 10, 9, 7	65	4, 10, 12, 8	115	4, 10, 9, 10	165	4, 10, 11, 7
16	11, 8, 8, 9	66	8, 8, 9, 8	116	9, 7, 8, 8	166	8, 6, 9, 10
17	9, 8, 10, 10	67	9, 10, 9, 7	117	7, 5, 6, 6	167	7, 7, 6, 6
18	10, 8, 0, 9	68	9, 9, 9, 12	118	10, 10, 10, 11	168	9, 11, 0, 9
19	12, 9, 11, 12	69	12, 10, 10, 10	119	12, 10, 12, 12	169	12, 12, 10, 8
20	10, 11, 10, 8	70	10, 8, 9, 9	120	9, 7, 9, 9	170	8, 7, 6, 5
21	0, 9, 9, 7	71	0, 6, 6, 4	121	0, 10, 9, 10	171	0, 6, 4, 5
22	9, 8, 6, 6	72	9, 10, 10, 9	122	10, 8, 8, 6	172	10, 10, 8, 9
23	10, 11, 12, 12	73	11, 12, 0, 11	123	12, 11, 12, 10	173	12, 11, 0, 6
24	11, 9, 10, 9	74	9, 8, 10, 11	124	11, 10, 9, 11	174	8, 8, 9, 10
25	8, 0, 7, 6	75	12, 0, 6, 4	125	7, 0, 6, 5	175	11, 2, 6, 4
26	0, 7, 4, 4	76	0, 7, 5, 5	126	0, 6, 4, 4	176	0, 6, 7, 6
27	8, 6, 7, 11	77	7, 9, 7, 9	127	5, 8, 6, 10	177	8, 4, 6, 9
28	12, 8, 12, 11	78	11, 11, 11, 12	128	9, 9, 9, 7	178	11, 11, 8, 12
29	8, 10, 9, 12	79	12, 12, 12, 12	129	11, 12, 11, 12	179	8, 7, 7, 5
30	5, 7, 5, 10	80	4, 4, 4, 10	130	5, 5, 6, 10	180	5, 7, 5, 11
31	10, 8, 7, 7	81	7, 9, 10, 7	131	10, 9, 5, 7	181	7, 10, 8, 10
32	8, 9, 10, 8	82	8, 0, 9, 8	132	10, 10, 8, 10	182	9, 9, 9, 9
33	7, 7, 9, 9	83	11, 8, 10, 9	133	8, 7, 9, 0	183	9, 7, 10, 10
34	7, 7, 8, 8	84	8, 8, 9, 7	134	9, 11, 12, 12	184	9, 7, 7, 9
35	4, 4, 9, 10	85	6, 7, 11, 11	135	6, 6, 0, 12	185	6, 5, 9, 9
36	7, 5, 9, 9	86	6, 4, 9, 7	136	7, 7, 10, 10	186	4, 5, 9, 10

37	5, 6, 7, 11	87	6, 4, 5, 10	137	6, 8, 6, 11	187	5, 4, 4, 11
38	6, 9, 12, 12	88	7, 10, 8, 6	138	6, 10, 12, 12	188	9, 9, 8, 7
39	11, 11, 11, 10	89	11, 11, 12, 12	139	11, 11, 11, 12	189	12, 10, 11, 8
40	10, 9, 9, 0	90	9, 9, 9, 10	140	10, 8, 9, 0	190	11, 12, 10, 12
41	7, 5, 4, 4	91	7, 6, 6, 5	141	11, 5, 5, 6	191	10, 7, 7, 6
42	12, 11, 12, 12	92	9, 9, 10, 8	142	11, 10, 10, 0	192	10, 11, 0, 9
43	6, 6, 11, 9	93	7, 7, 11, 8	143	6, 6, 11, 7	193	6, 8, 10, 11
44	5, 9, 9, 8	94	6, 10, 9, 7	144	4, 10, 9, 7	194	6, 10, 9, 11
45	8, 7, 6, 9	95	11, 11, 12, 0	145	8, 10, 4, 11	195	11, 10, 9, 10
46	9, 7, 8, 9	96	9, 9, 9, 10	146	8, 7, 9, 9	196	5, 5, 4, 11
47	8, 9, 10, 11	97	7, 7, 9, 7	147	9, 9, 6, 8	197	7, 8, 9, 9
48	8, 8, 9, 10	98	6, 5, 9, 9	148	9, 7, 10, 10	198	7, 5, 10, 9
49	6, 9, 9, 11	99	7, 10, 11, 12	149	6, 11, 11, 12	199	6, 10, 11, 12
50	10, 0, 5, 6	100	12, 11, 12, 11	150	10, 0, 6, 6	200	10, 0, 9, 8

Verificou-se nas Tabelas anteriores 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 bom 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 17 para dados gerados de instâncias aleatórias e na Tabela 18 para as instâncias reais.

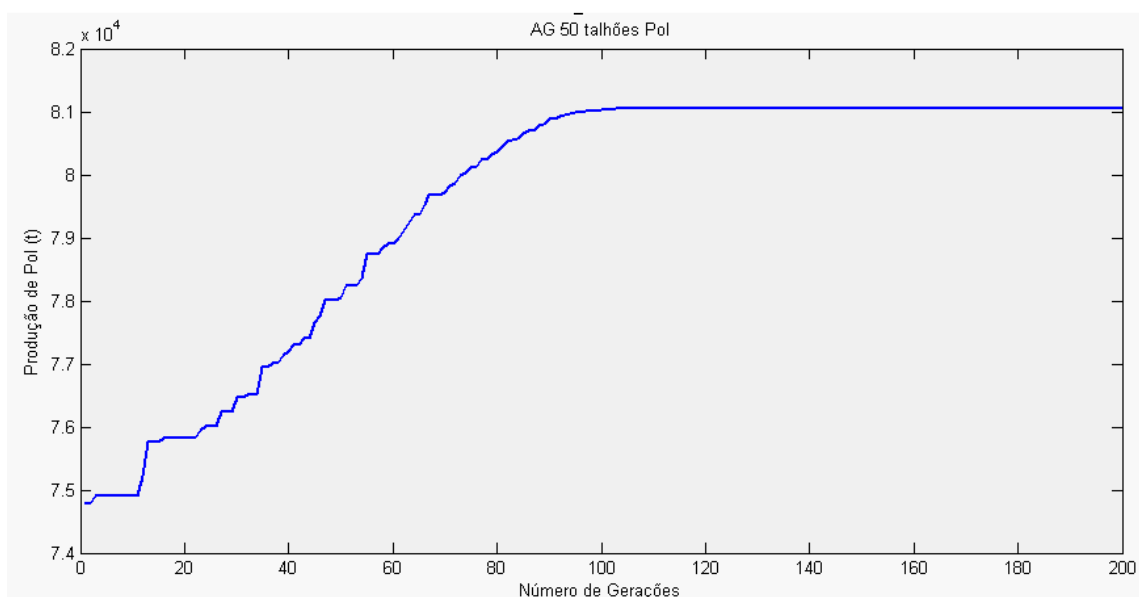
Tabela 17. Produção otimizada média de Pol e Produção otimizada média de cana-de-açúcar para as instâncias aleatórias.

Instância	I50A	I100A	I200A
Produção média de Pol (t/ano)	16486	32957	55035
Produção média de cana-de-açúcar (t/ano)	131550	266925	467300
Desvio padrão	0,012	0,015	0,020
Coeficiente de variação (%)	0,0023	0,0031	0,0029

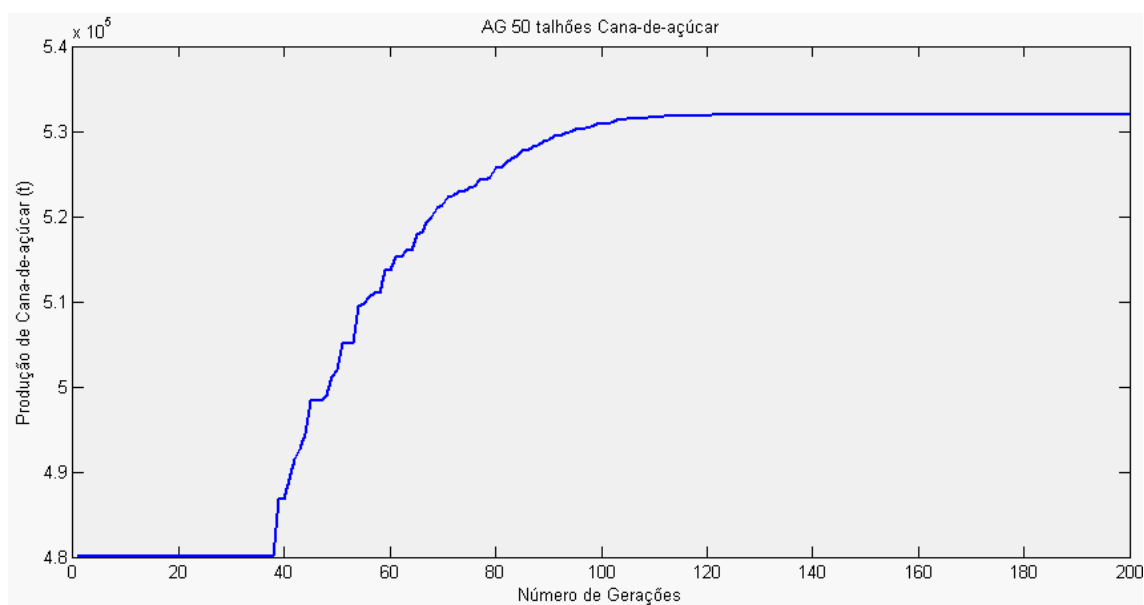
Tabela 18. Produção otimizada média de Pol e Produção otimizada média de cana-de-açúcar para as instâncias reais.

Instância	I200	I500	I1000	I1500
Produção média da Pol (t/ano)	29917	73837	148475	218697
Produção média de cana-de-açúcar (t/ano)	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

O baixo valor obtido para o desvio padrão e para o coeficiente de variação é um indicativo da robustez do AG. Isto pode ser evidenciado observando as Figuras 12, 13 e 14 onde 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)

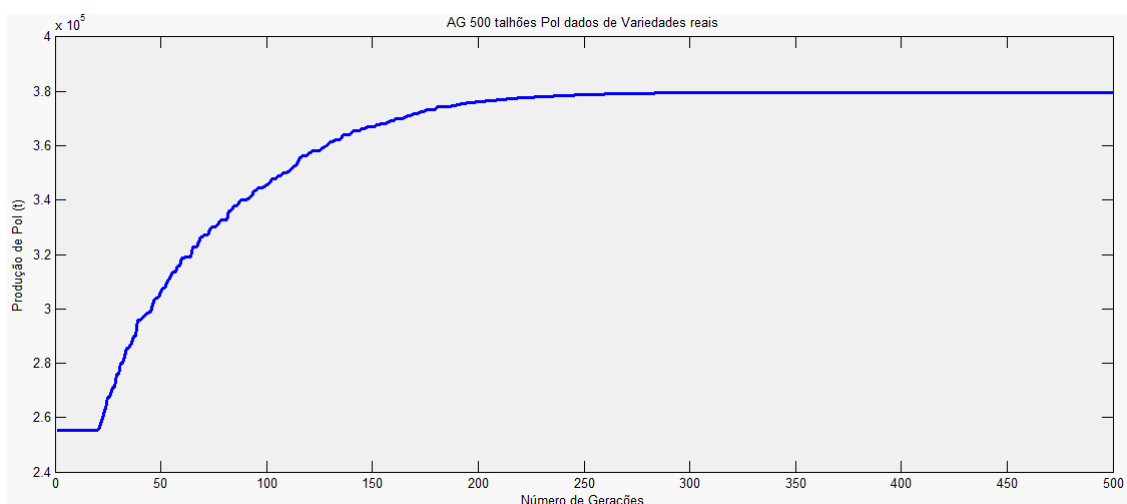


(b)

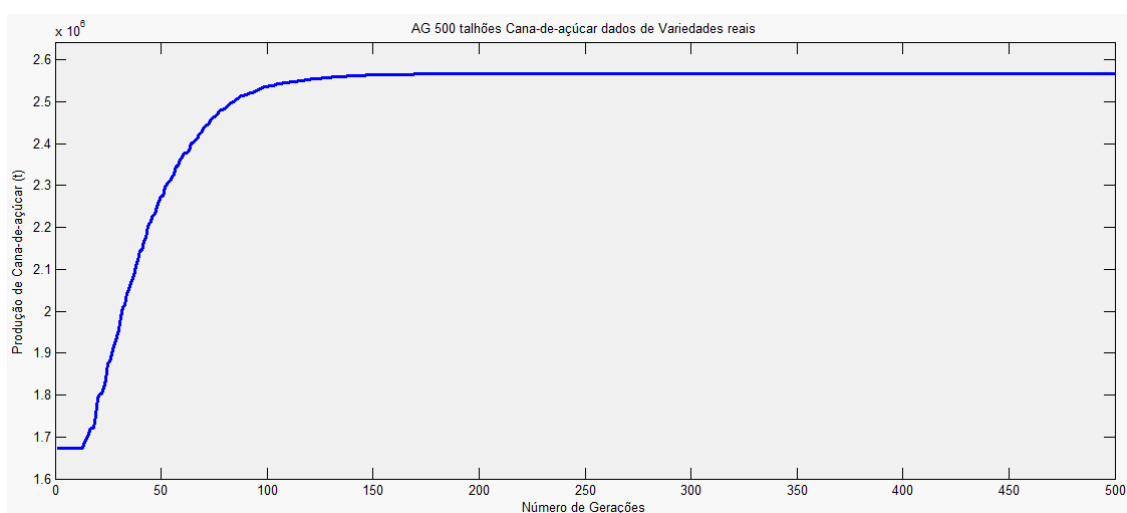
Figura 12. (a) Produção da Pol, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I50A. (b) Produção de cana-de-açúcar, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I50A.

O comportamento do processo de otimização para pequenas instâncias, observado na Figura 12 (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 12 (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 13. (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 13 apresenta o comportamento do processo para médias instâncias, caracterizada pela instância I500. Verifica-se o comportamento de incrementos sucessivos com o transcorrer das gerações e em seguida a estabilização do processo, que ocorre na geração 267 para a Pol, Figura 13 (a), e geração 167 para a cana-de-açúcar, Figura 13 (b).

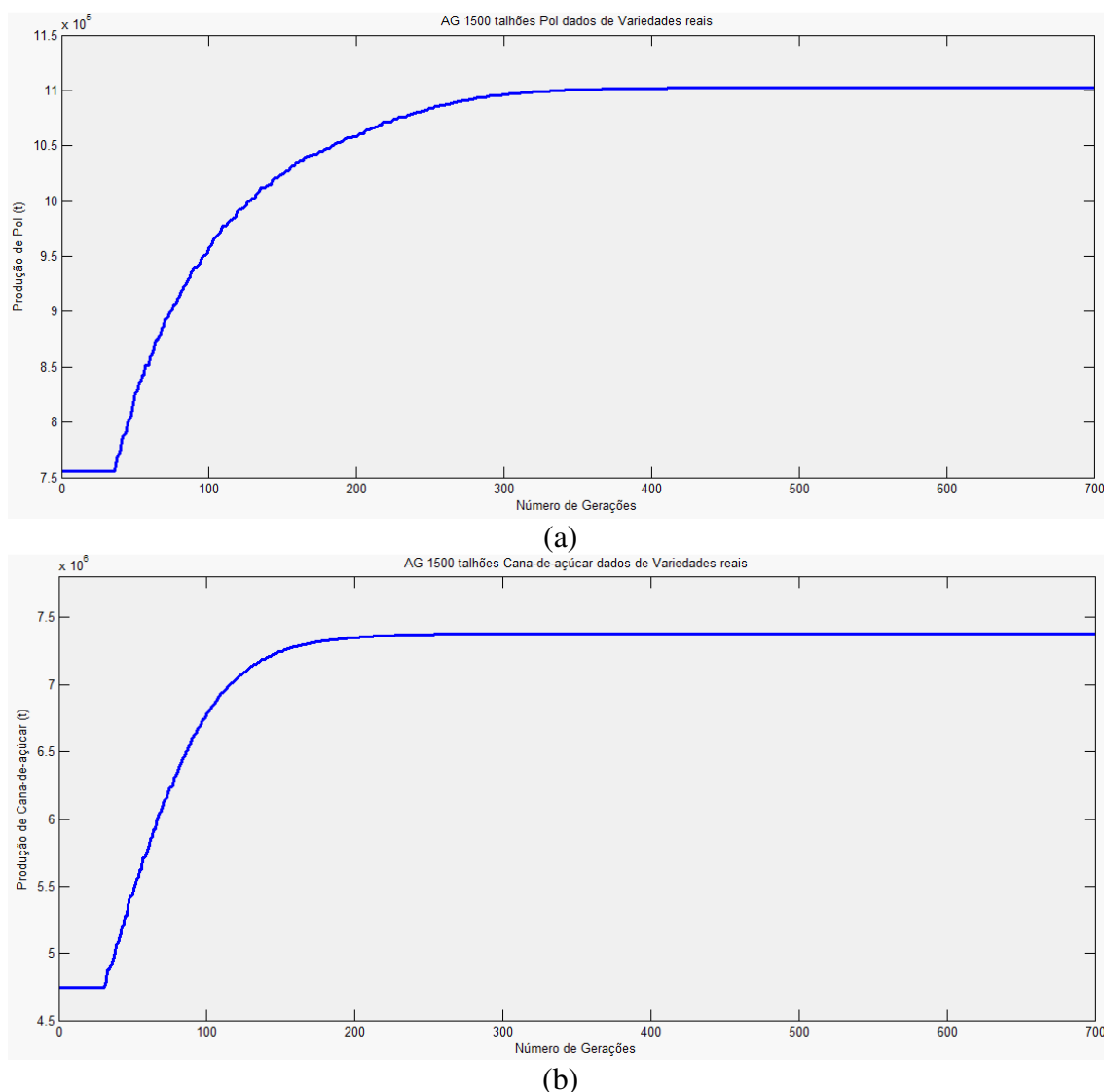


Figura 14. (a) Produção da Pol, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I1500. (b) Produção de cana-de-açúcar, em toneladas, em função do número de gerações para a instância I1500.

Na Figura 14 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 quatrocentos 405 para a Pol, Figura 14 (a), e na geração 249 para a cana-de-açúcar, Figura 14 (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 Tabela 19, 20, 21 e 22 apresentam os resultados do processo de otimização quanto aos objetivos de maximizar a produção de cana-de-açúcar e de Pol

para as instâncias aleatórias e reais, assim como as porcentagem 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 19. 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 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 20. 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 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 21. Produção otimizada da Pol nas três instâncias aleatórias.

Instância	Possível Produção Otimizada Cana-de-açúcar (t)	Produção 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 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 22. 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 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 19 e 20 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 cálculos para a possível produção da Pol, utilizando o mesmo planejamento. Enquanto as Tabelas 21 e 22 apresentam a produção otimizada da Pol para instâncias aleatórias e reais e o cálculo da possível produção de cana. 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 19 e 21 e a coluna 2 das Tabelas 20 e 22).

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 (P.U.I.), período de maturação da cana. Observa-se também, nas Tabelas 19, 20, 21 e 22, 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 diferentes tamanhos de unidades agrícolas.

## 7. CONCLUSÃO

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 sucro-alcooleiro.

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 através da obtenção do melhor arranjo possível 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. Escolheu-se dentre os métodos heurísticos existentes 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.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology: a comprehensive study of the Saccharum source-to-sink system.** Amsterdam: Elsevier, 725p. 1973.

ALIANO FILHO, A. **Algoritmo Genético em um Problema de Rotação de Culturas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia em Energia na Agricultura). Botucatu: UNESP, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho. 136p. 2012.

BASSANEZI, R. C. **Ensino e aprendizagem com modelagem matemática.** 2. ed. São Paulo: Contexto, 387 p. 2006.

BASSANEZI, R. C.; FERREIRA JUNIOR, W. C. **Equações Diferenciais com Aplicações.** Harbra, 572 p, 1988.

BEAUCLAIR, E. G. F. de; 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.

BERNARDINO, H. S. Hibridização de Algoritmos Genéticos e Sistemas Imunológicos Artificiais para Problemas de Otimização com Restrições em Engenharia. Juiz de Fora. 40-43p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.

BLICKLE, T. **Theory of Evolutionary Algorithms and Application to System Synthesis,** dissertação de doutorado, Swiss Federal Institute of Technology, Zurique, 1996.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys**, v. 35, n. 3, p. 268 - 308, 2003.

BRASIL. Ministerio da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Agroenergia. <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/agroenergia>. Acesso em: 28 de nov. de 2014.

BRASIL. Ministerio da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Agroenergia. <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.

BRIEGER, F. O.; PARANHOS, S.B. Técnica cultural. In: INSTITUTO BRASILEIRO DA POTASSA. **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo, p. 138-190. 1964.

BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974. 243 p.

CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**. v.70 n.6 Piracicaba Nov./Dec., 2013.

CASTRO, L. D. Algoritmos evolutivos. **Inteligência Artificial UFES**. 2009. Disponível em: [http://iaufes20092.pbworks.com/w/page/8625605/Algoritmos %20Evolutivos%20-%20QC7](http://iaufes20092.pbworks.com/w/page/8625605/Algoritmos%20Evolutivos%20-%20QC7). Acesso em: 09 de dez. de 2013.

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.

COLETI, J. T.; STUPIELLO, J. J. Plantio da cana-de-açúcar. In: Atualização em produção de cana-de-açúcar / organizado por Silvelena Vanzolini Segato... [et al.], Livrocercos, Piracicaba. 2006.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CONSTANTINO, A. A.; REIS, P. A.; MENDONÇA, C. F. X. N.; FIGUEIREDO, M. F. Aplicação de Algoritmo Genético ao Problema de Cobertura de Conjunto. **XXV SBPO**, p.1406 - 1414, 2003.

CUNHA, C. B. **Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte). São Paulo: EPUSP, Universidade de São Paulo. 222p. 1997.

DEB, K. **Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, Wiley. 2001.

De JONG, K. A. **An analysis of the the effects of selection in genetic algorithms**. Nashville, 1975. Phd thesis - Graduate Schol of Vanderbilt University.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 212p. (FAO. Riego y Drenaje, 33), 1979.



DUARTE, J. B. J.; COELHO, F. C. Rotação de Culturas. **Manual técnico**, v.1, p. 147 - 155, 2002.

ENGEL, A. B. **Introdução à Biomatemática determinista dos sistemas ecológicos**. Campinas: CNMAC/Editora da UNICAMP. 173p. (CNMAC.Minicurso, 6), 1984.

FERNANDES, A. J. **Manual da cana-de-açúcar**, Piracicaba SP, Livro ceres, 145p, 1984.

FLORENTINO, H. O. ; PATO, M. V. A bi-objective genetic approach for the selection of sugarcane varieties to comply with environmental and economic requirements. **Journal of the Operational Research Society**, v. 64, p. 1-23, 2013.

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.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). *Crop-water relations*. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

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, 4., 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**, J. Sched. 2, 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 Res.**, n. 57, p. 151 – 160, 1998.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. **Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. Biomass and Bioenergy**. International Conference on Lignocellulosic ethanol, v. 46, p. 564–573, November, 2012.

HORII, J. A qualidade da matéria-prima na visão agrícola. **Visão Agrícola**, piracicaba, v. 1, n. 1, p. 91-93, 2004.

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.

JANINI, A. A. **Análise operacional e econômica do sistema de plantio mecanizado de cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. Introdução aos Algoritmos Genéticos. In: **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Porto Alegre - RS. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/estefane/metaheurísticas/ag.pdf>;, 1999. p. 87-146. Acesso em: 09 dez. 2013.

LANDERS, J. N. Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture: the Brazilian experience. *Integrated Crop Management*, v. 5, Food and Agriculture organization of the United Nations, 2007.

LAVANHOLI, M.G.D.P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 697-722.

LIVRAMENTO, S. **Algoritmo genético para o problema de localização de recursos em rede telefônica**. 2004. 90 f. Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MACHADO, F. de B. P. Brasil, a doce terra – História do Setor. **Jornal da Cana**, 2004. Disponível em <<http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/Conheca%20%20Setor.asp>> Acesso em: 27 nov. 2013.

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 Rec.** n. 58 p. 241 - 263, 1972.

MENDONÇA, J. R. de. Efeito da geada de julho de 1981 nas características tecnológicas da diferentes variedades e clones de cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Copersucar**, n.24, p. 16-21, 1983.

MENDONÇA, J. R. de; NOCITI, P. R. H.; DEOTTI, R. C. Estudo de diferentes épocas de corte em cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, v. 2, Piracicaba, 1984. **Anais**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1984. p. 140-149.

METAHEURISTICS NETWORK, <http://www.metaheuristics.net/index.php?main=1>, Acesso em: 09 de dez. de 2013.

MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, B. D. In: SPRINGER (Ed.). **How to solve it: Modern Heuristics**. USA:, 2000. p.115-183.

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 distancias 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.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Fechamento da safra 2010/2011**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 141p. 2011.

PICOLI, M. C. A.; LAMPARELLI, R. A. C.; SANO, E. E.; MELLO, J. R. B.; ROCHA, J. V. **Effect of sugarcane-planting row directions on ALOS/PALSAR satellite images**. *GIScience & Remote Sensing*, Vol. 50, No. 3, 349, 2013.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of Formative Phase Drought on Different Classes of Shoots, Shoot Mortality, Cane Attributes, Yield and Quality of Four Sugarcane Cultivars, **J. Agronomy and Crop**, 185, p. 249 – 258, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 2000.

RAZALI, N. M.; GERAGHTY, J. **Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP**. Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 v. II WCE, July 6 - 8, 2011, London, U.K., 2011.

REEVES, R. C.; BEASLEY, J. E. Combinatorial Problems. In: SPRINGER (Ed.). **Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Advanced Topics in Computer Science Series**. London: Blackwell Scientific Publications, 1993.

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**, Piracicaba-SP, v.11, n.1, p.28-31, set/out. 1992.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; SILVA, G. F. Metaheurística algoritmo genético para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Rev. Árvore**. vol. 28 no.2 Viçosa mar./abr. 2004.

SACHS, R. C. C. Remuneração da tonelada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 37, n. 2, fev. 2007.

SCARPARI, M. S; BEAUCLAIR, E. G. F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**. Piracicaba. v. 61. n. 5. 2004.

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. 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).

SILVEIRA, L.C.I. da; BARBOSA, M.H.P.; OLIVEIRA, M.W. de. Níveis de variedades de cana-de-açúcar predominantes nas principais regiões produtoras de cachaça de Minas Gerais. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.23, n. 217, p.25-32, 2002.

TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. **DSSAT version 3**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 163p, 1994.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Posição em 31/04/2015. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>> . Acesso em: 09 de set. de 2015.

USDA - United States Department of Agriculture. <<http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>>. Acesso em: 28 de nov. de 2013.

WORLDWATCH INSTITUTE (Ed.) **Biofuels for transportation**. Global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21<sup>st</sup> century. Washington: s. n., 2013.

YIRSAW, T., WOLDETSADIK, K., WORKNEH, T.S. Effect of Harvest Time on Quality of Sugar Cane Cultivars, **Advanced Materials Research**, v. 824 p. 293 – 300., 2013.