

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COLHEITA MECANIZADA DE UMA INDÚSTRIA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Ever Santoro

Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP-Univ Estadual Paulista, Engenharia de Produção
Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube, 14-01, 17033-360, Bauru, SP, Brasil
eversantoro@gmail.com

Edilaine M. Soler,

Faculdade de Ciências, UNESP-Univ Estadual Paulista, Departamento de Matemática
Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube, 14-01, 17033-360, Bauru, SP, Brasil
edilaine@fc.unesp.br

Adriana C. Cherri

Faculdade de Ciências, UNESP-Univ Estadual Paulista, Departamento de Matemática
Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube, 14-01, 17033-360, Bauru, SP, Brasil
adriana@fc.unesp.br

RESUMO

A cultura de cana-de-açúcar é muito importante para o agronegócio brasileiro, respondendo por 16% da matriz energética do país e sendo uma das mais limpas e renováveis do mundo. A planta é aproveitada na produção de açúcar, etanol, fertilizante e bioeletricidade, reduzindo impactos ambientais e gerando créditos de carbono. Com o aumento constante da produção e a mudança de paradigma de colheita a partir da mecanização, evidencia-se a necessidade de otimização do processo de colheita por tratar-se de uma nova atividade neste setor. Sua representatividade em relação ao custo total de produção da cana-de-açúcar justifica um estudo específico na otimização do processo de colheita mecanizada. Desta forma, este artigo tem como objetivo apresentar um modelo matemático para otimizar este processo, buscando através de análise do mapa de plantio e considerando as variáveis existentes neste processo, traçar o melhor plano de colheita a ser realizado.

PALAVRAS CHAVE. Cana-de-açúcar, Mecanização, Otimização, PO na Agricultura e Meio Ambiente.

ABSTRACT

The cultivation of sugarcane is very important for Brazilian agribusiness, accounting for 16% of the energy matrix of the country and being one of the cleanest and renewable in the world. The plant is used to produce sugar, ethanol, fertilizer and bioelectricity, reducing environmental impacts and generating carbon credits. With the constant increase of production and the paradigm change from harvest mechanization, the need of optimization of the harvesting process is evidenced since this is a new activity in this sector. Its representativeness in the total cost of sugarcane production justifies a specific study in the optimization of mechanical harvesting process. This article has as objective to present a mathematical model to optimize this process, searching through the planting map analysis and considering the existing variables in this process, and draw the best harvesting plan to be realized.

KEYWORDS. Sugarcane, Mechanization, Optimization, OR in Agriculture and Environment

1. Introdução

A cana-de-açúcar está entre as culturas mais importantes do agronegócio brasileiro, sendo o Brasil o maior produtor mundial de açúcar e de álcool de cana-de-açúcar do planeta, destacando-se também como o maior exportador, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor nacional (SILVA, 2008).

A agroindústria canavieira do Brasil se diferencia dos outros países por produzir em escala industrial tanto açúcar quanto álcool e, mais recentemente, energia elétrica co-geradora a partir da queima da palha e do bagaço de cana. Portanto, há uma característica de aproveitamento múltiplo da cana-de-açúcar, cujos produtos intermediários e finais são dotados dessa cadeia produtiva. O tamanho grau de integração entre agricultura e indústria, volume de produção e de exportação, além do poder político e econômico dos agentes envolvidos, dão peculiar característica à agroindústria canavieira brasileira (MORAES & SHIKIDA, 2002).

De acordo com a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), empresa pública vinculada ao MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), a área plantada de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira safra 2014/2015 resultou em uma produção de 642,1 milhões de toneladas. Na safra 2015/2016 estima-se que esta produção seja de 561,6 milhões de toneladas. A queda na produção deve-se à crise do setor e aos problemas climáticos. Entretanto, mesmo com a diminuição da produtividade é possível dimensionar a importância do setor sucroalcooleiro na economia do país (CONAB, 2014).

Recentemente, o processo de produção de açúcar e álcool tem sofrido mudanças importantes, principalmente nos métodos de colheita. Um novo padrão tecnológico se impõe a partir de mudanças no ambiente institucional, mormente com a promulgação da Lei 11.241/2002 (SÃO PAULO (Estado), 2002), que limita a queima da cana e favorece a mecanização da colheita. No processo de colheita mecanizada, todo o processo de corte e transporte da cana é feito por máquinas. O avanço da mecanização na colheita da cana-de-açúcar proporcionou o uso de novas tecnologias e ganho em produtividade para a cultura. O controle da qualidade do processo de colheita da cana-de-açúcar é fundamental para reduzir as perdas (SILVA, 2008).

A colheita mecânica da cana traz ganho ambiental e de saúde pública, principalmente por reduzir os danos ao meio ambiente, por dispensar a queima de resíduos. Além disso, a mecanização proporciona ganhos econômicos, pois diminui o custo de produção da lavoura de cana, reduz os impactos ambientais, além de ser possível o aproveitamento da palha da cana para a geração de energia nas usinas e cobertura do solo (FURTADO, 2002).

Neste novo panorama o sucesso da colheita mecanizada da cana-de-açúcar depende do plantio de qualidade, sem falhas no estande, otimizando o rendimento da máquina, paralelismo entre sulcos e suavidade do micro relevo do solo, proporcionando, desta forma, menores perdas quantitativas no processo. Assim, no plantio de cana-de-açúcar, independentemente do método empregado, semimecanizado (parte do corte é feito de forma manual, por trabalhadores e parte por máquinas) ou mecanizado, as necessidades da cultura, tal como o ambiente de implantação deverão ser atendidas. Considerações se fazem necessárias, visto que as atitudes tomadas na operação de plantio serão determinantes na produtividade e na longevidade do canavial (RIPOLI & CASAGRANDE, 2006).

Neste contexto, este trabalho apresenta um modelo matemático para resolver um problema real de Planejamento da Rota da Colhedora (PPRC) que objetiva minimizar o tempo de manobra da colhedora, de modo que esta deve obrigatoriamente passar por todas as linhas de cana. Com este modelo busca-se otimizar o processo de colheita mecanizada reduzindo seus custos e, consequentemente atendendo os principais requerimentos competitivos do setor sucroalcooleiro e assim responder aos desafios estratégicos de redução de custos e melhoria da produtividade.

Este trabalho está organizado como segue: na Seção 2 é descrito o processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, na Seção 3 é apresentado o modelo matemático de otimização para o Problema de Planejamento da Rota da Colhedora, na Seção 4 estão os resultados numéricos obtidos, e finalmente na Seção 5 estão as considerações finais.

2. Conhecendo o processo

Na colheita mecanizada é necessário a análise de diversos fatores como: nivelamento do solo, formato e comprimento dos talhões, produtividade, canal homogêneo, características varietais, qualidade da operação, treinamento do pessoal, entre outros. Além destes pontos fundamentais para um melhor aproveitamento da área existe a necessidade do planejamento, como o formato dos talhões e o traçado dos carregadores, sempre considerando o relevo e o solo.

Buscando um melhor entendimento do processo é necessário o conhecimento de alguns termos como: talhões – divisão efetuada em uma fazenda, influenciada pela sua topologia e dependente da declividade; carregadores e estradas – caminho por onde passarão os caminhões e maquinário entre os talhões, a definição das estradas/carregadores interfere diretamente no formato dos talhões e posição de sulcação; bate (local de transferência de carga) - estes locais são dispostos visando o maior aproveitamento do deslocamento do maquinário, este local tem o objetivo de proteger as margens do canal de pisoteio, evitando perdas maiores por área danificada (MORAES, 2007).

O sistema tradicional de plantio da cana-de-açúcar, apesar de ser eficiente no controle de erosões baseia-se em um formato antigo, o qual não previa mecanização. Este sistema prejudica todas as operações mecanizadas, devido à construção de terraços (ou curvas de nível). Como não existe paralelismo entre os terraços e estes são guias da sulcação, as linhas de cana tornam-se descontínuas, necessitando de manobras em máquinas e equipamentos originando desta forma as ruas mortas que prejudicam o sistema operacional. O objetivo principal de uma maior análise no plantio é diminuir o terraceamento e racionalizar a sulcação da área, diminuindo ao máximo o número de manobras dos equipamentos, sem perder a segurança no controle de erosão. Com o advento da mecanização e a adoção das práticas de preparo conservacionista (preparo reduzido) é possível melhorar o planejamento da sulcação, aumentando a capacidade operacional da mecanização agrícola pela redução de "sulcos mortos". Praticamente, todas as operações no canal seguem as linhas de plantio da cultura. Quanto mais linhas (sulcos) houver, mais manobras serão necessárias e, com isso, maior será o tempo para realizar as operações. No caso da colheita mecânica, gasta-se em torno de 1,5 a 2,0 minutos por manobra da colhedora e veículo de transbordo ou caminhão. Fazer uma análise das linhas de canas que serão colhidas, sulcando direto entre os talhões, atravessando o plantio entre os diversos carregadores (processo conhecido como tiro longo ou tiro direto), facilitará a colheita em todo o comprimento da área garantindo ganho de tempo e lucro ao setor (BENEDINI & CONDE, 2008).

3. O Problema de Planejamento da Rota da Colhedora

Mesmo com o planejamento da sulcação o setor sucroalcooleiro busca constante melhoria no processo de colheita e, uma forma viável de otimização, está no planejamento da colheita mecanizada.

Focando o processo de colheita encontra-se diversas máquinas trabalhando praticamente ininterruptamente durante toda uma safra que normalmente compreende de abril a novembro. Desta forma, nota-se que um planejamento que aumente alguns segundos de trabalho de uma máquina por hectare (região com uma área 10.000 m²) terá o impacto de horas de trabalho em uma safra e, conseqüentemente, de toneladas de cana. Para que isto realmente ocorra é necessário um mapeamento das linhas de cana existentes nos talhões, assim como a informação de que linhas de cana poderiam ser ligadas quanto a topografia, apesar de separadas por um carregador. Apesar de possuir um carregador, se a colhedora dar continuidade na colheita sem efetuar a manobra para trocar de linha de cana, processo este que despense grande tempo para ocorrer, ganha com isso uma linha de cana de maior comprimento. Observa-se que a travessia de uma colhedora sobre o carregador leva em média 10 segundos enquanto uma manobra para mudança de linha de cana levaria entre 1,5 a 2 minutos. Com esta técnica, também chamada de tiro direto ou tiro longo, podemos buscar uma maior otimização da colheita e a simulação de linhas de cana maiores correspondendo assim a um impacto direto na produtividade e economia da empresa sucroalcooleira (BENEDINI & CONDE, 2008).

A partir do novo panorama da mecanização tem-se o Problema de Planejamento da Rota da Colhedora, que consiste em decidir qual a melhor rota a ser realizada pela colhedora, visto que é conhecido o layout do canavial. O modelo matemático proposto para resolver este problema objetiva minimizar o tempo de manobra da colhedora, de modo que a colhedora deve obrigatoriamente passar por todas as linhas de cana.

Para modelar matematicamente este problema consideraremos um grafo não orientado em que cada linha de cana corresponde a uma aresta limitada por dois vértices do grafo (cada vértice é um nó do grafo, sendo representado pelo início e fim da rua de cana). As arestas do grafo possuem custos associados que representam o tempo de manobra da máquina colhedora. Sabe-se que o tempo de manobra da máquina para trocar de linha de cana é muito alto.

Assim, este problema reduz-se ao Problema do Carteiro Rural (Eiselt *et al.*, 1995), em que dado um grafo $G = (V, A)$, em que V corresponde ao conjunto de vértices, com $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, e A representa o conjunto de arestas entre os vértices, $A = \{(i, j), i \neq j\}$. Definimos um subconjunto $A_r \subset A$, de arestas obrigatórias. O problema consiste em determinar um caminho fechado de custo mínimo, partindo de um ponto de origem e passando por cada aresta de A_r uma vez.

Os parâmetros utilizados na modelagem matemática foram:

A : conjunto de arestas do grafo;

A_r : conjunto de arestas obrigatórias (correspondem as linhas de cana);

t_{ij} : tempo de manobra da colhedora associado a aresta (i, j) , $(i, j) \in A$.

As variáveis de decisão são:

$$x_{ij} : \begin{cases} 1, & \text{se aresta } (i, j) \text{ é percorrida pela colhedora} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Assim, tem-se o modelo matemático para o Problema de Planejamento da Rota da Colhedora:

$$\text{Min } \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} x_{ij} + t_{ji} x_{ji} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_{\{i:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = 0, & i = 1, 2, \dots, n; \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1, \text{ para todo } (i, j) \in A_r, \quad (3)$$

$$s.a. \begin{cases} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, & \text{para } S \subset \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \text{ e } S \neq \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{(o,j) \in A} x_{oj} \geq 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{(i,o) \in A} x_{io} \geq 1, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_{ij} \in \{0, 1\}, & \text{para todo } (i, j) \in A, \end{cases} \quad (7)$$

No modelo matemático (1)-(7), a função objetivo (1) minimiza o tempo de manobra da colhedora, as restrições (2) garantem a continuidade do percurso; as restrições (3) garantem que toda linha de cana (aresta obrigatória) seja percorrida uma vez pela colhedora. As restrições (4) proíbem a construção de sub-rotas ilegais, ou seja, pequenos roteiros desconexos do roteiro principal; as restrições (5) e (6) garantem que a colhedora inicie o percurso um ponto de origem e retorne para este mesmo local no final do percurso, nestas restrições o representa o nó de origem; e as restrições (7) indicam que as variáveis x_{ij} são binárias.

Neste modelo estamos considerando apenas uma máquina colhedora, entretanto, para a colheita de cana em uma fazenda, inúmeras máquinas são utilizadas. Esta consideração ainda está em fase de teste e não será apresentada neste trabalho.

Na próxima seção são apresentados os testes numéricos preliminares com dados fornecidos por uma indústria de açúcar e álcool sediada na região de Catanduva interior do estado de São Paulo.

4. Resultados preliminares

Para avaliar a eficiência do modelo matemático (1)-(7), testes computacionais preliminares foram realizados com dados e informações fornecidas por uma indústria de açúcar e álcool. O problema foi implementado na linguagem de programação Java integrado com o solver CPLEX. Os dados utilizados no teste são descritos a seguir.

A fazenda selecionada para realização destes testes é dividida em 10 talhões que totalizam 190.54ha (hectares). Buscando agilizar a colheita da cana, foram distribuídos na fazenda 4 pontos de bate, agrupando assim as áreas a serem colhidas. A Figura 1 ilustra o mapa da fazenda enquanto a Tabela 1 demonstra os dados da mesma.

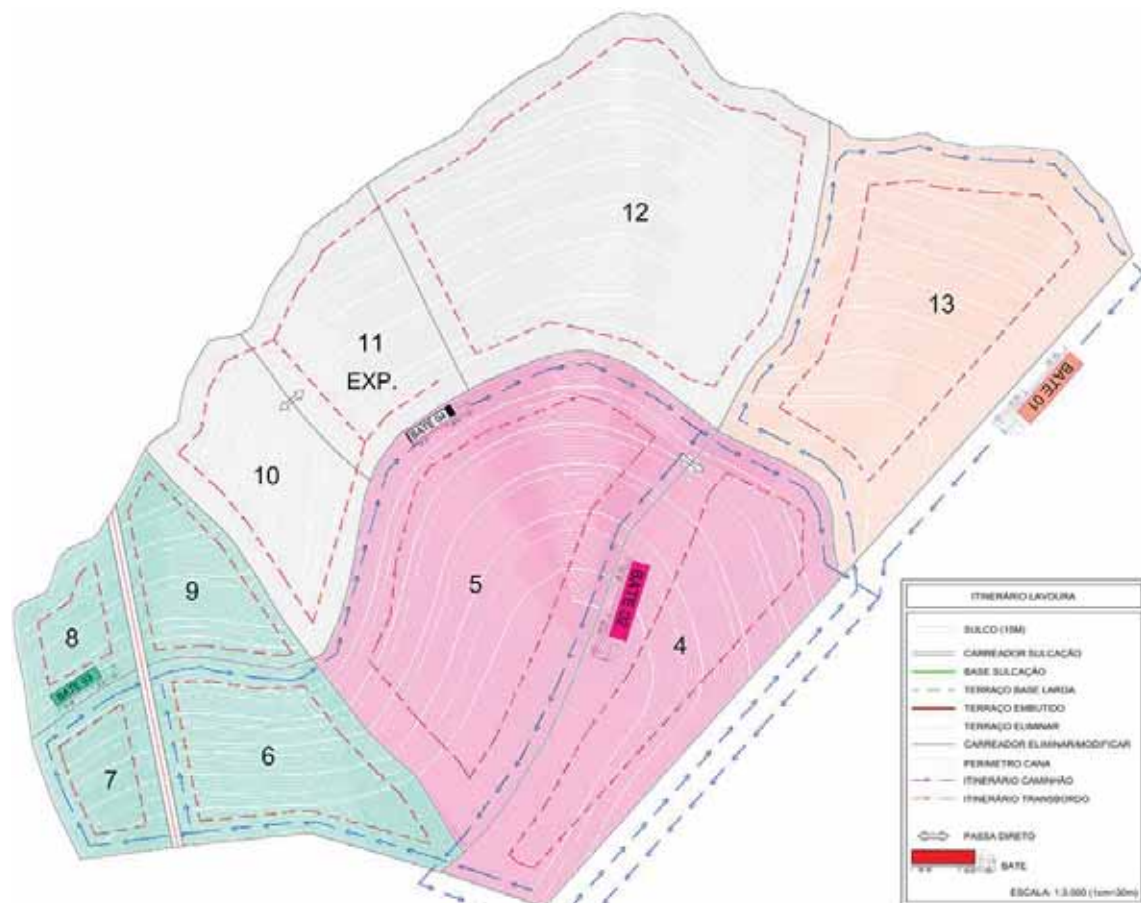


Figura 1: Fazenda utilizada para simulação

Fazenda	Talhão	Bate	Área (ha)	Espaçamento	Cana + Carreador	Estimativa (tch*)
05554	0004	2	24,74	1,5	25,39	88,34
05554	0005	2	36,27	1,5	36,90	88,34
05554	0006	3	14,17	1,5	14,50	88,34
05554	0007	3	5,69	1,5	5,92	88,34
05554	0008	3	5,07	1,5	5,38	88,34
05554	0009	3	7,47	1,5	7,73	88,34
05554	0010	4	11,97	1,5	12,42	88,34
05554	0011	4	11,67	1,5	12,12	88,34
05554	0012	4	41,01	1,5	41,92	76,16
05554	0013	1	32,48	1,5	33,32	76,16

Tabela 1: Dados da fazenda utilizada para simulação

*(tch) Tonelada de cana por hectare

Para os testes realizados com o modelo matemático (1)-(7) foram selecionados os talhões 8 e 9, devido a sua topologia e a utilização da mesma colhedora para ambas áreas. O mapa de plantio destes talhões é apresentado na Figura 2.

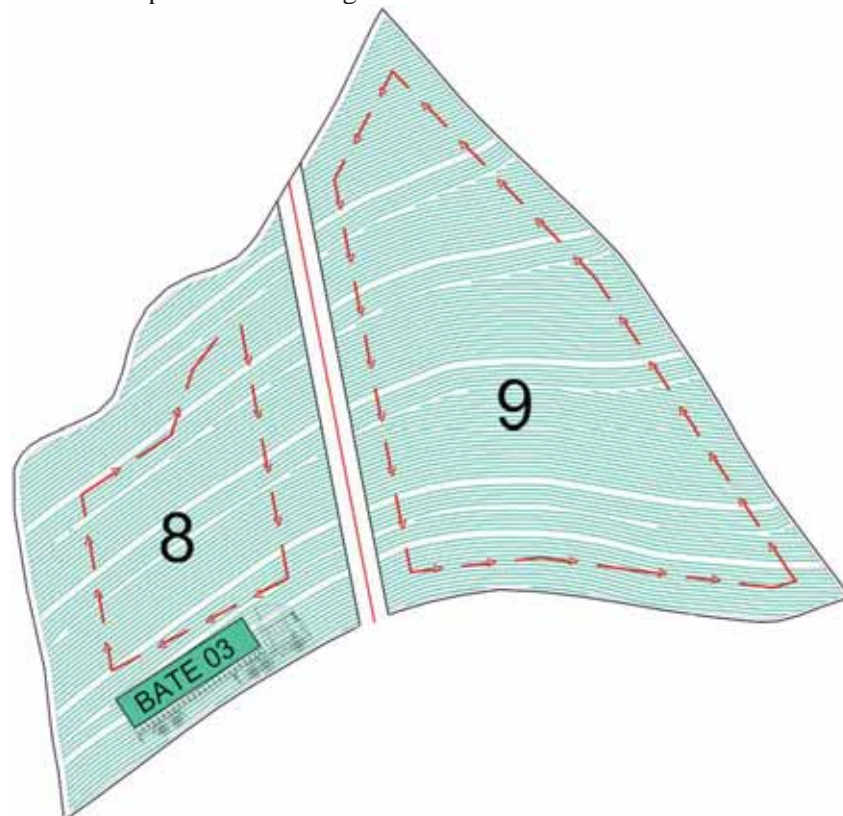


Figura 2: Mapa de Plantio – Talhões 8 e 9

Os dois talhões selecionados somam 12,54ha e são formados por 70 linhas de cana não contínuas e 74 linhas de cana contínuas. Nos testes, foram considerados os tempos de manobra da colhedora de 120 segundos (2 minutos) para mudança de linha de cana e tempo de manobra de 10 segundos para travessia da colhedora sobre o carreador (tiro direto).

Desta forma pode-se verificar que, em um sistema tradicional de colheita, para esta área da fazenda seriam necessárias 217 manobras de mudança de linha de cana da colhedora, totalizando 434 minutos de tempo de manobra da colhedora. Na solução fornecida utilizando modelo matemático (1)-(7) para este caso o tempo total de manobra da colhedora foi de 298

minutos e 20 segundos. Com isso, para uma pequena área analisada, o ganho foi de 135 minutos e 40 segundos ou um ganho de 31,25% no tempo de manobra da colhedora. Além dos ganhos com o tempo da colheita, podemos destacar o ganho com combustível utilizado pela máquina, assim como os ganhos para o meio ambiente.

5. Considerações Finais

Este trabalho envolve um problema real de planejamento da rota da máquina colhedora utilizada no processo de colheita da cana-de-açúcar. Um modelo matemático de otimização para o planejamento do percurso a ser realizado pela colhedora em um processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar foi proposto, objetivando reduzir o tempo de manobra.

Testes computacionais preliminares foram realizados com dados fornecidos por uma indústria de açúcar e álcool e confirmam a eficiência do modelo em fornecer soluções que minimizam o tempo de manobra da colhedora. Na solução obtida, o tempo de manobra total da colhedora foi 31,25% menor do que o tempo de manobra total em um processo de colheita tradicional para a mesma área em que o percurso da colhedora não é planejado.

Visto a importância do setor sucroalcooleiro para a economia nacional e o constante esforço empregado pelo mesmo em busca de otimização no processo de colheita mecanizada, este trabalho vem de encontro à resolução de um problema prático que envolve um dos principais processos de um setor fundamental na economia nacional, mostrando mais uma vez a importância da integração do meio acadêmico com as empresas e os ganhos que ambos podem obter com estudos que possuam impacto quanto a pesquisa e trazendo soluções que viabilizem ainda mais grandes setores econômicos no país.

Como continuidade deste trabalho, mais testes computacionais serão realizados, com instâncias maiores, e outras restrições e considerações serão incorporadas no modelo matemático para melhor representar o problema apresentado pela indústria.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPQ (Processo nº 477481/2013-2).

Referências

- Benedini, S. M.; Conde, J.A.** (2008) Sistematização da área para colheita mecanizada da cana-de-açúcar. *Revista Coplana*, 23, 23-25.
- CONAB** (2014) – Companhia Nacional de Abastecimento – Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar – Safra 2014/15 – Terceiro Levantamento, Brasília, 3, 1-27.
- Eiselt, H. A., Gendreau, M., & Laporte, G.** (1995). Arc routing problems, part II: The rural postman problem. *Operations Research*, 43(3), 399-414.
- Furtado, F.** (2002) Mecanização da colheita da cana traz benefício ambiental, <http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/agricultura-e-agronomia/mecanizacao-da-colheita-da-cana-traz-beneficio>, 2, 2015.
- Moraes, M. A. F. D.** (2007) O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. 4 ed., 605-619, 2007.
- Moraes, M. A. F. D.; Shikida, P. F. A.** (2002). Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios, Atlas, São Paulo, 367-368, 2002.
- Ripoli, M.L.C.; Casagrandi, D.V.** (2006) Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte, Livroceres, 80-91, 2006.
- São Paulo (Estado)** (2007). Resolução SMA n. 33, de 21 de junho de 2007. Disposição sobre aplicação da Lei nº 11.241/2002, com respeito à limitação gradativa da queima de palha de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. [http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual 11241_2002.pdf](http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual%2011241_2002.pdf), 3, 2015
- Silva P. R.; Correa F. C.; Cortez W. J.** (2008) Eng. Agríc., Jaboticabal, v.28, n.2, 292-304.

Williams, H.P. (2008) Model building in mathematical programming. 4th. Ed, Chichester: John Wiley, 354.

