Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-
de-açúcar (*Saccharum spp*) em espaçamento duplo alternado**

João Henrique Mantellatto Rosa

Dissertação apresentada para obtenção
do título de Mestre em Ciências. Área
de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba

2013

João Henrique Mantellatto Rosa

Engenheiro Agrônomo

**Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar
(*Saccharum spp*) em espaçamento duplo alternado**

Orientador:

Prof. Dr. **CASIMIRO DIAS GADANHA JUNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba

2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Rosa, João Henrique Mantellatto

Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) em espaçamento duplo alternado / João Henrique Mantellatto Rosa.- - Piracicaba, 2013.

153 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Colheita 2. Mecanização 3. Ensaio I. Título

CDD 633.61
R788a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIAS

Aos meus pais, Edair Antonio Soares da Rosa (“Osso”) e Maria Cristina Mantellatto Soares Rosa, que sempre abriram mão de certos caprichos para propor oportunidades aos filhos. Além do amor, dedicação e ensinamentos ao longo da vida.

A minha esposa Marisol, pelo apoio e paciência durante os tempos de estudo e desenvolvimento do trabalho.

A todos os meus amigos e familiares que de certa forma contribuíram para me tornar a pessoa que sou, em especial meu irmão Juliano (Aper-ta).

A minha filha Maria Eduarda, razão de todo o esforço e da qual furtei muitas horas lazer e companhia.

Ao professor, co-orientador e amigo Tomaz Caetano Cannavam Ripoli, falecido no dia 24/02/2013, cujas pesquisas ao longo da carreira resultaram em contribuições relevantes ao setor canavieiro, e que sem sua participação a realização deste trabalho não seria possível. Descanse em paz meu amigo

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e a Universidade de São Paulo, pela formação acadêmica e oportunidades de aprendizado.

Aos professores e amigos Casimiro Dias Gadanha Junior e Tomaz Caetano Cannavam Ripoli (em memória) pelo apoio, paciência, dedicação e orientação durante todo curso, especialmente no desenvolvimento desta dissertação.

Aos professores Marcos Milan, José Paulo Molin, Thiago Libório Romanelli, Sonia Maria de Stefano Piedade e Victorio Laerte Furlani Neto, pelos conhecimentos transmitidos e sugestões realizadas.

Ao PECEGE pela oportunidade e incentivo para a realização do mestrado, em especial aos amigos Pedro Valentim Marques, Daniel Yokoyama Sonoda, Leonardo Botelho Zilio e Carlos Eduardo Osorio Xavier, com os quais aprendi muito desde os tempos de estagiário.

A Divisão de Biblioteca e Documentações da ESALQ/USP, em nome de Eliana Maria Garcia e Silvia Maria Zinsly.

A secretaria de pós-graduação do Departamento de Engenharia de Biosistemas, em nome de Davilmar Aparecida Colevatti e Angela Márcia Derigi Silva.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biosistemas, em nome do amigo Áureo Santana de Oliveira.

A Raízen e seus funcionários de campo pelo apoio durante os ensaios.

Aos colegas do curso de pós-graduação, pela amizade e companheirismo.

Obrigado

EPÍGRAFE

“Sofremos demasiado pelo pouco que nos falta
e alegramo-nos pouco pelo muito que temos”

William Shakespeare

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE QUADROS	21
LISTA DE TABELAS	23
LISTA DE SIGLAS	25
1 INTRODUÇÃO	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Importância do setor sucroenergético no Brasil.....	31
2.2 Sistemas de colheita de cana-de-açúcar	37
2.2.1 Panorama da colheita mecanizada de cana-de-açúcar no Brasil.....	40
2.2.2 Desempenho operacional e econômico de colhedoras de cana-de-açúcar.....	44
2.2.3 Diferentes espaçamentos em cana-de-açúcar e suas implicações nas operações mecanizadas.....	64
3 MATERIAL E MÉTODOS	77
3.1 Instrumentos e máquinas	78
3.2 Tratamentos	79
3.3 Caracterização da área de ensaio	79
3.4 Desempenho operacional	81
3.4.1 Mensuração da velocidade operacional	82
3.4.2 Determinação da qualidade e quantidade da matéria-prima colhida	82
3.4.3 Capacidade de colheita	84
3.4.3.1 Capacidade efetiva bruta de matéria-prima	84
3.4.3.2 Capacidade efetiva bruta de colmos	84
3.4.3.3 Capacidade efetiva líquida de colmos	85
3.4.4 Eficácia de manipulação	85
3.4.5 Perdas	87
3.4.6 Consumo de combustível.....	91
3.4.7 Delineamento experimental e análise estatística.....	91
3.5 Desempenho econômico	93
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	99

4.1	Caracterização do canavial: Porte, produtividade agrícola e umidade do solo	99
4.2	Velocidade efetiva de deslocamento (km h^{-1})	101
4.3	Desempenho operacional	101
4.3.1	Capacidade efetiva de colheita	104
4.3.2	Qualidade da operação de colheita	108
4.3.2.1	Matéria estranha mineral (%)	108
4.3.2.2	Matéria estranha vegetal (%).....	110
4.3.2.3	Matéria estranha total (%)	111
4.3.2.4	Perdas de rebolos inteiros (t ha^{-1} e %)	113
4.3.2.5	Perdas de frações de rebolos (t ha^{-1} e %).....	115
4.3.2.6	Perdas de tocos na soqueira (t ha^{-1} e %)	118
4.3.2.7	Perdas de colmos e/ou suas frações (t ha^{-1} e %)	121
4.3.2.8	Perdas totais (t ha^{-1} e %).....	123
4.3.2.9	Perdas de raízes (t ha^{-1}).....	127
4.3.2.10	Eficácia de manipulação.....	129
4.3.3	Consumo de combustível	130
4.4	Desempenho econômico	136
5	CONCLUSÕES	143
	REFERÊNCIAS	147

RESUMO

Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) em espaçamento duplo alternado

Diversos estudos avaliando diferentes espaçamentos em cana-de-açúcar já foram promovidos, sendo que, em geral, os resultados apontam que menores espaçamentos, até certos limites, acarretam em maiores produtividades. A adoção de espaçamentos mais estreitos, entretanto, traz empecilhos para as operações mecanizadas, em especial no que diz respeito à estabilidade dos maquinários e danos à cultura durante as operações, principalmente na colheita. Apesar de não ser novidade, é nesse contexto que volta a tona o espaçamento duplo alternado, que trata de uma variação, a partir de dois valores, na distância entre os sulcos de plantio. A sua adoção, contudo, é muitas vezes questionada, dado o elevado nível de perdas na colheita. Existe, entretanto, uma carência de trabalhos que avaliem as vantagens e desvantagens do sistema, ponderando a questão operacional e econômica. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar o desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar em espaçamento duplo alternado. O ensaio de campo foi realizado no município de Barra Bonita/SP, na Unidade Barra. A variedade colhida foi a SP81-3250, sem queima prévia, em primeiro corte, plantada no espaçamento 0,9 (duplo) x 1,6 metro. A colhedora avaliada foi o modelo 3522, da fabricante John Deere. Para a avaliação do desempenho efetivo foi pré-determinado o uso de duas velocidades de deslocamento, 5 km h⁻¹ e 7 km h⁻¹, sendo que para cada velocidade, foram realizadas 7 repetições. As determinações de campo basearam-se nos conceitos e metodologias propostas por Ripoli e Ripoli (2009), avaliando-se variáveis que remetem à capacidade de colheita, qualidade da operação e consumo de combustível. O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado, aplicando-se o teste F ao nível de significância de 5%. Para análise econômica, desenvolveu-se um modelo, em planilha eletrônica, verificando os custos por tonelada colhida bem como sua relação com os fatores de formação de custos. Sob o aspecto operacional foi constatado que as variáveis que apresentaram diferença estatística remetem-se basicamente a parâmetros de capacidade e consumo de combustível, podendo-se afirmar que sofreram influência da velocidade de deslocamento. As variáveis relacionadas à qualidade da operação não sofreram influência da velocidade. Em análise comparativa com trabalhos em espaçamento simples, verificou-se que a colheita no espaçamento duplo alternado resultou em maiores capacidades de trabalho pela máquina, além de diminuir o consumo de combustível por tonelada colhida, enquanto que em termos de qualidade da operação na colheita, apesar dos valores relacionados à matéria estranha ficaram dentro dos limites aceitáveis, os indicadores de perdas se mostraram elevados. A respeito do desempenho econômico verificou-se que aumento da velocidade da máquina resultou em menores custos de colheita, determinando-se que o ponto ótimo para a relação, nas condições do trabalho, foi de 5,32 km h⁻¹. Comparativamente a trabalhos em espaçamento simples, os custos efetivos de colheita verificados se mostram em torno de 50% mais baixos para o espaçamento duplo alternado. Conclui-se que a adoção do espaçamento duplo alternado se mostra bastante competitiva, desde que determinadas ações sejam tomadas no sentido de manter as perdas em níveis aceitáveis de qualidade.

Palavras-chave: Colheita; Mecanização; Ensaio

ABSTRACT

Evaluation of the effective and economic performance of a sugar cane harvester (*Saccharum* spp) in dual row spacing

Several studies evaluating different row spacings in sugar cane have already been promoted, and, in general, the results indicate that narrow row spacings, up to certain limits, lead to higher yields. The use of narrow row spacings, however, results in complications for mechanized operations, particularly regarding the stability of the machinery and damages to the crops during operations, especially for harvesting. Although it is not new, it is in this context that the dual row spacing is brought back to light, which represents a variation out of two values, in the distance between the furrows planting. Its adoption, however, is often questioned given the high level of harvesting losses. There is, however, a lack of studies that evaluate the advantages and drawbacks of the system, weighing the operational and economic aspects. Thus, the objective of this study was to evaluate the effective and economic performance of a sugar cane harvester in dual row spacing. The field trial was conducted in Barra Bonita, Sao Paulo State, Brazil. The variety harvested was the SP81-3250, with no previous fire, in a first cut, planted in a row spacing of 0.9 (double) x 1.6 meter. The harvester evaluated was the model 3522 from the manufacturer John Deere. In order to evaluate the effective performance, the use of two motion velocities was pre-determined, 5 km h⁻¹ and 7 km h⁻¹, and for each velocity 7 repetitions were performed. The measurements of the field were based on the concepts and methodologies proposed by Ripoli and Ripoli (2009), evaluating variables that refer to the harvesting capacity, quality of operation and fuel consumption. The statistic analyses design was all randomized by applying the F-test at a significance level of 5%. For economic analysis, a model was developed in spreadsheet, checking the costs per ton harvested as well as their relation to the factors of costs formation. From an operational standpoint, it was found that the variables which showed statistical differences relate primarily to parameters of capacity and fuel consumption. Thus we can state that they were influenced by motion velocity. The variables related to the quality of the operation were not influenced by motion velocity. In a comparative analysis with works of single row spacing, it was found that the harvest in dual row spacing resulted in a more intense capacity of work by the machine in addition to reducing fuel consumption per ton harvested, whereas in terms of quality of the harvesting operation, although the values related to foreign matter were within acceptable limits, the indicators of loss were high. Regarding the economic performance, it was found that an increase in the machine velocity resulted in lower harvesting costs and thus it was determined that the optimum for the relations, under the work conditions, was 5,32 km h⁻¹. Compared to other studies of single row spacing, the checked effective costs of harvesting are about 50% lower for dual row spacing. It follows that the adoption of dual row spacing proves itself very competitive, as long as certain actions are taken to keep losses at acceptable levels of quality.

Keywords: Harvesting; Mechanization; Evaluation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da relação entre número de autoveículos licenciados por combustível e consumo interno de etanol, por ano civil.....	32
Figura 2 - Evolução da produção de cana-de-açúcar nos principais países produtores da cultura, em milhões de toneladas.....	33
Figura 3 - Evolução da produção brasileira de cana-de-açúcar, por ano safra.....	34
Figura 4 – Comparativo entre área plantada (mil ha), no período de 2000 a 2010, nos Estados produtores de cana no Brasil.	35
Figura 5 - Evolução da área de produção (milhões de ha) e da produtividade ($t\ ha^{-1}$) brasileira de cana-de-açúcar, por ano civil.....	36
Figura 6 - Evolução da produção brasileira por ano safra de açúcar (milhões de toneladas) e etanol (bilhões de litros).	37
Figura 7 - Sistema de colheita de cana-de-açúcar com subsistemas e interfaces.....	38
Figura 8 - Esquema de uma colhedora de cana picada com destaque para o processamento da matéria-prima e detalhamento dos órgãos ativos	39
Figura 9 - Comparativo entre prazos para eliminação da queima da palha da cana no Estado de São Paulo em áreas mecanizáveis e não mecanizáveis: Protocolo Agroambiental e Lei Estadual n 11.241/02.	42
Figura 10 - Evolução da colheita de cana-de-açúcar (mil hectares) no Centro-sul do Brasil e participação relativa (%) quanto a formas de colheita, manual e mecanizada.	43
Figura 11 - Projeção da população de colhedoras em uso nas usinas.	44
Figura 12 - Capacidade operacional de colheita ($t\ h^{-1}$) em função da produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$).....	61
Figura 13 - Capacidade operacional de colheita ($t\ h^{-1}$) em função da vida útil da máquina (h).	61
Figura 14 - Relação entre capacidade operacional de colheita ($t\ h^{-1}$), produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) e vida da colhedora (h).	62
Figura 15 - Evolução dos custos com reparos e manutenção (mil R\$) e horas de utilização ao longo dos anos.	63
Figura 16 - Custo com reparo e manutenção em relação à média do preço dos equipamentos.	64
Figura 17 - Esquema de espaçamento: uniforme (simples) e duplo alternado.....	65

Figura 18 - Detalhe do corte de base em sulcos duplos e a presença de "tocos altos" e ou arranquio de uma das linhas.....	67
Figura 19 - Disposição de equipamentos (bitola de 3 metros) na colheita mecanizada em espaçamento simples (1,5 metros): a) Vista de frente; b) Vista de trás.	69
Figura 20 - Posições relativas entre os rodados das máquinas empregadas na colheita mecanizada e o espaçamento uniforme de 1,5 metros entre fileiras: Conjunto Trator + Transbordo (a); Colhedora (b).	70
Figura 21 - Posições relativas entre os rodados das máquinas empregadas na colheita mecanizada das principais configurações do espaçamento duplo alternado: 0,90 x 1,50 m (a) e 0,90 x 1,60 m (b).....	70
Figura 22 – Análise comparativa da capacidade operacional de duas colhedoras, sendo uma de fileiras simples (3520) e outra de fileira dupla (3522), de acordo com a produtividade agrícola do canavial.	74
Figura 23 - Análise comparativa do consumo de diesel entre colhedoras de cana, sendo uma de fileiras simples (3520) e outra de fileira dupla (3522), de acordo com a produtividade agrícola do canavial.	74
Figura 24 - Perdas (%) na colheita de cana em diferentes espaçamentos.....	75
Figura 25 - Mapa da área onde foi realizado o ensaio.	77
Figura 26 - Critério para avaliação do porte do canavial.	80
Figura 27 – Sequência de operações para determinação da qualidade e quantidade de matéria prima colhida: a) Tambores para retirada de sub-amostras; b) Colhedora em operação numa determinada repetição; c) Retirada dos tambores do transbordo que acompanhou a colhedora; d) Detalhe dos tambores com matéria-prima colhida e do transbordo instrumentado; e) Separação do material para envio à unidade industrial e; h) Material separado para envio à unidade industrial, de modo a serem realizadas as análises de qualidade.	83
Figura 28 - Sub-amostra demarcada e livre de material remanescente antes de cada repetição.	88
Figura 29 - Recolhimento das perdas remanescentes na área amostral após passagem da colhedora.	89
Figura 30 - Tipos de perdas: A – rebolo inteiro (PRI); B – frações de rebolo (PFR); C – colmos e/ou suas frações (PCF); D – tocos na soqueira (PTS).....	89
Figura 31 - Representação esquemática da área experimental.	92
Figura 32 - Porte do canavial.	99

Figura 33 - Produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	100
Figura 34 - Umidade do solo (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	100
Figura 35 - Velocidade efetiva de deslocamento ($km\ h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	101
Figura 36 - Coeficiente de correlação: Influência da velocidade de deslocamento nas variáveis analisadas.	103
Figura 37 - Capacidade efetiva bruta de matéria prima ($t\ h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	105
Figura 38 - Capacidade efetiva bruta de colmos ($t\ h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	105
Figura 39 - Capacidade efetiva líquida de colmos ($t\ h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	106
Figura 40 - Relação entre capacidade efetiva líquida de colmos ($t\ h^{-1}$) e velocidade de deslocamento ($km\ h^{-1}$).	107
Figura 41 – Comparativo de resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Capacidade efetiva bruta de matéria-prima ($t\ h^{-1}$).	108
Figura 42 – Matéria estranha mineral (%) em cada repetição em cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	109
Figura 43 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Matéria estranha mineral (%).	109
Figura 44 - Matéria estranha vegetal (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	110
Figura 45 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Matéria estranha vegetal (%).	111
Figura 46 - Matéria estranha total (%) e distribuição de cada tipo de impureza em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	112
Figura 47 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Matéria estranha total (%).	112
Figura 48 - Perdas de rebolos inteiros ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	113
Figura 49 - Perdas de rebolos inteiros (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	114

Figura 50 – Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de rebolos inteiros ($t\ ha^{-1}$)	114
Figura 51 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de rebolos inteiros (%).....	115
Figura 52 - Perdas de fração de rebolos ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	116
Figura 53 - Perdas de fração de rebolos (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	116
Figura 54 – Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de frações rebolos ($t\ ha^{-1}$).....	117
Figura 55 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de frações de rebolos (%).....	117
Figura 56 - Perdas de tocos na soqueira ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	119
Figura 57 - Perdas de tocos na soqueira (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	119
Figura 58 – Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de tocos na soca ($t\ ha^{-1}$).....	120
Figura 59 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de tocos na soca (%)	120
Figura 60 - Perdas de colmos e/ou suas frações ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	121
Figura 61 - Perdas de colmos e/ou sua frações (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	122
Figura 62 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de colmos e/ou suas frações ($t\ ha^{-1}$).....	122
Figura 63 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de colmos e/ou suas frações (%).....	123
Figura 64 - Perdas totais ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	124
Figura 65 - Perdas totais (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	124
Figura 66 - Participação relativa (%) de cada tipo de perda, nas perdas totais.....	125

Figura 67 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas totais ($t\ ha^{-1}$).....	126
Figura 68 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas totais (%).	127
Figura 69 - Perdas de raízes ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	128
Figura 70 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de raízes ($t\ ha^{-1}$).....	128
Figura 71 - Eficácia de manipulação (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	129
Figura 72 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Eficácia de manipulação (%).....	130
Figura 73 - Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima ($L\ h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	131
Figura 74 - Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima ($L\ t^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.....	131
Figura 75 - Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de colmos ($L\ t^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	132
Figura 76 - Consumo de combustível na capacidade efetiva líquida de colmos ($L\ t^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	132
Figura 77 - Relação entre consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima ($L\ h^{-1}$) e velocidade de deslocamento ($km\ h^{-1}$).....	133
Figura 78 - Relação entre consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima ($L\ t^{-1}$) e velocidade de deslocamento ($km\ h^{-1}$).....	134
Figura 79 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Consumo de combustível ($L\ h^{-1}$)	135
Figura 80 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Consumo de combustível ($L\ t^{-1}$)	135
Figura 81 - Estimativa do custo de colheita ($R\$\ t^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias.	137
Figura 82 - Relação entre custo de colheita ($R\$\ t^{-1}$) e velocidade de deslocamento ($km\ h^{-1}$).137	
Figura 83 - Análise de sensibilidade: Impacto no custo de colheita mediante variações individuais de $\pm 10\%$ nos fatores de formação.....	139

Figura 84 - Custo de colheita (R\$ t ⁻¹) mediante variações percentuais nos principais fatores de formação de custos.....	140
Figura 85 - Comparativo entre os resultados da pesquisa e simulação com valores de trabalhos que tratam de espaçamento simples: Custos de colheita (R\$ t ⁻¹).....	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Compactação do solo frente a diferentes espaçamentos de cana-de-açúcar.	68
Quadro 2 - Comparativo entre as principais características dos modelos de colhedoras mais comercializados no Brasil.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da matriz energética brasileira (%).....	31
Tabela 2 - Prazos para eliminação da queima cana-de-açúcar: áreas mecanizáveis e não mecanizáveis.....	41
Tabela 3 - Classificação de níveis de perdas (%) e matéria estranha (%) na colheita de cana-de-açúcar.....	46
Tabela 4 - Desempenho operacional da colhedora Santal Amazón atuando em duas variedades sob diferentes condições de canavial, com e sem queima prévia.	47
Tabela 5 - Médias do desempenho operacional de três diferentes modelos de colhedoras, sob quatro velocidades de operação (km h^{-1}).....	48
Tabela 6 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em quatro velocidades de deslocamento.....	49
Tabela 7 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em quatro velocidades (1,5; 3,0; 5,0 e 7,0 km h^{-1}) atuando em cana crua.....	50
Tabela 8 - Desempenho operacional de colhedora de cana em 4 velocidades - Máquina "A".	51
Tabela 9 - Desempenho operacional de colhedora de cana em 4 velocidades - Máquina "B".	51
Tabela 10 - Desempenho operacional da colhedora Case Austoft em diferentes situações de canavial quanto a porte e queima prévia	52
Tabela 11 - Desempenho operacional de colhedora em duas localidades, Erode e Baramati, na Índia.	52
Tabela 12 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar atuando em dois tipos de colheita: crua convencional (T1) e integral (T2).	53
Tabela 13 - Desempenho operacional e econômico da colhedora CAMECO em condições de colheita convencional e integral.	54
Tabela 14 - Desempenho operacional e econômico da colhedora CASE em condições de colheita convencional e integral.	55
Tabela 15 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em quatro velocidades (3,0; 4,5; 6,0 e 8,0 km h^{-1}) atuando em cana crua.....	56
Tabela 16 - Desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar operando em velocidade de deslocamento de 5 km h^{-1} : John Deere 3520 (JD); Santal Tandem (SANT); Case 8800 (CASE).	57

Tabela 17 - Desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar operando em velocidade de deslocamento de 7 km h ⁻¹ : John Deere 3520 (JD); Santal Tandem (SANT); Case 8800 (CASE).....	58
Tabela 18 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em duas velocidades de deslocamento sob duas condições de canavial: Submetido à aplicação de dessecante (P) e testemunha (T).....	59
Tabela 19 - Desempenho operacional de um protótipo de colhedora, em diferentes velocidades de deslocamento (V1 – 5,7 km h ⁻¹ ; V2 – 7,0 km h ⁻¹ ; V3 – 8,5 km h ⁻¹) e do exaustor primário (E1 – 1.500 rpm; E2 – 1.000 rpm), e o comparativo com uma colhedora de referência (Velocidade – 6,50 km h ⁻¹ ; Velocidade do exaustor – 1.200 rpm).	60
Tabela 20 - Índices técnicos de colheita mecanizada para a safra 2011/12.....	62
Tabela 21 - Custo horário de colhedoras e principais componentes de custos.	63
Tabela 22 - Metros de sulco por hectare e distância percorrida pela colhedora de acordo com espaçamento adotado.	72
Tabela 23 - Comparativo entre colhedoras de uma e duas fileiras sobre consumo de diesel por tonelada colhida (L t ⁻¹).....	73
Tabela 24 – Resultados da análise de variância e Teste de Tukey (5%) para cada variável. .	102
Tabela 25 - Participação relativa (%) dos elementos de formação de custos da colhedora....	138

LISTA DE SIGLAS

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONSECANA-SP – Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MODERFROTA – Programa de Modernização da Frota de Tratores Agrícolas e Implementos Associados e Colheitadeiras

MME – Ministério de Minas e Energia

PECEGE – Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas

PIB – Produto Interno Bruto

PROÁLCOOL – Programa Nacional do Alcool

PRONAMP – Programa Nacional de Apoio ao Médio Produtor Rural

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por combustíveis renováveis em detrimento a utilização de combustíveis fósseis vem colocando o Brasil em situação ímpar quando a questão é energia, visto que a participação de fontes renováveis é crescente e já chega a quase 50% da matriz energética nacional, o que a torna a mais renovável do mundo. Nesse contexto, a cana-de-açúcar e seus derivados tem papel importante. Impulsionada principalmente pela introdução de veículos *flex-fuel*¹, na última década a participação da cana e derivados assumiu o segundo lugar na matriz, ultrapassando a energia hidráulica e ficando atrás apenas do petróleo e seus derivados. Além disso, os recentes investimentos em bioeletricidade ou co-geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço e da palha de cana-de-açúcar, revelam que o setor é visto como um dos pilares energéticos para os próximos anos.

Essa nova fase da agroindústria canavieira, entretanto, vem sendo constantemente questionada, sobretudo quanto a aspectos relacionados à sustentabilidade da produção. Juntamente com a questão da acelerada expansão da cultura no país, a prática da queima em pré-colheita é recorrentemente colocada em pautas de discussão.

A queima prévia da cana-de-açúcar é realizada de modo a facilitar a etapa de corte da matéria-prima na operação agrícola de colheita. Apesar de ser um facilitador do ponto de vista operacional a prática da queimada traz implicações negativas, relacionadas, principalmente, a questões ambientais. Perante tal situação, mecanismos legislativos específicos vêm sendo criados, de modo a evitar ou permitir, sob determinadas condições, o uso do fogo em canaviais. Dessa forma, os principais estados produtores e fronteiras de expansão da cana-de-açúcar já possuem normas específicas para tratar da eliminação da queima. Em São Paulo, maior estado produtor de cana, a mobilização é a mais significativa e a que apresenta os menores prazos, com previsão de eliminação total da queima para 2017.

Dado as questões legislativas, bem como a crescente escassez de mão-de-obra e exigências quanto a condições de trabalho, a adoção da colheita mecanizada torna-se essencial para o processo produtivo da cana-de-açúcar, apresentando, inclusive, aumentos consideráveis nos últimos anos.

¹ Motor com tecnologia que permite o uso de etanol, gasolina ou a mistura de ambos em quaisquer proporções (DI GIULIO, 2006).

Apesar de o Brasil possuir uma extensa área apta à expansão da cana, pesquisas em aumentos de produtividade devem ser promovidas, visto que a expansão de áreas requer altos investimentos e deve ser submetida a um planejamento de longo prazo, analisando-se questões técnicas, econômicas e ambientais, de modo que o crescimento seja realizado de forma sustentável.

O cultivo de cana-de-açúcar, assim como as demais culturas agrícolas, está condicionado a fatores de produção controláveis e não controláveis que impactam na produtividade. Os fatores não controláveis estão atrelados, principalmente, a condições climáticas. Os fatores controláveis, por sua vez e como o próprio termo diz, são fatores passíveis de modificação, respeitando-se, evidentemente, certo nível de interferência específico. Dentre os fatores controláveis em cana-de-açúcar, o espaçamento entre fileiras vem sendo exaustivamente estudado, sendo que historicamente estudos apontam que menores espaçamentos, até certos limites, acarretam em maiores produtividades.

A adoção de espaçamentos mais estreitos, entretanto, traz alguns problemas para as operações mecanizadas, em especial no que diz respeito à estabilidade dos maquinários e danos à cultura durante as operações, principalmente na colheita. Além disso, tem que se considerar a questão do parque de máquinas dos produtores e usinas envolvidos na produção de cana, cuja renovação não é simples e imediata, visto os altos investimentos já realizados. Torna-se necessário, portanto, um sistema que incorpore os ganhos de produtividade dos menores espaçamentos com a questão operacional de produção.

Apesar de não ser novidade, é nesse contexto que volta a tona o espaçamento duplo alternado, que trata de uma variação na distância entre os sulcos de plantio, confeccionados, em geral, na distância de 0,90 (duplo) x 1,60 metro. Tal sistema permite a colheita simultânea de duas fileiras de cana, aumentando, teoricamente, a capacidade de colheita pela colhedora, além de um maior controle de tráfego, dado o maior espaço destinado aos rodados das máquinas. O sistema do espaçamento duplo alternado, contudo, não é adotado por muitas usinas e fornecedores, visto o elevado nível de perdas de colheita associado ao sistema. Existe uma carência, entretanto, de trabalhos que avaliem as vantagens e desvantagens do sistema, ponderando a questão operacional e econômica.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar em espaçamento duplo alternado, sob duas velocidades, em canavial sem queima prévia. A questão da variação da velocidade é verificar

ainda, a influência desta nas variáveis associadas ao desempenho da máquina, em especial à aspectos relacionados à qualidade do processamento de colheita. Além disso, dado que nos últimos anos os ensaios com colhedoras de cana-de-açúcar vêm sendo realizados, no geral, apenas em espaçamentos simples, o trabalho visa fornecer informações de modo a subsidiar discussões que auxiliem a tomada de decisão pelos agentes envolvidos no processo de colheita de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância do setor sucroenergético no Brasil

A crescente demanda por combustíveis renováveis em detrimento a utilização de combustíveis fósseis, estimulada principalmente por questões de ordem ambiental, vem colocando o Brasil em situação ímpar quando a questão é energia. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME (BRASIL, 2011a), a participação de energia renovável na matriz energética do país cresceu cerca de 6 pontos percentuais, passando de 39,3% em 2001 para 45,5% em 2010, sendo o Brasil, o país com a matriz mais renovável do mundo.

Como se pode observar na Tabela 1, a responsabilidade por esse crescimento pode ser atribuída principalmente à cana-de-açúcar e seus derivados, cuja participação na matriz passou de 11,80% para 17,80% no período analisado, fazendo com que tal fonte assumisse o segundo lugar na matriz energética, ultrapassando a energia hidráulica e ficando atrás apenas do petróleo e seus derivados.

Tabela 1 – Evolução da matriz energética brasileira (%)

Fonte	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Energia não Renovável	60,7	58,8	56,3	56,2	55,5	55,0	54,3	54,1	52,8	54,5
Petróleo e Derivados	45,4	43,0	40,1	39,1	38,7	37,8	37,5	36,6	37,9	37,6
Gás Natural	6,5	7,4	7,7	8,9	9,4	9,6	9,3	10,3	8,7	10,3
Carvão Mineral e Coque	6,9	6,5	6,7	6,7	6,3	6,0	6,0	5,8	4,7	5,2
Urânio	2,0	1,9	1,8	1,5	1,2	1,6	1,4	1,5	1,4	1,4
Energia Renovável	39,3	41,2	43,7	43,8	44,5	45,0	45,7	45,9	47,2	45,5
Hidráulica e Eletricidade	13,6	14,0	14,6	14,4	14,8	14,8	14,9	14,0	15,2	14,0
Lenha e Carvão Vegetal	11,6	11,9	12,9	13,2	13,0	12,6	12,0	11,6	10,1	9,7
Derivados da Cana	11,8	12,8	13,4	13,5	13,8	14,6	15,9	17,0	18,2	17,8
Outras Renováveis	2,40	2,5	2,8	2,7	2,9	3,0	2,9	3,4	3,8	4,0

Fonte: BRASIL (2011a).

De acordo Milanez, Barros e Faveret Filho (2008), o crescimento do setor sucroalcooleiro foi impulsionado principalmente pela introdução de veículos *flex-fuel* na frota brasileira. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores –

ANFAVEA (2011), 84% dos veículos licenciados no país em 2009 foram *flex-fuel*, valor este correspondente a cerca de 2,7 milhões de veículos. Ao relacionar a evolução do licenciamento de veículos com o consumo interno de etanol, a partir de dados do Ministério da Agricultura e Pecuária do Brasil – MAPA (BRASIL, 2011b), é notável a coincidência das curvas (Figura 1).

Figura 1 - Evolução da relação entre número de autoveículos licenciados por combustível e consumo interno de etanol, por ano civil

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do BRASIL (2011b) e ANFAVEA (2011).

Há tempos o Brasil é considerado referência em produção de cana-de-açúcar, e esse status vêm se tornando ainda mais expressivo nos últimos anos. Como se observa na Figura 2, elaborada a partir de dados da Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (2012), enquanto que a produção de cana nos principais países produtores vem mantendo-se, de certa forma, constante nos últimos anos, a produção brasileira segue em tendência de crescimento. No ano de 2008, o Brasil produziu cerca de 650 milhões de toneladas de cana, o equivalente a pouco mais de 20% dos 2,9 bilhões de toneladas produzidas em todo mundo.

Figura 2 - Evolução da produção de cana-de-açúcar nos principais países produtores da cultura, em milhões de toneladas

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da FAO (2012).

Na Figura 3 é possível evidenciar de forma mais clara esse crescimento. Considerando o período que vai da safra 1975/76 (ano correspondente a criação do Programa Nacional do Alcool – PROÁLCOOL) até a safra 2011/12, a produção brasileira de cana passou de cerca de 70 milhões de toneladas para 561 milhões de toneladas, com pico na safra de 2010/11, onde a produção ficou em torno de 620 milhões de toneladas (BRASIL, 2011b). Na safra 2012/13, a produção já acumula pouco mais de 540 milhões de toneladas (BRASIL, 2012a), sendo que a previsão para o fechamento de safra, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2012) é de 595 milhões de toneladas.

*Os valores para a safra 2012/13 estão acumulados até 01/12/2012

Figura 3 - Evolução da produção brasileira de cana-de-açúcar, por ano safra

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados de BRASIL (2011b) e (BRASIL, 2012a).

Esse crescimento vertiginoso da produção é justificado tanto pelo crescimento horizontal quanto pelo crescimento vertical dos canaviais brasileiros. Como se observa na Figura 4, elaborada a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2012), a área plantada com cana-de-açúcar no Brasil praticamente dobrou em 10 anos, passando de 4,8 milhões de hectares plantados em 2000 para pouco mais de 9,1 milhões em 2010. Dentre os Estados, destaque para os crescimentos nas regiões tradicionalmente produtoras da cultura, São Paulo e Paraná, que apresentaram no período considerado, crescimentos de cerca de 100% e, nas fronteiras agrícolas de expansão, como Goiás e Mato Grosso do Sul, com crescimento em torno de 300%.

Figura 4 – Comparativo entre área plantada (mil ha), no período de 2000 a 2010, nos Estados produtores² de cana no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do IBGE (2012).

Quando se relaciona os crescimentos de área com produção por área (Figura 5), verifica-se que apesar do crescimento do primeiro ser maior, o segundo, no caso, a produtividade, também sofreu incrementos consideráveis. Dados os maiores investimentos em tecnologias aplicadas à produção de cana, em especial relacionadas ao melhoramento genético, e melhorias nas práticas culturais, como melhor controle de plantas daninhas e pragas, além de um maior acesso por parte dos produtores aos insumos utilizados no processo produtivo, como defensivos agrícolas, corretivos e fertilizantes, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar passou de 46 t ha⁻¹ em meados dos anos 70, para 80 t ha⁻¹ em 2009.

² AL – Alagoas; GO – Goiás; MG – Minas Gerais; MS – Mato Grosso do Sul; MT – Mato Grosso; PE – Pernambuco; PR – Paraná; RJ – Rio de Janeiro; SP – São Paulo.

Figura 5 - Evolução da área de produção (milhões de ha) e da produtividade ($t\ ha^{-1}$) brasileira de cana-de-açúcar, por ano civil

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do BRASIL (2011b).

Em termos de produção de açúcar e etanol, o Brasil produziu na última safra cerca de 36 milhões de toneladas de açúcar e 23 bilhões de litros de etanol (Figura 6), apresentando quedas consideráveis em relação à safra 2010/11, em torno de 17% para o etanol e 5% para o açúcar (BRASIL, 2011b). Nota-se que a diferença no caso do etanol é maior, o que se deve além da queda na produtividade agrícola, à diminuição relativa do mix de produção³ para o produto. Na safra 2012/13, a produção de etanol já acumula cerca de 22 bilhões de litros e a de açúcar pouco menos de 35 milhões de toneladas (BRASIL, 2012a), esperando-se que até o fechamento da safra os valores fiquem em torno de 5% superiores a safra 2011/12 (CONAB, 2012). Atualmente o país é o maior produtor mundial de açúcar e o segundo maior produtor de etanol, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, que produziram pouco mais de 49,3 bilhões de litros em 2010⁴ (MAFIOLETTI; MARTINS; TURRA, 2011).

³ O mix de produção releva quanto de cana-de-açúcar foi destinado para a produção de açúcar e etanol.

⁴ O etanol nos Estados Unidos é produzido a partir de milho, apresentando balanço energético bem inferior à produção de etanol via cana-de-açúcar.

* Os valores para a safra 2012/13 estão acumulados até 01/12/2012

Figura 6 - Evolução da produção brasileira por ano safra de açúcar (milhões de toneladas) e etanol (bilhões de litros)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados de BRASIL (2011b) e (BRASIL, 2012a)

Hoje o país possui uma estrutura com 430 unidades industriais processadoras de cana-de-açúcar e cerca de 70 mil fornecedores da matéria-prima, gerando 1,2 milhões de empregos diretos, de acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2012a). Ainda segundo a entidade, espera-se que até 2020 os investimentos no setor somem mais de R\$ 150 bilhões, gerando 350 mil empregos adicionais e 700 mil empregos indiretos adicionais, além da requalificação de 20 a 25 mil trabalhadores por ano, em especial no que se refere à mão de obra que migra do corte manual. É nesse contexto que se estima a duplicação do PIB (Produto Interno Bruto) do setor, passando de atuais US\$ 48 bilhões para US\$ 90 bilhões em 2020 (UNICA, 2012b).

2.2 Sistemas de colheita de cana-de-açúcar

O processo de colheita da cana-de-açúcar é o principal componente do custo operacional de produção, representando cerca de 40% do total (PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS – PECEGE,

2012). Considerando que a matéria-prima representa em torno de 60% de custo de produção do açúcar e etanol (CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CONSECANA/SP, 2006), nota-se que a colheita é um dos maiores, senão o maior, dispêndio da cadeia sucroenergética como um todo.

Do ponto de vista fisiológico, a colheita representa o final do ciclo de crescimento e maturação da cultura (RIPOLI; RIPOLI, 2009), sendo a expressão máxima, por meio de produtividade e concentração de açúcares, das técnicas de manejo aplicadas bem como das condições edafoclimáticas do local de cultivo. Sob a ótica operacional, independente do sistema adotado (RIPOLI, 1996), a colheita inicia-se com o corte da cana-de-açúcar no campo e seu respectivo transporte, e só se encerra quando a matéria-prima é finalmente entregue à moagem na unidade industrial (RIPOLI; RIPOLI, 2009), sendo composto, portanto, por subsistemas, como ilustra a Figura 7.

Figura 7 - Sistema de colheita de cana-de-açúcar com subsistemas e interfaces

Fonte: RIPOLI (1996).

Considerando que o transporte da matéria-prima até o parque industrial é realizado por máquinas, em geral caminhões ou tratores com carretas, o subsistema de “corte e carregamento” é o segmento que caracteriza o sistema, diferenciando basicamente quanto à utilização de maquinaria. Segundo Ripoli e Ripoli (2009), os sistemas de colheita de cana-de-açúcar em utilização no Brasil e no mundo podem ser classificados em três grupos: i) manual – corte e carregamento são realizados de forma manual; ii) semimecanizado – corte manual e carregamento mecanizado, por meio de carregadoras e; iii) mecanizado – tanto o corte como o

carregamento são realizados através de máquinas. Dado uma série de fatores que será detalhado no item a seguir (2.2.1), o sistema mecanizado vem se tornando a principal forma de colheita de cana-de-açúcar no Brasil.

Dentre as máquinas disponíveis para a colheita de cana-de-açúcar, as denominadas “combinadas” ou colhedoras de cana picada ganham destaque, principalmente, em função do número de etapas que desempenham. Tais máquinas realizam o corte basal da matéria-prima, promovendo a eliminação parcial da matéria-estranha, vegetal e mineral, e fracionando os colmos em rebolos de 15 a 40 cm, que posteriormente são descarregados em unidades de transporte ou transbordo (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

A Figura 8 ilustra uma colhedora de cana picada, destacando os sistemas de processamento da matéria-prima. Como se pode observar, a primeira etapa quanto à atuação da colhedora é o corte dos ponteiros por meio do despontador (cortador de pontas), sendo que, posteriormente, o sistema de alimentação, constituído pelos divisores de linha, rolos alimentador e tombador, direciona a fileira de cana-de-açúcar para o corte de base, realizado, por sua vez, por discos rotativos com lâminas. Em seguida, rolos alimentadores e transportadores conduzem as canas para os picadores, que fracionam a matéria-prima em rebolos. Próximo ao picador se encontra o extrator primário, que retira parte das impurezas agregadas à matéria-prima. Essa cana, previamente “limpa” é conduzida no elevador de taliscas, sendo que na parte superior, antes que seja feito o descarregamento dos rebolos no transbordo, é feita uma segunda limpeza, por meio do extrator secundário (NEVES, 2003).

Figura 8 - Esquema de uma colhedora de cana picada com destaque para o processamento da matéria-prima e detalhamento dos órgãos ativos

Fonte: Neves (2003)

2.2.1 Panorama da colheita mecanizada de cana-de-açúcar no Brasil

A queima da cana-de-açúcar anteriormente à colheita é realizada de modo a facilitar o corte da matéria-prima, promovendo maior capacidade de colheita e segurança ao cortador no momento da operação. Apesar de ser um facilitador do ponto de vista operacional, a prática da queimada traz implicações negativas, podendo-se citar: liberação de gases que contribuem para o aumento do aquecimento global, como o monóxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (NO₂), e a diminuição da biodiversidade animal e vegetal (RONQUIM, 2010).

Dado o conhecimento de tais consequências bem como fato de que a conscientização ambiental por práticas sustentáveis vem crescendo ao longo dos anos, mecanismos legislativos específicos vêm sendo criados, de modo a evitar ou permitir, sob determinadas condições, o uso do fogo em canaviais (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

Segundo Moraes (2007), Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e São Paulo – principais Estados produtores e fronteiras de expansão da cana-de-açúcar, conforme salientado no item 2.1 – já possuem normas específicas para tratar da eliminação da queima. Desses, São Paulo, cuja produção responde 55% da produção de cana no Brasil (UNICA, 2012c), é o Estado com maior mobilização, apresentando os menores prazos.

A Lei Estadual Nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar (Tabela 2), estabelece que até 2031 toda a colheita de cana-de-açúcar deve ser realizada sem a prática da queima prévia, sendo que para áreas onde é possível a utilização de mecanização, o prazo final é 2021.

Tabela 2 - Prazos para eliminação da queima cana-de-açúcar: áreas mecanizáveis e não mecanizáveis

ANO	ÁREA MECANIZÁVEL*	PERCENTAGEM DE ELIMINAÇÃO
1º ano (2002)	20% da área cortada	20% da queima eliminada
5º ano (2006)	30% da área cortada	30% da queima eliminada
10º ano (2011)	50% da área cortada	50% da queima eliminada
15º ano (2016)	80% da área cortada	80% da queima eliminada
20º ano (2021)	100% da área cortada	Eliminação total da queima

ANO	ÁREA NÃO MECANIZÁVEL**	PERCENTAGEM DE ELIMINAÇÃO
10º ano (2011)	10% da área cortada	10% da queima eliminada
15º ano (2016)	20% da área cortada	20% da queima eliminada
20º ano (2021)	30% da área cortada	30% da queima eliminada
25º ano (2026)	50% da área cortada	50% da queima eliminada
30º ano (2031)	100% da área cortada	100% da queima eliminada

* Plantações em terrenos acima de 150 ha (cento e cinquenta hectares), com declividade igual ou inferior a 12% (doze por cento), em solos com estruturas que permitam a adoção de técnicas usuais de mecanização da atividade de corte de cana.

** Plantações em terrenos com declividade superior a 12% (doze por cento), em demais áreas com estrutura de solo que inviabilizem a adoção de técnicas usuais de mecanização da atividade de corte de cana.

Entretanto, em 2007, a UNICA, órgão que representa a indústria paulista produtora de açúcar, etanol e bioeletricidade, assinou em conjunto com o Governo de São Paulo, o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista. Tal documento trata, entre outros, da antecipação dos prazos de eliminação da queima para 2014 em áreas mecanizáveis e 2017 para áreas não mecanizáveis, conforme ilustra a Figura 9. Apesar de ser um protocolo de adesão voluntária, de acordo com a Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Estado de São Paulo (2012), 173 unidades agroindustriais – o que corresponde a mais de 90% do parque industrial paulista – e 5.400 fornecedores de cana-de-açúcar, por meio de 29 associações que representam 21,7% da área de cana do Estado, já aderiram ao protocolo.

Figura 9 - Comparativo entre prazos para eliminação da queima da palha da cana no Estado de São Paulo em áreas mecanizáveis e não mecanizáveis: Protocolo Agroambiental e Lei Estadual n 11.241/02

Fonte: UNICA (2012d), adaptado pelo autor.

Além das questões legislativas já expostas, a crescente escassez de mão-de-obra e as exigências quanto a condições de trabalho, sobretudo no que diz respeito à segurança e medicina laboral, como por exemplo, a Norma Regulamentadora 31 (NR 31), contribuem para a extinção da colheita manual nos próximos anos, principalmente na região Centro-Sul canavieiro⁵.

Outro ponto que vale destacar em relação à colheita realizada de forma crua, são os recentes investimentos em bioeletricidade ou co-geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço e da palha de cana-de-açúcar. O fornecimento funciona como um complemento à geração hidrelétrica, visto que a bioeletricidade é gerada durante a safra, que coincide com o período de seca, onde os níveis dos reservatórios de água ficam baixos. Em 2011 apenas 30% das unidades industriais estavam conectadas à rede de energia elétrica, ofertando pouco mais 1.000 MW. Até a safra de 2010/2021, o potencial de exportação de energia elétrica pelo setor é de pouco mais de 13.000 MW, o equivalente a 3 vezes a produção da usina hidrelétrica de Belo Monte (UNICA, 2011). Além disso, o uso de bagaço para geração de energia elétrica permite reduzir as emissões de carbono para a atmosfera, visto que substitui o óleo combustível queimado nas termelétricas convencionais, sendo tal redução, inclusive, elegível

⁵ Compreende os estados de: Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo.

para a obtenção de créditos de carbono, conforme termos do Protocolo de Quioto (BNDES, 2008).

Dado os aspectos apresentados, nota-se, que a colheita mecanizada é inevitável e vem crescendo ao longo dos anos, em especial na última década. No Centro-Sul canavieiro, que responde por 88% da produção de cana-de-açúcar (UNICA, 2012), o percentual de colheita mecanizada passou de 28% em 2000 para 80% em 2011, conforme Figura 10. Nas fronteiras de expansão canavieira, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás – regiões que permitem a utilização de mecanização de intensiva – os valores ficam em torno dos 85% (PAES, 2011).

Figura 10 - Evolução da colheita de cana-de-açúcar (mil hectares) no Centro-sul do Brasil e participação relativa (%) quanto a formas de colheita, manual e mecanizada

Fonte: Paes (2011).

Ao contrário de outras máquinas agrícolas, como colhedoras de grãos e tratores, cujo detalhamento de mercado é feito de forma bastante minuciosa, informações quanto ao mercado de colhedoras de cana ainda tratam-se de estimativas. As principais fabricantes (John Deere, Case e Santal) estimam que em 2011 foram comercializadas no Brasil cerca de 1.000 colhedoras de cana, volume quase que 50% inferior ao ano de 2010, dado os efeitos da crise de 2009 (FRAGA, 2009). Avalia-se que a frota atual de colhedoras em operação gira em torno de 6.500 máquinas, sendo que a projeção para 2020 é que esse número chegue a pouco mais 10.000 máquinas, conforme Figura 11.

Figura 11 - Projeção da população de colhedoras em uso nas usinas

Fonte: Elias; Pinto, (2008).

2.2.2 Desempenho operacional e econômico de colhedoras de cana-de-açúcar

Ripoli & Ripoli (2009) definem, com base em vários autores, que o desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar é o conjunto de atributos que determinam o grau de habilitação da máquina para a execução da operação de colheita, cuja caracterização abrange aspectos de capacidade de colheita, qualidade do processamento do produto colhido (perdas e matéria estranha), funcionalidade mecânica e ergonomia e segurança.

De acordo com Mialhe (1996), a capacidade de trabalho de máquinas e implementos agrícolas pode ser expressa pela quantidade de trabalho realizada perante determinada unidade de tempo. No caso de colhedoras, entretanto, sabe-se que as diferenças de produtividade afetam a capacidade de trabalho da máquina, sendo que, portanto, a quantidade trabalho realizada deve ser aferida a partir da quantidade de produto colhido. Assim, no caso de colhedoras, entende-se que capacidade de trabalho é sinônimo de capacidade de colheita.

Segundo Ripoli e Ripoli (2009), a capacidade de máquinas colhedoras de cana-de-açúcar pode ser caracterizada a partir dos parâmetros de capacidade teórica, efetiva e operacional, sendo a primeira, como o próprio termo sugere, de aspecto teórico, e as outras duas analisadas em nível de campo.

A capacidade teórica revela a maior quantidade de trabalho que a colhedora consegue desenvolver, sendo determinada a partir das características do projeto (Ripoli e Ripoli, 2009).

Segundo Mialhe (1974), a capacidade de campo teórica pode ser calculada pela equação (1), que relaciona, basicamente, a largura da operação com a velocidade de deslocamento.

$$CCT (ha. h^{-1}) = \frac{L \times V}{10} \quad (1)$$

Sendo:

CCT = Capacidade de campo teórica, em ha h⁻¹.

L = Largura de trabalho teórica da operação, em metros.

V = Velocidade deslocamento, em km h⁻¹.

Para o presente trabalho, tal conceito é de extrema importância, pois se admite inicialmente que a capacidade de trabalho da colhedora de duas fileiras será superior a dos trabalhos que constam de colheita em espaçamento simples, levando-se em conta apenas o fator “largura de trabalho”. A respeito da velocidade de deslocamento, Ripoli e Ripoli (2009) descrevem que a mesma é diretamente influenciada pelas condições da cultura e do terreno, e que em geral as máquinas trabalham numa faixa de velocidade entre 4 e 6 km h⁻¹, apesar das especificações dos fabricantes estabelecerem patamares de até 9 km h⁻¹. Tamanha diferença, segundo os autores, esta possivelmente relacionada à falta de sistematização⁶ adequada dos talhões para a colheita mecânica.

No caso da capacidade efetiva, o principal ponto a se destacar é quanto ao denominador tempo na relação de capacidade de trabalho. A capacidade efetiva de colhedoras contempla apenas a quantidade de trabalho, ou no caso, a quantidade de cana colhida, durante o tempo efetivo em que a máquina está colhendo. Ou seja, não considerados demais tempos operacionais, como manobras de cabeceira, reabastecimento, manutenção, entre outros, revelando, portanto, a máxima quantidade de trabalho que a máquina pode desenvolver à nível campo, dado, evidentemente, uma determinada condição da cultura (RIPOLI; RIPOLI, 2009). Essa consideração quanto à utilização apenas do tempo de trabalho produtivo, faz com que a capacidade efetiva de trabalho seja o principal parâmetro de comparação entre diferentes trabalhos. Por fim, a capacidade operacional leva em consideração todos os tempos envolvidos durante o tempo disponível para que a operação seja realizada.

⁶ Práticas como nivelamento, instalação de terraços, retirada de paus, tocos, pedras, restos de materiais estranhos, locação de estradas e carregadores, visando fornecer condições ideais para que a operação de colheita seja realizada.

Em termos de qualidade do processamento de colheita, o enfoque é dado principalmente quanto a perdas de matéria-prima industrializáveis no campo e qualidade da limpeza do material colhido. As perdas de matéria-prima industrializáveis, ou perdas visíveis, referem-se basicamente ao material deixado no campo após a colheita, enquanto que a qualidade da limpeza da cana, remete-se ao teor de matéria-estranha que a acompanha a matéria-prima destinada ao processamento, em geral, de origem mineral ou vegetal. Para Ripoli e Ripoli (2009), perdas e material estranho sempre vão ocorrer, independente do sistema de colheita adotado. A questão, portanto, é definir qual o limite aceitável para tais parâmetros no processo de colheita. O Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), um dos mais importantes centros de pesquisa em cana-de-açúcar, utiliza da classificação elencada na Tabela 3 para definir tais intervalos. Evidente que tais valores tratam-se de referências para colheita em cana picada e que podem sofrer alterações dependendo do sistema de colheita adotado, em especial o indicador “matéria estranha vegetal”, cujos limites podem ser maiores, por exemplo, em caso de colheita integral.

Tabela 3 - Classificação de níveis de perdas (%) e matéria estranha (%) na colheita de cana-de-açúcar

Classificação	Perdas (%)	Matéria estranha mineral (%)	Matéria estranha vegetal (%)
Baixo	< 2,5	< 0,7	< 3,5
Médio	2,5 a 4,5	0,7 a 1,20	3,5 a 6,0
Alto	> 4,5	> 1,20	> 6,0

Fonte: CTC (2012); Paes (2011), adaptado.

Furlani Neto (1995a), avaliando o desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar Santal Amazón em canaviais com e sem queima prévia, em espaçamento de 1,4 m, na região de Ribeirão Preto/SP, em duas variedades, verificou que a colheita em cana crua, apesar de apresentar menor capacidade colheita, resultou em melhora da qualidade tecnológica da matéria-prima colhida, com diminuição das impurezas minerais. Na Tabela 4 são apresentados os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos no trabalho.

Tabela 4 - Desempenho operacional da colhedora Santal Amazón atuando em duas variedades sob diferentes condições de canavial, com e sem queima prévia

Parâmetros	Unidade	SP71-1406		SP71-6163	
		Crua	Queimada	Crua	Queimada
Produtividade agrícola	t ha ⁻¹	84,88	84,03	90,42	87,10
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	4,91	5,78	4,39	5,18
Capacidade efetiva	t h ⁻¹	59,11	68,95	56,36	64,02
Matéria estranha total	%	6,05	5,97	11,60	5,02
Mineral	%	0,46	0,67	0,90	1,01
Vegetal	%	5,59	5,30	10,70	4,01
Perdas	t ha ⁻¹	3,29	1,03	1,60	1,48
Ponta	t ha ⁻¹	0,95	0,14	0,14	0,16
Tocos	t ha ⁻¹	0,60	0,16	0,46	0,40
Frações/Colmos	t ha ⁻¹	0,30	0,12	0,27	0,29
Rebolos	t ha ⁻¹	1,44	0,61	0,72	0,64

Fonte: Furlani Neto (1995), adaptado.

Ripoli et al. (1999), em avaliação com quatro velocidades de deslocamento (1,5; 3,0; 5,0 e 7,0 km h⁻¹) na colheita mecanizada de cana-de-açúcar, em espaçamento simples de 1,40 m, concluíram que a utilização de velocidades muito baixas pode inviabilizar o uso da máquina em termos de desempenho, visto que o aumento da velocidade de deslocamento resultou em maiores capacidades de colheita sem prejudicar a qualidade da operação.

Molina Junior (2000), em ensaio padronizado no município de Barra Bonita/SP, sob variedade RB 83-5089, em canavial sem queima prévia, em espaçamento de 1,40 m, com produtividade agrícola de 145 t ha⁻¹, com três diferentes modelos de colhedoras, operando em 4 níveis de velocidade (0,4; 0,8; 1,4 e 1,9 m.s⁻¹), fez as seguintes conclusões a respeito do comportamento geral das máquinas: i) Aumento de índices médios de matéria-estranha mediante condições extremas de velocidade operacional, tanto em relação ao mínimo como ao máximo; ii) Dentre as formas de perdas estudadas, o índice “frações de rebolos” foi o maior, seguido por “tocos na soqueira”, “colmos e suas frações” e “rebolos inteiros”, respectivamente, e; iii) As análises indicam tendência discreta de diminuição de perdas com incremento de velocidade, respeitando-se os limites estudados. Na Tabela 5 são apresentados os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos no trabalho.

Tabela 5 - Médias do desempenho operacional de três diferentes modelos de colhedoras, sob quatro velocidades de operação (km h^{-1})

Parâmetros	Unidade	V1	V2	V3	V4
Velocidade efetiva de deslocamento	km h^{-1}	1,57	3,08	5,34	7,66
Capacidade efetiva de colheita	t h^{-1}	24,46	49,79	94,29	127,79
Matéria estranha total	%	8,27	9,19	6,25	8,75
Mineral	%	0,5	0,25	0,08	1,17
Vegetal	%	7,77	8,94	6,17	7,58
Perdas	%	9,27	6,85	7,61	6,09
Rebolos inteiros	%	1,46	1,01	1,51	0,9
Frações de rebolos	%	5,26	3,56	3,01	2,56
Colmos e/ou suas frações	%	1,24	1,25	0,55	1,29
Toco de soqueira	%	1,31	1,03	2,54	1,34

Fonte: Molina Junior (2000), adaptado.

Nery (2000), avaliando o desempenho operacional e econômico de uma colhedora sob condições de cana crua, em canavial com produtividade agrícola de 145 t ha^{-1} , variedade RB 83-5089, no município de Barra Bonita/SP, em quatro velocidades (1,5; 3,0; 5,0 e $7,0 \text{ km h}^{-1}$), sob espaçamento de 1,4 m, verificou que o aumento da velocidade da colhedora resultou em aumentos nas capacidades efetiva bruta e operacional, frente à diminuição no consumo de combustível por tonelada de cana colhida, resultando, conseqüentemente, em redução do custo por tonelada colhida. O autor conclui ainda, que o aumento da velocidade não provocou o aumento das perdas totais de matéria-prima, ainda que as perdas na forma de rebolos e frações de colmos tenham aumentado com acréscimo de velocidade da colhedora. Os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos na pesquisa são evidenciados na Tabela 6.

Tabela 6 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em quatro velocidades de deslocamento

Parâmetros	Unidade	Velocidades de trabalho (km h ⁻¹)			
		1,5	3	5	7
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	1,34	2,66	5,27	7,68
Capacidade efetiva bruta	t h ⁻¹	16,29	36,29	87,67	110,18
Eficácia de manipulação	%	93,00	92,00	89,00	91,00
Capacidade efetiva líquida	t h ⁻¹	15,18	33,61	79,01	100,34
Consumo de combustível	L t ⁻¹	2,92	1,25	0,69	0,61
Consumo de combustível	L h ⁻¹	45,28	49,77	60,04	66,27
Perdas	%	6,1	6,91	9,89	8,81
Colmos e frações de colmos	%	2,11	2,59	0,62	2,64
Rebolos	%	0,00	0,00	1,18	0,00
Frações de rebolos	%	3,14	3,96	4,16	4,07
Frações de colmos na soqueira	%	0,85	0,36	3,93	2,1
Perdas de raízes	t ha ⁻¹	0,00	0,58	0,08	0,9
Índice de matéria estranha total	%	8,49	11,33	7,27	9,06
Vegetal	%	8,42	10,88	7,19	8,4
Mineral	%	0,07	0,45	0,08	0,66

Fonte: Nery (2000), adaptado.

Carvalho Filho (2000) verificou que a variável velocidade de deslocamento reflete diretamente no desempenho operacional e econômico da colhedora, assim como na eficiência do sistema de colheita. O estudo foi realizado no município de Barra Bonita/SP, em canavial sem queima prévia, com colhedora atuando em 4 velocidades pré-estabelecidas, 1,5; 3,0; 5,0 e 7,0 km h⁻¹, em espaçamento de 1,4 m e produtividade agrícola de 145 t ha⁻¹. Dentre as conclusões o autor destaca que a velocidade de colheita 5,39 km h⁻¹ foi a que apresentou o melhor desempenho econômico, menores perdas no campo e menor índice de matéria estranha. Os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 7.

Tabela 7 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em quatro velocidades (1,5; 3,0; 5,0 e 7,0 km h⁻¹) atuando em cana crua

Parâmetros	Unidade	Velocidades de trabalho (km h ⁻¹)			
		1,5	3,0	5,0	7,0
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	1,70	3,37	5,39	8,01
Capacidade efetiva bruta	t h ⁻¹	30,64	54,31	102,08	131,93
Eficácia de manipulação	%	86,00	91,00	93,00	94,00
Capacidade efetiva líquida	t h ⁻¹	26,30	49,61	94,51	124,55
Consumo de combustível	L h ⁻¹	97,35	96,22	103,90	108,45
Consumo de combustível	L t ⁻¹	3,21	1,77	1,04	0,83
Perdas*	%	14,18	8,67	7,46	13,21
Colmos e suas frações	%	0,59	0,00	0,00	0,28
Rebolos inteiros	%	2,54	1,74	1,70	3,21
Frações de rebolos	%	9,69	5,82	4,55	6,80
Rebolos na soqueira	%	0,81	1,09	0,85	2,50
Matéria estranha total	%	8,60	6,80	5,04	7,73
Mineral	%	0,88	0,00	0,00	0,00
Vegetal	%	7,72	6,80	5,04	7,73

* O detalhamento das perdas foi estimado com base nos percentuais de cada tipo de perda apurado no trabalho em relação às perdas totais. Apesar de o autor indicar que o tipo de perda “rebolos no ponteiro” é considerado componente das perdas totais, o mesmo não foi determinado, não compondo, portanto, a totalidade das perdas.

Fonte: Carvalho Filho (2000), adaptado.

De León (2000), avaliou o desempenho operacional de dois modelos de colhedoras de cana-de-açúcar operando em cana crua, em quatro velocidades (1,5; 3,0; 5,0 e 7,0 km h⁻¹), em espaçamento de 1,4 m e produtividade agrícola de 145 t.ha⁻¹. Em resumo o autor conclui que houve aumento da capacidade de colheita, tanto bruta como líquida, à medida que se elevou a velocidade de descolamento, verificando-se ainda que não houve diferenças nesse sentido entre as máquinas “A” e “B”. Com relação as perdas totais de matéria-prima, não houve aumento com maiores velocidades de deslocamento, além do que os níveis de eficácia de manipulação mostraram-se em níveis aceitáveis, o que indica que o aumento de velocidade trouxe ganhos operacionais. Os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos para as máquinas “A” e “B” são evidenciados, respectivamente, na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 - Desempenho operacional de colhedora de cana em 4 velocidades - Máquina "A"

Máquina A					
Parâmetros	Unidade	Velocidades (km h⁻¹)			
		1,5	3,0	5,0	7,0
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	1,68	3,21	5,37	7,28
Capacidade efetiva bruta	t h ⁻¹	26,44	58,76	93,11	141,26
Eficácia de manipulação	%	95,00	95,00	95,00	96,00
Capacidade efetiva líquida	t h ⁻¹	24,52	56,02	88,46	133,53
Perdas	%	7,37	4,78	5,09	3,92
Colmos e suas frações	%	0,46	0,73	0,40	0,72
Rebolos inteiros	%	1,84	1,27	1,60	1,30
Frações de rebolos	%	3,09	1,22	1,04	1,18
Rebolos na soqueira	%	1,98	1,56	2,05	0,72
Raízes arrancadas	t ha ⁻¹	0,59	0,00	0,00	0,04
Matéria estranha total	%	7,57	9,04	6,26	9,31
Mineral	%	0,51	0,27	0,16	2,88
Vegetal	%	7,06	8,77	6,10	6,43

Fonte: De León (2000), adaptado.

Tabela 9 - Desempenho operacional de colhedora de cana em 4 velocidades - Máquina "B"

Máquina B					
Parâmetros	Unidade	Velocidades (km h⁻¹)			
		1,5	3,0	5,0	7,0
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	1,70	3,37	5,40	8,01
Capacidade efetiva bruta	t h ⁻¹	30,64	54,31	102,08	131,93
Eficácia de manipulação	%	86,00	91,00	93,00	94,00
Capacidade efetiva líquida	t h ⁻¹	26,30	49,61	94,51	124,55
Perdas	%	14,13	8,67	7,43	5,54
Colmos e suas frações	%	1,03	0,00	0,00	0,25
Rebolos inteiros	%	2,55	1,77	1,69	1,41
Frações de rebolos	%	9,57	5,82	4,29	2,76
Rebolos na soqueira	%	0,98	1,08	1,45	1,12
Raízes arrancadas	t ha ⁻¹	0,06	0,01	0,04	0,00
Matéria estranha total	%	8,68	6,83	5,16	7,84
Mineral	%	0,88	0,00	0,00	0,00
Vegetal	%	7,80	6,83	5,16	7,84

Fonte: De León (2000), adaptado.

Meyer (2001) analisou o desempenho operacional de carregadoras (sistema manual) e colhedoras combinadas (sistema mecanizado) envolvidas na colheita de cana-de-açúcar, em canavial com e sem queima prévia. O espaçamento em questão era de 1,5 metros e cada tratamento foi submetido a 7 repetições. A respeito da colhedora combinada, que no caso foi o modelo Case Austoft, os resultados são detalhados na Tabela 10, onde o autor destaca que a capacidade da máquina em canavial queimado foi maior quando comparado ao sistema cru, enquanto que as perdas não mostraram diferenças. O autor ressalta ainda os principais fatores que influenciam na colheita mecanizada de cana-de-açúcar, sendo: i) Produtividade agrícola; ii) Porte do canavial; iii) Condições quanto a cru ou queimado; iv) Uniformidade do espaçamento; v) Comprimento das fileiras de plantio; vi) Layout do talhão; vii) Correspondência do espaçamento adotado com a bitola da máquina e, viii) Habilidade do operador.

Tabela 10 - Desempenho operacional da colhedora Case Austoft em diferentes situações de canavial quanto a porte e queima prévia

Parâmetros	Unidade	Tratamentos			
		3	C	D	E
Queima prévia	-	Sim	Sim	Não	Sim
Velocidade média	km h ⁻¹	5,1	5,6	4,9	5,7
Produtividade agrícola	t ha ⁻¹	99,2	79,7	81,8	86,3
Capacidade de colheita (Faixa)	t h ⁻¹	65 - 110	47 - 88	57 - 75	51 - 92
Perdas totais	%	3,15	4,38	5,03	5,06

Fonte: Meyer (2001), adaptado.

Yadav et al. (2002), avaliou o desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em dois locais diferentes (Erode e Baramati) na Índia, sob espaçamento de 1,5 metros. Os principais resultados do trabalho são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Desempenho operacional de colhedora em duas localidades, Erode e Baramati, na Índia

Parâmetros	Unidade	Erode	Baramati
Produtividade agrícola	t ha ⁻¹	123,92	103,57
Velocidade de deslocamento	km h ⁻¹	4,45	4,07
Consumo de combustível	L h ⁻¹	26	27
Capacidade efetiva de bruta de matéria-prima	t h ⁻¹	31	25,05
Capacidade efetiva de líquida de colmos	t h ⁻¹	29,35	23,9
Perdas	t ha ⁻¹	1,71	1,76
Perdas	%	5,83%	7,36%

Fonte: Yadav et al. (2002), adaptado.

Mazzonetto (2004), avaliou o desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar, modelo CAMECO CH2500, em canavial com produtividade agrícola de 121 t ha⁻¹, em espaçamento de 1,4 m, em duas situações distintas, sendo uma de colheita convencional de cana crua (T1) e outra de forma integral (T2), ou seja, esta com a máquina operando com os mecanismos de limpeza desligados, com exceção do despontador. Dentre as conclusões, o autor destaca que a colheita integral diminui significativamente as perdas de matéria-prima, ainda que capacidade efetiva de colheita tenha sido menor. Os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 12.

Tabela 12 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar atuando em dois tipos de colheita: crua convencional (T1) e integral (T2)

Parâmetros	Unidade	Tratamentos	
		T1	T2
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	6,00	3,80
Capacidade efetiva bruta de matéria-prima	t h ⁻¹	59,20	44,34
Eficácia de manipulação	%	95,31	99,04
Capacidade efetiva líquida de matéria-prima	t h ⁻¹	56,47	43,49
Capacidade efetiva líquida de colmos	t h ⁻¹	52,83	36,04
Consumo de combustível	L h ⁻¹	82,75	51,48
Consumo de combustível	L t ⁻¹	1,45	1,17
Perdas	t ha ⁻¹	4,44	0,90
Perdas	%	4,69	0,96

Fonte: Mazzonetto (2004), adaptado.

Ripoli (2004), em ensaio padronizado para obtenção de biomassa de cana-de-açúcar para fins energéticos, avaliou o desempenho de dois modelos de colhedoras, CAMECO CH2500B e CASE 7700, operando em cana crua, com produtividade de 94,65 t ha⁻¹, em espaçamento simples de 1,40 m, sob duas condições: i) com o sistema de limpeza funcionando regularmente, ou seja, colheita convencional e; ii) com os extratores desligados, operando-se apenas com o despontador ligado, ou seja, situação de colheita integral. Os principais resultados que remetem a etapa de colheita são apresentados, respectivamente, na Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13 - Desempenho operacional e econômico da colhedora CAMECO em condições de colheita convencional e integral

Parâmetros	Unidade	CAMECO	
		Convencional	Integral
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	5,45	3,59
Eficácia de manipulação	%	94,67	98,91
Matéria estranha total	%	7,1	20,1
Mineral	%	0,8	2,5
Vegetal	%	6,3	17,6
Capacidade efetiva bruta de matéria-prima	t h ⁻¹	59,20	44,34
Capacidade efetiva líquida de matéria-prima	t h ⁻¹	56,10	43,86
Capacidade efetiva bruta de rebolos e ponteiros	t h ⁻¹	57,63	37,36
Capacidade efetiva bruta de rebolos e/ou suas frações	t h ⁻¹	55,47	36,74
Capacidade efetiva líquida de rebolos e/ou suas frações	t h ⁻¹	52,57	36,35
Perdas	t ha ⁻¹	3,55	0,59
Rebolos inteiros	t ha ⁻¹	0,69	0,27
Rebolos esmagados	t ha ⁻¹	0,80	0,18
Colmos industrializáveis	t ha ⁻¹	1,60	0,02
Toco de soqueira	t ha ⁻¹	0,45	0,11
Perdas	%	3,75	0,62
Rebolos inteiros	%	0,73	0,29
Rebolos esmagados	%	0,85	0,19
Colmos industrializáveis	%	1,69	0,02
Toco de soqueira	%	0,48	0,12
Consumo de combustível	L h ⁻¹	82,75	51,48
Consumo de combustível na cap. efet. bruta mat.prima	L t ⁻¹	1,45	1,17
Consumo de combustível por rebolos colhidos	L t ⁻¹	1,54	1,41
Custo de colheita	R\$ t ⁻¹	2,84	2,42

Fonte: Ripoli (2004), adaptado.

Tabela 14 - Desempenho operacional e econômico da colhedora CASE em condições de colheita convencional e integral

Parâmetros	Unidade	CASE	
		Convencional	Integral
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	5,94	5,91
Eficácia de manipulação	%	98,28	99,26
Matéria estranha total	%	9,04	19,99
Mineral	%	0,60	1,50
Vegetal	%	8,44	18,49
Capacidade efetiva bruta de matéria-prima	t h ⁻¹	69,00	79,99
Capacidade efetiva líquida de matéria-prima	t h ⁻¹	67,81	77,39
Capacidade efetiva bruta de rebolos e ponteiros	t h ⁻¹	67,00	69,71
Capacidade efetiva bruta de rebolos e/ou suas frações	t h ⁻¹	63,21	65,96
Capacidade efetiva líquida de rebolos e/ou suas frações	t h ⁻¹	62,12	63,66
Perdas	t ha ⁻¹	1,34	0,49
Rebolos inteiros	t ha ⁻¹	0,20	0,14
Rebolos esmagados	t ha ⁻¹	0,58	0,07
Colmos industrializáveis	t ha ⁻¹	0,15	0,02
Toco de soqueira	t ha ⁻¹	0,41	0,25
Perdas	%	1,38	0,52
Rebolos inteiros	%	0,21	0,15
Rebolos esmagados	%	0,58	0,08
Colmos industrializáveis	%	0,16	0,02
Toco de soqueira	%	0,43	0,27
Consumo de combustível	L h ⁻¹	60,46	52,18
Consumo de combustível na cap. efet. bruta mat.prima	L t ⁻¹	0,88	0,67
Consumo de combustível por rebolos colhidos	L t ⁻¹	0,96	0,82
Custo de colheita	R\$ t ⁻¹	1,89	1,41

Fonte: Ripoli (2004), adaptado.

Carvalho (2009), estudando o efeito de quatro velocidades de deslocamento (3,0; 4,5; 6,0 e 8,0 km h⁻¹) sobre o desempenho operacional de uma colhedora em canavial sem queima prévia na região da Grande Dourados/MS, com produtividade agrícola de 75 t ha⁻¹, em espaçamento de 1,4 m, verificou que as capacidades de trabalho, tanto bruta como líquida, foram maiores com o aumento da velocidade de deslocamento da colhedora, constatando ainda, que não houve influência sobre as perdas durante operação (Tabela 15).

Tabela 15 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em quatro velocidades (3,0; 4,5; 6,0 e 8,0 km h⁻¹) atuando em cana crua

Parâmetros	Unidade	Velocidade (km h ⁻¹)			
		3,0	4,5	6,0	8,0
Capacidade efetiva bruta	t h ⁻¹	41,60	57,90	61,50	93,70
Capacidade efetiva líquida	t h ⁻¹	40,70	55,50	60,00	90,90
Eficácia de manipulação	%	97,80	95,70	97,70	96,90
Perdas totais	%	2,56	5,33	2,67	4,28
Lasca	%	0,20	0,27	0,13	0,29
Colmo	%	0,46	0,71	0,22	0,34
Pedaço	%	0,06	0,08	0,06	0,11
Rebolo	%	0,18	0,10	0,17	0,51
Colmo-ponta	%	0,07	0,09	0,00	0,01
Toco	%	1,59	4,08	2,09	3,02

Fonte: Carvalho (2009), adaptado.

Belardo (2010), avaliou o desempenho efetivo dos três modelos de colhedoras de cana mais comercializados no Brasil atualmente (John Deere 3520, Santal Tandem e Case 8800), operando em canavial sem queima prévia, com produtividade agrícola média de 114,14 t ha⁻¹, em espaçamento de 1,50 m, sob duas velocidades (5 e 7 km h⁻¹). Dentre as conclusões, o autor verificou que o aumento da velocidade de deslocamento trouxe benefícios de ordem econômica à operação, já que as capacidades efetivas e consumos de combustível foram melhores em maiores velocidades, não apresentando ainda, diferenças nas variáveis de eficácia de manipulação e na maioria dos índices de qualidade de colheita. Os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos para as duas velocidades, podem ser verificados, respectivamente, na Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16 - Desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar operando em velocidade de deslocamento de 5 km h⁻¹: John Deere 3520 (JD); Santal Tandem (SANT); Case 8800 (CASE)

Parâmetros	Unidade	5 km h ⁻¹		
		JD	SANT	CASE
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	5,16	4,98	4,94
Eficácia de manipulação	%	96,66	96,54	97,79
Capacidade efetiva	ha.h ⁻¹	0,77	0,75	0,74
Capacidade efetiva bruta de matéria-prima	t h ⁻¹	85,88	82,43	91,13
Capacidade efetiva bruta de colmos	t h ⁻¹	80,15	77,65	84,57
Capacidade efetiva líquida de colmos	t h ⁻¹	77,45	75,07	82,75
Matéria estranha total	%	6,69	5,78	7,23
Mineral	%	0,50	0,78	0,92
Vegetal	%	6,19	5,00	6,31
Matéria estranha total	t ha ⁻¹	7,40	6,40	8,90
Mineral	t ha ⁻¹	0,55	0,87	1,16
Vegetal	t ha ⁻¹	6,85	5,53	7,74
Perdas	t ha ⁻¹	3,63	3,62	2,53
Rebolos inteiros	t ha ⁻¹	0,11	0,30	0,16
Pedacos de rebolos	t ha ⁻¹	1,31	1,50	1,19
Colmos e suas frações	t ha ⁻¹	0,59	0,63	0,23
Toco de soqueira	t ha ⁻¹	1,62	1,19	0,94
Consumo de combustível	L h ⁻¹	57,27	53,75	63,04
Consumo de combustível	L ha ⁻¹	74,03	72,04	85,00
Consumo de combustível matéria-prima	L t ⁻¹	0,67	0,66	0,70
Consumo de combustível colmos (bruto)	L t ⁻¹	0,72	0,70	0,750
Consumo de combustível colmos (líquido)	L t ⁻¹	0,74	0,73	0,77

Fonte: Belardo (2010), adaptado.

Tabela 17 - Desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar operando em velocidade de deslocamento de 7 km h⁻¹: John Deere 3520 (JD); Santal Tandem (SANT); Case 8800 (CASE)

Parâmetros	Unidade	7 km h ⁻¹		
		JD	SANT	CASE
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	7,28	6,81	6,71
Eficácia de manipulação	%	97,01	96,88	98,38
Capacidade efetiva	ha.h ⁻¹	1,09	1,02	1,01
Capacidade efetiva bruta de matéria-prima	t h ⁻¹	130,55	107,87	122,02
Capacidade efetiva bruta de colmos	t h ⁻¹	120,06	101,50	112,44
Capacidade efetiva líquida de colmos	t h ⁻¹	116,48	98,38	110,62
Matéria estranha total	%	8,00	5,78	7,90
Mineral	%	0,61	0,62	0,84
Vegetal	%	7,39	5,16	7,06
Matéria estranha total	t ha ⁻¹	9,55	6,19	9,57
Mineral	t ha ⁻¹	0,74	0,66	1,03
Vegetal	t ha ⁻¹	8,81	5,53	8,54
Perdas	t ha ⁻¹	3,37	3,17	1,84
Rebolos inteiros	t ha ⁻¹	0,11	0,20	0,25
Pedaços de rebolos	t ha ⁻¹	1,22	1,34	1,24
Colmos e suas frações	t ha ⁻¹	0,32	0,20	0,00
Toco de soqueira	t ha ⁻¹	1,71	1,43	0,35
Consumo de combustível	L h ⁻¹	60,56	55,60	64,80
Consumo de combustível	L ha ⁻¹	55,54	54,43	64,45
Consumo de combustível matéria-prima	L t ⁻¹	0,47	0,52	0,53
Consumo de combustível colmos (bruto)	L t ⁻¹	0,51	0,55	0,58
Consumo de combustível colmos (líquido)	L t ⁻¹	0,52	0,57	0,59

Fonte: Belardo (2010), adaptado.

Cardoso (2011), de modo a verificar o desempenho de uma colhedora de cana-de-açúcar, sobretudo no que diz respeito à qualidade da operação, promoveu ensaios com a utilização de dessecante (herbicida Paraquat) em pré-colheita, sob duas velocidades (5 e 7 km h⁻¹), em espaçamento de 1,40 m e produtividade agrícola de 98 t ha⁻¹. A autora concluiu que apesar dos tratamentos não diferirem quanto às perdas na colheita, houve diminuição de

matéria estranha vegetal na carga e aumento da capacidade de colheita nos tratamentos que contaram com a aplicação do produto. Os principais parâmetros avaliados bem como os resultados obtidos para as duas velocidades podem ser verificados Tabela 18.

Tabela 18 - Desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar em duas velocidades de deslocamento sob duas condições de canavial: Submetido à aplicação de dessecante (P) e testemunha (T)

Parâmetros	Und	5 km h ⁻¹		7 km h ⁻¹	
		P	T	P	T
Velocidade efetiva de deslocamento	km h ⁻¹	4,08	4,52	5,97	6,15
Matéria estranha total	%	2,94	4,01	3,09	3,08
Mineral	%	0,78	0,90	0,85	0,89
Vegetal	%	2,16	3,11	2,25	2,20
Perdas	%	1,03	1,24	0,70	1,19
Capacidade efetiva bruta de matéria-prima	t h ⁻¹	63,92	69,5	91,7	83,51
Capacidade efetiva líquida de matéria-prima	t h ⁻¹	62,65	68,03	90,15	81,81
Eficácia de manipulação	%	97,99	97,78	98,32	97,83
Consumo de combustível matéria-prima (bruto)	L t ⁻¹	1,22	1,16	0,90	0,97
Consumo de combustível matéria-prima (líquido)	L t ⁻¹	1,24	1,19	0,92	0,99
Consumo de combustível	L h ⁻¹	76,68	75,25	82,47	78,14

Fonte: Cardoso (2011), adaptado.

Schmidt Junior (2011), com o objetivo de determinar a combinação ideal entre a velocidade de deslocamento e a velocidade do exaustor primário, de modo que as perdas e impurezas fossem as menores possíveis, realizou ensaio com duas colhedoras, sendo a primeira um protótipo da colhedora Santal e a segunda uma colhedora de referência (REF). A colhedora Santal foi submetida a três diferentes velocidades de deslocamento (V1 – 5,7 km h⁻¹; V2 – 7,0 km h⁻¹; V3 – 8,5 km h⁻¹) e duas diferentes velocidades do exaustor primário (E1 – 1.500 rotações por minuto; E2 – 1.000 rotações por minuto), enquanto que para a colhedora de referência foram utilizados valores considerados padrões para a usina onde os ensaios foram realizados, sendo velocidade de deslocamento de 6,50 km h⁻¹ e velocidade do exaustor de 1.200 rotações por minuto (rpm). O espaçamento em questão foi de 1,50 m. Os principais resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 19.

Tabela 19 - Desempenho operacional de um protótipo de colhedora, em diferentes velocidades de deslocamento ($V1 = 5,7 \text{ km h}^{-1}$; $V2 = 7,0 \text{ km h}^{-1}$; $V3 = 8,5 \text{ km h}^{-1}$) e do exaustor primário ($E1 = 1.500 \text{ rpm}$; $E2 = 1.000 \text{ rpm}$), e o comparativo com uma colhedora de referência (Velocidade – $6,50 \text{ km h}^{-1}$; Velocidade do exaustor – 1.200 rpm)

Parâmetros	Und	E1			E2		REF
		V1	V2	V3	V1	V2	
Velocidade de deslocamento	km h^{-1}	5,75	7,11	8,28	5,7	6,87	6,61
Produtividade agrícola	t ha^{-1}	74,56	73,71	74,87	71,28	75,78	78,93
Eficácia de manipulação	%	99,47	99,63	99,18	99,66	99,58	99,71
Matéria estranha total	%	10,48	11,8	15,56	10,48	11,84	11,27
Vegetal	%	10,12	11,39	15,21	10,08	11,45	10,98
Mineral	%	0,36	0,41	0,35	0,4	0,39	0,29
Perdas totais	t ha^{-1}	0,39	0,27	0,61	0,24	0,32	0,23
Perdas totais	%	0,53	0,37	0,82	0,34	0,42	0,29
Consumo de combustível	L h^{-1}	50,3	54,82	56,13	50,67	53,79	58,56
Consumo de combustível	L t^{-1}	0,71	0,62	0,52	0,75	0,62	0,67

Fonte: Schmidt Junior (2011), adaptado.

Segundo Banchi et al. (2012a), a capacidade operacional de colhedoras pode ser afetada por diversas variáveis, como produtividade do canavial e idade operacional das colhedoras. Em estudo realizado em três unidades sucroalcooleiras da região sudeste canavieira do Brasil, com dados coletados de 72 colhedoras, no período de 2007 a 2011, totalizando cerca de 315 mil horas trabalhadas, o autor verifica que a capacidade operacional de colhedoras é variável de acordo com a produtividade agrícola, compreendendo um intervalo de 15 a 50 t h^{-1} , conforme Figura 12. Ressalta-se que tal intervalo remete a capacidade operacional da máquina, compreendendo, portanto, além das horas efetivas trabalhadas, as horas paradas, que para colhedoras de cana situam-se em torno de 60% (Banchi et al. 2012b). A respeito da vida útil da máquina, observa-se na Figura 13, que a capacidade da colhedora apresenta comportamento decrescente à medida que a idade da colhedora avança. A integração de ambas variáveis refletidas na capacidade da máquina pode ser verificada na Figura 14.

Figura 12 - Capacidade operacional de colheita (t h⁻¹) em função da produtividade agrícola (t ha⁻¹)

Fonte: Banchi et al. (2012a).

Figura 13 - Capacidade operacional de colheita (t h⁻¹) em função da vida útil da máquina (h)

Fonte: Banchi et al. (2012a).

Figura 14 - Relação entre capacidade operacional de colheita ($t\ h^{-1}$), produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) e vida da colhedora (h)

Fonte: Banchi et al. (2012a).

Analisando os indicadores técnicos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar de 23 usinas na safra 2011/12, esta marcada por queda de produtividade agrícola, Banchi et al. (2012c) apresentam os resultados elencados na Tabela 20. No trabalho, os autores destacam a variação dos índices atrelados à colheita mecanizada ao longo de uma mesma safra, em especial no que se refere a custos de manutenção, que passa de $55\ R\$ h^{-1}$ no início da safra para $90\ R\$ h^{-1}$ ao final da mesma.

Tabela 20 - Índices técnicos de colheita mecanizada para a safra 2011/12

Índice	Unidade	Média	Máximo	Mínimo
Uso anual	h	2.483	3.726	870
Disponibilidade	%	75,00	85,30	54,50
Consumo de combustível	$L\ h^{-1}$	39,31	40,78	36,68
Consumo de combustível	$L\ t^{-1}$	2,04	3,00	1,45
Custo de reparos e manutenção	$R\$ h^{-1}$	67,15	84,98	54,25

Fonte: Banchi et al. (2012c), adaptado pelo autor.

O custo com reparos e manutenções (CRM), inclusive, é uma das principais parcelas do custo horário das colhedoras (BANCHI, 2008b), conforme Tabela 21, e também um dos pontos determinantes para a análise de renovação da frota. Em estudos sobre o assunto, com base em análise de dados de 200 colhedoras, em 5 unidades sucroenergéticas durante 6 anos, Banchi et al. (2012d), verificou que o custo com reparos e manutenção, em média, é crescente

ao longo dos anos, ao passo que as horas de utilização a cada safra diminuem, ficando em média em torno de 2.900 horas.ano⁻¹ (Figura 15). Ou seja, a medida que a utilização da máquina aumenta se gasta mais para trabalhar menos. Nota-se ainda, que em média, no terceiro ano de utilização da máquina os valores acumulados despendidos com reparos e manutenção já alcançaram o valor inicial das máquinas, que atualmente gira em torno de R\$ 850 mil. Tal conclusão pode ser visualizada de forma mais clara na Figura 16, que relaciona ao valor inicial da máquina o custo com CRM mediante utilização da colhedora.

Tabela 21 - Custo horário de colhedoras e principais componentes de custos

Parâmetro	Unidade	Colhedora		
		Pneu	Esteira	Geral
nº de equipamentos estudados	n	15	190	205
Período de estudo	horas	96.529	1.290.033	1.386.562
Custo total	R\$ h ⁻¹	200,11	207,92	207,37
Fixo	% CT	40,80	35,60	36,00
Variável	% CT	59,20	64,40	64,00
Combustível	% CT	31,20	32,50	32,30
Lubrificantes	% CT	3,50	3,60	3,60
Reparos e manutenção	% CT	24,50	28,30	28,10

Fonte: Banchi et al. (2008b).

Figura 15 - Evolução dos custos com reparos e manutenção (mil R\$) e horas de utilização ao longo dos anos

Fonte: Banchi et al. (2012dc), adaptado pelo autor.

Figura 16 - Custo com reparo e manutenção em relação à média do preço dos equipamentos

Fonte: Banchi et al. (2008).

2.2.3 Diferentes espaçamentos em cana-de-açúcar e suas implicações nas operações mecanizadas

Como já salientado anteriormente, o aumento na demanda de açúcar e etanol oriundos de cana-de-açúcar é crescente, sendo que existem basicamente duas soluções possíveis para atender tal situação: aumento na área plantada com cana-de-açúcar ou o aumento da produtividade da lavoura. Apesar de o Brasil possuir uma extensa área apta à expansão da cana-de-açúcar, pesquisas em aumentos de produtividade devem ser promovidas, visto que a expansão de áreas requer altos investimentos e deve ser submetida a um planejamento de longo prazo, analisando-se questões técnicas, econômicas e ambientais, de modo que o crescimento seja realizado de forma sustentável. Além disso, maiores produtividades contribuem com redução dos custos operacionais, visto que se produz mais numa mesma área.

O cultivo de cana-de-açúcar, assim como as demais culturas agrícolas, está condicionado a fatores de produção controláveis e não controláveis que impactam na produtividade agrícola. Os fatores não controláveis estão atrelados, principalmente, a condições climáticas, enquanto que os fatores controláveis, por sua vez e como o próprio termo diz, são fatores passíveis de modificação, respeitando-se, evidentemente, certo nível de interferência específico. Dentre os fatores controláveis em cana-de-açúcar, o espaçamento entre fileiras vem sendo exaustivamente estudado.

A definição de espaçamento de plantio vem a ser a distância entre os sulcos ou fileiras de plantio (Ripoli; Ripoli, 2006), sendo que quando a distância é equidistante, diz-se que o espaçamento é uniforme ou simples, enquanto que quando há variações na distância a partir de dois valores, diz-se que o espaçamento é alternado. De forma a facilitar a compreensão, é ilustrado na Figura 17 um esquema quanto aos tipos de espaçamento. Vale ressaltar que no caso do alternado, em geral são realizados dois sulcos a partir do menor valor, por isso a denominação do espaçamento duplo alternado.

Figura 17 - Esquema de espaçamento: uniforme (simples) e duplo alternado

Segundo Paranhos (1972), os primeiros estudos relacionados à diferentes espaçamentos em cana-de-açúcar foram realizados por Stubbs, em 1880. Paranhos (1972) estudou diferentes espaçamentos (1,00; 0,50 x 1,00 duplo; 1,30; 0,50 x 1,50 duplo, 1,60 e 1,90 metro) e densidades de plantio (6, 9 e 12 gemas por metro) em três variedades de cana-de-açúcar (CB 40-69; CB 41-76 e CB 36-24). Dentre as conclusões, o autor aponta que os “espaçamentos duplos apresentaram índices de produção que lhes permitem serem considerados como alternativa para contornar problemas de bitola das máquinas na motomecanização”. Além disso, o autor realiza um levantamento bibliográfico com 32 trabalhos sobre espaçamentos entre fileiras de cana-de-açúcar, dos quais pelo menos 46% deles indicam que menores espaçamentos, até certos limites, acarretam em maiores

produtividades. Do restante, ou não apresentam conclusões claras sobre o assunto ou não são verificadas diferenças, ressaltando-se que nenhum trabalho trata de menores produções por área mediante redução do espaçamento.

Fernandes et al. (1980), estudaram o controle de tráfego e o desenvolvimento de três variedades de cana (IAC52/326; CB41-76 e cb44-52) em quatro diferentes espaçamentos (1,50 m; 1,80 m; 2,00 m e 2,20 m), durante 5 anos consecutivos, sob colheita mecanizada. Perante os resultados os autores concluíram que: i) espaçamentos de base larga (1,80 m, 2,00 m e 2,20 m), resultaram em produtividades similares ao tradicional espaçamento de 1,50 m; ii) apesar de espaçamentos maiores que 1,80 m resultarem em menores distâncias percorridas na área, eles não são recomendados, tendo em vista problemas posteriores de “fechamento” da cultura e; iii) espaçamentos de base larga são adequados para o controle de tráfego na área, sendo as configurações entre 1,70 e 1,80 m as mais compatíveis para a colheita mecanizada, com o menor risco de danos às soqueiras.

Segundo Stolf et al. (1987), apesar do estreitamento do espaçamento entre fileiras de cana-de-açúcar até certos limites (0,60 m) resultar em aumentos de produtividade, a mecanização das operações seria dificultada, tendo em vista que a diminuição das bitolas acarretaria num diminuição da estabilidade das máquinas envolvidas. Para os autores, espaçamentos menores que 0,90 m são limitantes à mecanização em cana-de-açúcar.

Furlani Neto (1995b) discorrendo sobre a sulcação a partir de sulcos alternados duplos, conclui que os objetivos com a adoção do sistema são: a) colheita simultânea de duas fileiras; b) Maior controle de tráfego no talhão; c) Diminuição da distância percorrida pelos maquinários na área; d) Aumento da longevidade e produtividade do canavial; e) Melhora da eficácia do corte basal; f) Viabilização de colhedoras e demais máquinas da frota utilizadas no processo, sem que haja necessidade de novos investimentos; g) aumento dos rendimentos operacionais e, por fim; h) diminuição dos custos operacionais. O autor destaca ainda que uma dificuldade no corte simultâneo de duas fileiras é o nível e o paralelismo que se encontram no campo, relacionadas principalmente ao preparo e/ou sistematização ineficientes, aumentando a incidência perdas de “tocos” no corte de base ou, no caso de abaixar o nível do corte, no maior risco de “arranquio” de soqueiras (Figura 18).

Figura 18 - Detalhe do corte de base em sulcos duplos e a presença de "tocos altos" e/ou arranquio de uma das fileiras

Fonte: Furlani Neto (1995b).

Casagrande (2000), em revisão bibliográfica sobre espaçamentos na cultura da cana-de-açúcar, abrangendo 38 trabalhos sobre o assunto conclui que: i) De forma geral, espaçamentos mais estreitos aumentam a produtividade em primeiro corte; ii) A redução de espaçamento resulta em dificuldades operacionais; iii) A possibilidade de resposta de acréscimos de produtividade com espaçamentos mais estreitos em solos de baixa fertilidade é maior; iv) Nem todos os trabalhos apresentam resposta aos espaçamentos duplos; v) O desenvolvimento da cana-de-açúcar em relação aos diferentes espaçamentos não é igual para todas as variedades e; vi) Resultados dos experimentos com sulco de base larga se mostram promissores.

Rosseto e Pascoto (2001) estudaram espaçamentos em cana-de-açúcar, comparando os sistemas de sulcação simples (1,50 m) e alternado duplo (0,40 x 1,40 m). Dentre as conclusões dos autores, pode-se destacar em relação ao espaçamento duplo: i) Aumento de produtividade agrícola (em média 11%) e maior longevidade do canavial, dada eficácia no controle de tráfego e consequente diminuição do pisoteio das fileiras de cana; ii) Melhor aproveitamento das águas da chuva e menor erosão/assoreamento; iii) Num primeiro momento, exigência de um maior número de operações no preparo de solo; iv) Altas produtividades obtidas no 1º corte podem gerar dificuldades para a atuação da máquina e; v) Redução do número de manobras pelos conjuntos mecanizados envolvidos.

Morelli (2004) aponta que o adensamento do espaçamento de 1,40 m para 1,10 m resulta em: i) maior produtividade em solos arenosos; ii) “fechamento” mais rápido da cultura, auxiliando no controle de plantas daninhas e, iii) maior eficiência nas operações mecanizadas. A respeito do espaçamento com linhas duplas, o autor destaca a maior produtividade por metro linear, maior eficiência na colheita mecanizada e, maior controle de

tráfego, ressaltando ainda, que a falta de nivelamento adequado causa o aumento de perdas e de impurezas minerais.

Segundo Cox (2006) um dos grandes desafios para o setor canavieiro como um todo, ou seja, considerando os principais países produtores de cana-de-açúcar, é a compatibilização de um espaçamento padrão em cana-de-açúcar, tendo em vista, principalmente, a padronização de máquinas aptas à colheita. O autor apresenta diferentes espaçamentos utilizados em cana-de-açúcar (Quadro 1), destacando os respectivos percentuais de compactação. Como se observa, quanto maior a bitola da colhedora, menor será a compactação no solo, tendo em vista que a máquina irá passar um número menor de vezes na área. Os benefícios dessa redução de “passadas” podem ser verificados também com a adoção espaçamento duplo (ED), que reduz pela metade os impactos da compactação. É importante ressaltar que o autor preconiza que os melhores resultados, não só em termos melhorias de compactação, mas também quanto aumento da capacidade de colheita, centro de gravidade da máquina e consumo de combustível, são encontrados com a utilização do último espaçamento do quadro, 3.000 mm ou 3 metros, em que as entre-fileiras da cultura se distanciam a 1,50 metros e a bitola da máquina a 3,00 metros, conforme Figura 19. Entretanto, a utilização de máquinas dessa configuração, demanda uma modificação drástica nos atuais modelos de colhedoras e também nos demais equipamentos envolvidos na produção de cana. Sendo assim, considerando as máquinas disponíveis no mercado, uma das opções seria a utilização do espaçamento duplo alternado, ainda que adaptações de menor dimensão se façam necessárias.

Bitola (mm)	Espaçamento entre fileiras (mm)	Compactação do solo (%)
1.850	1.524	70%
1.850	1.400	70%
1.850	1.850	70%
1.850	500 / 1.350 ED*	35%
2.000	800 / 1.200 ED*	35%
2.400	1.200	24%
3.000	1.500	18%

*ED – Espaçamento duplo

Quadro 1 - Compactação do solo frente a diferentes espaçamentos de cana-de-açúcar

Fonte: Cox (2006), adaptado pelo autor.

(a)

(b)

Figura 19 - Disposição de equipamentos (bitola de 3 metros) na colheita mecanizada em espaçamento simples (1,5 metros): a) Vista de frente; b) Vista de trás

Fonte: Cox (2006), adaptado pelo autor.

Considerando os atuais modelos de colhedoras no mercado, o espaçamento entre fileiras mais adequado em áreas de colheita mecanizada é o de 1,5 metro, sendo que canaviais com espaçamentos menores ficam sujeitos ao tráfego das máquinas, podendo causar danos as soqueiras (RIPOLI; RIPOLI, 2007). Segundo Mialhe (1996), o tráfego de máquinas entre fileiras, de modo a não causar danos à cultura, deve respeitar um “afastamento de segurança (AS)”, definido pelo autor como sendo um “afastamento lateral, de ambos os lados do eixo da fileira, a partir do qual a passagem da roda é inócua tanto a parte aérea das plantas como ao sistema radicular”.

Para a cana-de-açúcar, Ripoli & Ripoli (2009) consideram que uma distância mínima de 0,25 metro entre a borda da banda de rodagem do pneu mais próximo da fileira de cana e o centro da linha de soqueira, atende ao conceito de afastamento de segurança. Portanto, como se observa na Figura 20, ainda que o espaçamento de 1,5 metros seja respeitado, a distância entre os rodados das máquinas em relação à fileira da cultura ainda é muito estreita, sendo de 0,23 m para o conjunto trator-transbordo e 0,12 m para a colhedora, não atendendo, portanto, o conceito do AS, sendo que qualquer descuido por parte do operador ou ainda uma operação de sulcação mal feita em termos de alinhamento, pode resultar em danos a soqueira.

Figura 20 - Posições relativas entre os rodados das máquinas empregadas na colheita mecanizada e o espaçamento uniforme de 1,5 metros entre fileiras: Conjunto Trator Transbordo (a); Colhedora (b)

Fonte: Monaco Junior (2011).

No caso do espaçamento duplo alternado, duas configurações vêm sendo adotadas, sendo $0,90 \times 1,50$ m e $0,90 \times 1,60$ m. Considerando a principal colhedora comercializada para atuar no espaçamento duplo alternado, cujo modelo foi avaliado neste trabalho, nota-se que ainda que o espaçamento de $0,90 \times 1,50$ m proporcione uma maior distância entre o rodado da colhedora e a fileira de cana, comparativamente ao espaçamento de 1,5 m, os rodados dos veículos de transbordo ficam a uma distância de 0,15 m da entre fileira, ou seja, abaixo da distância recomendada como afastamento de segurança. O espaçamento de $0,90 \times 1,60$ m, por sua vez, atendente a distância mínima de 0,25 m do AS.

Figura 21 - Posições relativas entre os rodados das máquinas empregadas na colheita mecanizada das principais configurações do espaçamento duplo alternado: $0,90 \times 1,50$ m (a) e $0,90 \times 1,60$ m (b)

Fonte: Monaco Junior (2011).

A propósito, no Quadro 2 são apresentadas as principais características técnicas dos principais modelos de colhedoras comercializados no Brasil. Como se nota, as diferenças entre as colhedoras de duas fileiras e as de uma fileira estão basicamente quanto às dimensões de bitola, largura da boca de alimentação, diâmetro e distância dos eixos dos discos de corte de base, sendo maiores nos modelos de duas fileiras.

Características	John Deere		Santal		Case
	3522	3520¹	Tandem II²		8800¹
Nº de fileiras que colhe	2	1	2	1	1
Potência (cv / kw)	342 / 251	342 / 251	336 / 254	336 / 254	358 / 260 ⁴
Peso (kg)	19.300	19.050	17.460	17.460	18.300
Rodado	Esteira	Esteira	Pneu	Pneu	Esteira
Nº de lâminas por disco de corte	5	5	7	6	5
Nº de exaustores	2	2	2	2	2
Bitolas (m) - dianteira/traseira	2,39	1,88	2,39 / 1,96	2,06 / 1,90	1,88
Distância entre eixos (m)	2,97	2,97	3,39 ³	3,39	2,96
Largura da esteira - sapata (mm)	406	457	-	-	457
Largura boca de alimentação (m)	1,35	1,00	1,30	0,97	1,00
Diâmetro dos discos de corte de base (m)	0,84	0,56	0,83	0,58	0,57
Distância entre eixos dos discos de corte base (m)	0,91	0,62	0,86	0,71	0,63
Altura (m)	6,23	6,23	5,50	5,50	6,3
Comprimento (m)	15,48	15,14	14,00	14,00	15,84

¹ Características referentes a modelos com rodados de esteira, sendo que o fabricante apresenta também a opção de rodado com pneus; ² Modelo com frente intercambiável, ou seja, a mesma colhedora apresenta opções de ajustes de modo alterar as características de alimentação, possibilitando atuar em diferentes espaçamentos; ³ Sistema de rodado 6x4, sendo que foi considerado a maior distância entre os eixos; ⁴ O fabricante oferece duas opções de motor, sendo que foi considerado o modelo CASE IH C9.

Quadro 2 - Comparativo entre as principais características dos modelos de colhedoras mais comercializados no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor com base em John Deere (2012); Santal (2012) e Case IH (2012).

Para Pinazza et al. (2008), o sistema de produção em suco duplo alternado é ainda uma opção para a utilização de culturas intercalares. Em trabalho com espaçamento de cana em 0,5 m (duplo) x 2,30 m, implantou-se nas entrelinhas mais largas (2,30 m), duas fileiras de milho,

espaçadas por sua vez de 0,75/0,80 m. Apesar da produtividade da cana ter sido menor quando comparada ao sistema de fileira simples, tendo em vista a competição com o milho, não houve limitações quanto ao tráfego das máquinas, possibilitando o consórcio entre as culturas. Os autores destacam ainda, a necessidade de se estudar outras culturas em consórcio, de modo a encontrar plantas que se complementem, apresentando interações positivas.

Furlani Neto (2009) ressalta o espaçamento duplo alternado como sendo uma ótima alternativa para o controle de tráfego, resultando simultaneamente em menores distâncias percorridas pelas máquinas e maiores valores quanto à metros de sulco por hectare, conforme Tabela 22, que confronta tais informações para os principais tipos de espaçamentos utilizados no Centro-Sul canavieiro.

Tabela 22 - Metros de sulco por hectare e distância percorrida pela colhedora de acordo com espaçamento adotado

Espaçamento (metros)	Tipo	Metros de sulco por hectare	Distância percorrida pela máquina (metros/hectare)
0,90 x 1,50	Duplo Alternado	8.332	4.166
0,90 x 1,60	Duplo Alternado	8.000	4.000
1,4	Simple	7.142	7.142
1,5	Simple	6.666	6.666

Fonte: Furlani (2009), adaptado pelo autor.

Magro (2011), com o objetivo de encontrar um espaçamento ideal que se ajuste ao uso dos equipamentos disponíveis no mercado, realizou uma revisão bibliográfica com 155 fontes de informações comparativas sobre espaçamentos em cana-de-açúcar, verificando que os espaçamentos menores que 1,50 m proporcionam igual ou maiores produtividades agrícolas que este, cuja formatação é a mais usada na atividade canavieira. Em tal revisão o autor constata a utilização de diversos espaçamentos de sulcação, desde muito reduzidos, abaixo de 1,00 m, até muito largos, acima de 2,00 m, concluindo a partir de respostas de produtividade, considerações sobre bitola, compactação e equipamentos disponíveis, que o melhor sistema de espaçamento seria o duplo alternado, na configuração 0,60 x 1,30 metro (1,90m). Cabe ressaltar que tal espaçamento leva em conta máquinas bitolas rodoviárias oficiais, segundo o autor, com medidas próximas 1,90 m, inclusive as colhedoras, que originalmente foram desenvolvidas para colher uma fileira.

Dalben (2011), a respeito de desempenho operacional de colhedoras de duas fileiras, relata que a capacidade operacional destas máquinas é em média quase 80% superior a colhedoras de uma fileira, além da redução no consumo de diesel por tonelada colhida, em torno de 60%, conforme Tabela 23. As principais conclusões do autor acerca da colheita mecanizada, principalmente em canaviais de baixa produtividade (50 t ha^{-1}), onde o desempenho da máquina é superior, são: i) Menor consumo de diesel da colhedora e do transbordo; ii) Redução no tempo de colheita; iii) Redução do parque de máquinas; iv) Redução de 50 a 70% no tráfego sobre a lavoura; iv) Menor perdas no corte de base; v) Menor custo operacional; entre outros.

Tabela 23 - Comparativo entre colhedoras de uma e duas fileiras sobre consumo de diesel por tonelada colhida (L t^{-1})

Mês	Consumo de combustível - L t^{-1}			
	Colhedora de 1 Fileira		Colhedora de 2 Fileiras	
Março	1,70	1,30	0,80	1,30
Abril	1,50	1,30	0,80	1,10
Maio	1,80	1,70	0,90	1,10
Junho	1,40	1,30	0,90	1,10
Julho	1,50	1,40	1,00	1,10
Agosto	1,70	1,50	1,10	1,10
Setembro	2,00	1,80	0,80	0,90
Outubro	2,10	1,80	1,00	1,40
Novembro	-	1,70	1,00	-
Média	1,71	1,53	0,92	1,14

Fonte: Dalben (2011), adaptado.

Monaco Junior (2011), estudando o desempenho operacional de duas colhedoras da fabricante John Deere, modelos 3520 e 3522, cuja diferença é que a primeira opera em espaçamento simples e a segunda colhedora em espaçamento duplo alternado, verificou que a capacidade de colheita diária da máquina, a uma mesma produtividade, aumenta em torno de 50% no espaçamento duplo alternado (Figura 22), além de apresentar uma redução no consumo de diesel por tonelada colhida em torno de 45% (Figura 23). Apesar de tais vantagens operacionais, o autor descreve que a adoção do espaçamento duplo alternado resulta num aumento de perdas de colheita, comparativamente a outros espaçamentos, conforme Figura 24. As principais vantagens apontadas pelo autor acerca do espaçamento

alternado são: i) maior possibilidade da preservação das soqueiras, ii) maior volume de exploração radicular; iii) maior eficiência de absorção do fertilizante; iv) maior longevidade do canavial; v) melhor trafegabilidade dos equipamentos mecanizados; vi) maior capacidade da colhedora; viii) menor consumo de diesel por tonelada colhida; ix) menor quebra dos equipamentos; x) menor velocidade de operação/menor risco de dano às soqueiras e, xi) preservação dos sulcos de 0,90m.

Figura 22 – Análise comparativa da capacidade operacional de duas colhedoras, sendo uma de fileiras simples (3520) e outra de fileira dupla (3522), de acordo com a produtividade agrícola do canavial

Fonte: Monaco Junior (2011).

Figura 23 - Análise comparativa do consumo de diesel entre colhedoras de cana, sendo uma de fileiras simples (3520) e outra de fileira dupla (3522), de acordo com a produtividade agrícola do canavial

Fonte: Monaco Junior (2011).

Figura 24 - Perdas (%) na colheita de cana em diferentes espaçamentos

Fonte: Monaco Junior (2011), adaptado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio de campo ocorreu no segundo semestre de 2011, na Unidade Barra, usina do Grupo Raízen, localizada no município de Barra Bonita, estado de São Paulo. As coordenadas geográficas da área do ensaio, segundo a Unidade Barra, são: 22°37'09,09''S (Lat), 48°31'25,5'' O (Long) e 500 m (Alt). Ainda de acordo com a unidade, o ambiente de produção da referida área é caracterizado como B⁷, apresentando declividade de 5%, não oferecendo, portanto, limitações quanto à mecanização da colheita. Na Figura 25 é apresentado o mapa da área. O nivelamento dos sulcos e o paralelismo entre fileiras de plantio encontravam-se dentro do limite inferior do desejável para a operação.

Figura 25 - Mapa da área onde foi realizado o ensaio⁸

A variedade colhida foi a SP81-3250, sem queima prévia, em primeiro corte, plantada no espaçamento duplo alternado 0,9 x 1,6 metro. De acordo com Ridesa (2012), tal variedade é a segunda mais cultivada, respondendo por cerca de 12% do censo varietal à nível de Brasil. Em relação a colheita, ela é considerada boa para a colheita mecanizada (MARIN, 2012), com hábito de pouco acamamento, crescimento vigoroso, uniformidade e alto perfilhamento (COPERSUCAR, 1995 apud BARBOSA, 2010).

⁷ Ambiente de produção trata da classificação de aptidão para a produção de cana-de-açúcar em determinada área ou região, com base na produtividade agrícola esperada. São consideradas na classificação a soma das interações dos atributos de superfície (clima regional, declividade, presença de ervas daninhas, entre outros) e subsuperfície. Para maiores detalhes: www.pedologiafacil.com.br.

⁸ Fornecido pela Unidade Barra – Grupo Raízen.

3.1 Instrumentos e máquinas

Os instrumentos empregados, tanto de campo como de laboratório, e as máquinas utilizadas no ensaio de campo são listadas a seguir:

- Instrumentos de campo:
 - Célula de carga marca Kyowa, capacidade máxima de leitura de 2.000 kgf e fundo de escala de 0,1 kgf;
 - Fluxômetro marca Oval, modelo LSF41, com fundo de escala de 100 L h⁻¹ e resolução de 1 ml por pulso;
 - Sistema de aquisição de dados, modelo CR10X, marca Campbell de 10 canais;
 - Cronômetro digital marca Casio, capacidade de leitura de 0,1 s;
 - 4 unidades para sub-amostragens (tambores metálicos com correntes);
 - Tripé de ferro para suporte da célula de carga;
 - Trenas flexíveis, compasso de madeira de abertura máxima de 2 m;
 - Facões, cordas, estacas, lonas plásticas e sacos plásticos de diversos tipos e tamanhos, ganchos de ferro, cordas, fita crepe, latas de alumínio com tampas, facões, estacas de madeira, correntes de ferro, encerados de plástico, cinco baterias 12 v.
- Instrumentos de laboratório:
 - Triturador, balanças de precisão, mufla e cadinhos;
 - Microcomputadores com programas de planilha eletrônica específicos para conversão de dados do CR10 e Estatístico SAS;
 - Balança Metler, capacidade de leitura de 4,9 kg e fundo de escala de 0,001 g;
 - Estufa marca Tecnal;
 - Estufa marca FANEN;
 - Peneiras padrão para análise granulométrica de solo, mufla, peneiras granulométricas.
- Máquinas utilizadas
 - Colhedora de cana-de-açúcar John Deere, modelo 3522⁹;
 - 2 transbordos, sendo um instrumentado com células de carga;
 - Carreta;
 - Carregadora de cana-de-açúcar.

⁹ As características técnicas da colhedora já foram apresentadas no Quadro 2, no item 2.2.3.

3.2 Tratamentos

Para a avaliação do desempenho da colhedora foi pré-determinado o uso de duas velocidades de deslocamento, sendo 5 km h^{-1} ou $1,4 \text{ m s}^{-1}$ (V1) e 7 km h^{-1} ou $1,9 \text{ m s}^{-1}$ (V2), resultando, portanto, em dois tratamentos. Cada tratamento foi submetido a 7 repetições, sendo que, portanto, foram realizadas no total 14 determinações. Ressalta-se ainda, que todas as repetições foram realizadas pelo mesmo operador.

A escolha de tais velocidades considerou as conclusões de diversos autores sobre o assunto, que relatam que velocidades muito baixas podem inviabilizar o uso econômico da máquina, bem como os atuais limites para a colheita mecanizada de cana-de-açúcar, estes influenciados por diversos fatores como, condições de relevo, solo, produtividade, porte do canavial, entre outros. Anteriormente as repetições, foram realizados testes preliminares de modo a verificar qual a maior velocidade que a colhedora conseguiria atingir sem que houvessem “embuchamentos”. Dado as condições da área, principalmente no que diz respeito à alta produtividade agrícola, os valores máximos obtidos ficaram próximos a 7 km h^{-1} . Cabe ressaltar que o intervalo entre as velocidades pré-estipuladas compreende boa parte dos valores adotados como padrão para muitas usinas hoje no Brasil.

3.3 Caracterização da área de ensaio

Segundo Ripoli (1996), a condição do canavial tem grande influência no desenvolvimento operacional das máquinas utilizadas na colheita de cana e deve, portanto, ser caracterizada. Os principais aspectos relacionados a essa caracterização são porte do canavial e umidade do solo.

O porte do canavial é definido como sendo a posição relativa e a quantidade em que os colmos se apresentam em relação ao terreno. A determinação de tal parâmetro seguiu a metodologia proposta por Ripoli (1996), que utiliza de um triângulo retângulo (Figura 26), sendo tomadas vinte amostras ao acaso, em diferentes fileiras de plantio.

Figura 26 - Critério para avaliação do porte do canavial

Fonte: Ripoli (1996), adaptado.

De acordo com Ripoli (1996), quanto maior for a umidade do solo no momento da colheita, maior será a probabilidade de arraste de material estranho junto à matéria-prima, elevando, portanto, a quantidade de matéria estranha mineral.

Para a determinação da umidade do solo, seguiu-se o método proposto pelo mesmo autor, sendo tomadas ao acaso, em cada repetição, na fileira de plantio e após a passagem da colhedora, 10 amostras de solo abrangendo a profundidade de 0 a 10 cm. Posteriormente, em laboratório, foi utilizado o método de determinação gravimétrico padrão, com base na massa de solo seco em estufa à temperatura de 105 a 110 °C.

3.4 Desempenho operacional

As determinações de campo foram baseadas nos conceitos e metodologia propostas por Ripoli (1996) e por Ripoli e Ripoli (2009).¹⁰ Apesar de nos itens subsequentes ser realizado o detalhamento de cada determinação do ensaio, a seguir é apresentado uma síntese das variáveis avaliadas, que remetem basicamente à capacidade de colheita, qualidade da operação e consumo de combustível:

CAPACIDADE DE COLHEITA

- Capacidade efetiva bruta de matéria-prima ($t\ h^{-1}$) – CEBMP
- Capacidade efetiva bruta de colmos ($t\ h^{-1}$) – CEBC
- Capacidade efetiva líquida de colmos ($t\ h^{-1}$) – CELC

QUALIDADE DA OPERAÇÃO

- Matéria estranha vegetal (%) – MEV
- Matéria estranha mineral (%) – MEM
- Matéria estranha total (%) – MET
- Perdas de rebolos inteiros ($t\ ha^{-1}$ e %) – PRI
- Perdas de frações de rebolos ($t\ ha^{-1}$ e %) – PFR
- Perdas de tocos na soqueira ($t\ ha^{-1}$ e %) – PTS
- Perdas de colmos e/ou suas frações ($t\ ha^{-1}$ e %) – PCF
- Perdas totais ($t\ ha^{-1}$ e %) – PT
- Eficácia de manipulação (%) – EM
- Perdas de raízes ($t\ ha^{-1}$) – PR

CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

- Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta matéria-prima ($L\ h^{-1}$ e $L\ t^{-1}$) – CCMP
- Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de colmos ($L\ t^{-1}$) – CCEBC
- Consumo de combustível na capacidade efetiva líquida de colmos ($L\ t^{-1}$) – CCELC

¹⁰ Cabe ressaltar que tal metodologia trata-se de uma proposta de ensaios padronizados para colhedoras de cana-de-açúcar, tendo em vista que até o momento não existe nenhuma norma padronizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a respeito.

3.4.1 Mensuração da velocidade operacional

As repetições, para cada tratamento, corresponderam a distâncias variando de 130 a 150 metros (“tiro de colheita”), sendo que em cada uma delas, registrou-se o tempo decorrido de colheita por meio de cronometragem. Após a passagem da colhedora, foi realizada uma medida de verificação por meio de um gabarito de 2 metros, aferindo-se, portanto, a distância percorrida em cada na repetição.

3.4.2 Determinação da qualidade e quantidade da matéria-prima colhida

Em cada repetição, para amostragem e determinação da quantidade de matéria-prima colhida, foram colocados dois tambores metálicos dentro do transbordo que acompanhou a colhedora durante a operação. Após o “tiro” de colheita, ambos recipientes foram retirados da unidade de transbordo e pesados, sendo que em seguida promoveu-se a separação e ensaque do material contido nos tambores, tomando-se assim sub-amostras para envio a unidade industrial, de modo a submeter o material coletado à análises tecnológicas, determinando, entre outros aspectos, as impurezas minerais e vegetais.

Paralelamente a tais etapas, o transbordo instrumentado com células de carga, registrou o valor proveniente da pesagem do material colhido. Somando-se este valor com os encontrados nas sub-amostras retiradas nos tambores, retirando-se as respectivas taras, foi possível determinar a quantidade de matéria-prima colhida pela máquina durante cada repetição. De forma a resumir o processo, as etapas são ilustradas na Figura 27.

Figura 27 – Sequência de operações para determinação da qualidade e quantidade de matéria prima colhida: a) Tambores para retirada de sub-amostras; b) Colhedora em operação numa determinada repetição; c) Retirada dos tambores do transbordo que acompanhou a colhedora; d) Detalhe dos tambores com matéria-prima colhida e do transbordo instrumentado; e) Separação do material para envio à unidade industrial e; h) Material separado para envio à unidade industrial, de modo a serem realizadas as análises de qualidade

3.4.3 Capacidade de colheita

Feitas as considerações sobre capacidade de colheita no item 2.2.2, o presente trabalho considera apenas o conceito de capacidade efetiva, de modo que as avaliações foram direcionadas no sentido específico de verificar a máquina durante a colheita, desconsiderando, portanto, os demais tempos atrelados à operação, como por exemplo, manobras de cabeceira, reabastecimento, manutenção, entre outros, que diferenciam a capacidade operacional.

3.4.3.1 Capacidade efetiva bruta de matéria-prima

A capacidade efetiva bruta de matéria-prima (CEBMP), segundo Ripoli e Ripoli (2009), considera toda a quantidade de produto colhido liberada no transbordo, não contabilizando a matéria estranha contida na carga e as perdas ocorridas no campo durante a operação. Portanto, para determinação do presente parâmetro dividiu-se a massa do produto colhida na operação, cuja determinação foi descrita no item 3.4.2, pelo tempo cronometrado durante a repetição, conforme descreve a equação abaixo:

$$CEBMP = \frac{W_e}{T_e} \times 3,6 \quad (2)$$

Sendo:

CEBMP = Capacidade efetiva bruta de matéria-prima, em $t\ h^{-1}$.

W_e = Massa de produto colhida, lançada no veículo de transporte, durante o ensaio, em kgf.

T_e = Tempo cronometrado de ensaio, durante o qual se recolheu a massa W_e , em s.

3.4.3.2 Capacidade efetiva bruta de colmos

Para que seja determinada a capacidade efetiva em termos de matéria-prima industrializável, ou seja, colmos de cana-de-açúcar, faz-se necessário o desconto da matéria estranha contida na carga. A determinação de tais impurezas foi realizada no laboratório da unidade industrial onde foi realizado o ensaio, sendo que a partir dos valores informados, determinou-se a capacidade efetiva bruta de colmos (CEBC), conforme equação (3).

$$CEBC = CEBMP - CEBMP \times MET \quad (3)$$

Sendo:

CEBC = Capacidade efetiva bruta de colmos, em $t\ h^{-1}$.

CEBMP = Capacidade efetiva bruta de matéria-prima, em $t\ h^{-1}$.

MET = Índice de matéria estranha total, em %.

3.4.3.3 Capacidade efetiva líquida de colmos

A capacidade efetiva líquida de colmos (CELC), também denominada de capacidade efetiva líquida calculada, tem como base a relação da capacidade colheita com o parâmetro “Eficácia de manipulação”, um indicador de qualidade de operação que realiza o desconto das perdas ocorridas na colheita e cujo detalhamento é feito no item a seguir.

O cálculo da capacidade efetiva líquida de colmos é determinado pela seguinte equação:

$$CELC = CEBC \times EM \quad (4)$$

Sendo:

CELC = Capacidade efetiva líquida de colmos, em $t\ h^{-1}$.

CEBC = Capacidade efetiva bruta de colmos, em $t\ h^{-1}$.

EM = Eficácia de manipulação, em %.

3.4.4 Eficácia de manipulação

A eficácia de manipulação (EM) para colhedoras combinadas trata-se da relação entre a quantidade de rebolos de colmos colocados na unidade de transporte e a quantidade de colmos existentes na fileira de plantio, conforme equação (5). Em termos práticos, quanto mais próximo de 100% estiver o indicador, melhor a operação esta sendo realizada.

$$EM = \frac{t_c}{T_c} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

EM = Eficácia de manipulação, em %.

t_c = Quantidade de rebolos de colmos colocados na unidade de transporte, em kgf ou t ha⁻¹.

T_c = Quantidade de colmos existentes na fileira de plantio, em kgf ou t ha⁻¹.

Ainda de acordo com Ripoli e Ripoli (2009), a quantidade de colmos existentes na fileira de plantio pode ser expressa pela soma da quantidade de rebolos disponíveis com as perdas ocorridas durante a operação, conforme equação (6). Ressalta-se que a extrapolação dos valores da fileira para um hectare permite a apuração da produtividade agrícola do canavial.

$$T_c = t_c + PT \quad (6)$$

Sendo:

T_c = Quantidade de colmos existentes na fileira de plantio, em kgf ou t ha⁻¹.

t_c = Quantidade de rebolos de colmos colocados na unidade de transporte, em kgf ou t ha⁻¹.

PT = Perdas totais ocorridas, em kgf ou t ha⁻¹.

Substituindo-se (6) em (5), obtêm-se a seguinte equação:

$$EM = \frac{t_c}{t_c + PT} \times 100 \quad (7)$$

O parâmetro perdas totais (PT), será mais bem detalhado, abordando-se, inclusive, a metodologia de amostragem, no subitem a seguir. A determinação do t_c pode ser verificada na equação (8). Em linhas gerais, relaciona-se a massa do produto colhida durante a repetição (W_s), descontando-se as impurezas (MET), com distância percorrida pela máquina (C) considerando o número de fileiras que a mesma colhe numa única passada (N_f), realizando-se ainda, a extrapolação para um hectare, expresso em metros lineares de fileiras de plantio (L).

$$t_c = ((W_s - W_s \times MET) \div 1000 \times L) \div (C \times N_f) \quad (8)$$

Sendo:

t_c = Quantidade de rebolos de colmos colocados na unidade de transporte, em kgf ou $t \text{ ha}^{-1}$.

W_s = Massa de produto colhida, lançada no veículo de transporte, durante o ensaio, em kgf.

MET = Índice de matéria estranha total, em %.

L = Metros lineares em um hectare.

C = Comprimento da repetição, em metros.

N_f = Número de fileiras que a máquina colhe.

3.4.5 Perdas¹¹

A determinação das perdas visíveis de matéria-prima foi realizada a partir do método direto, que de acordo com Ripoli e Ripoli (2009), trata-se da coleta, classificação e pesagem do material remanescente no campo após a passagem da colhedora. Ainda segundo os autores, para que a área amostral na determinação de perdas visíveis de cana-de-açúcar possa ser representativa, um múltiplo de seu espaçamento entre fileiras deve ser adotado, de modo que sua extrapolação para hectare, alqueire ou qualquer que seja a unidade de área adotada, não sofra distorções.

No espaçamento duplo alternado, como já destacado anteriormente, a distância entre as fileiras é variável, sendo assim, considerando o espaçamento 0,9 x 1,6 m, o que totaliza 2,5 m, o espaçamento individual de cada fileira será de 1,25 m. Deste modo, assume-se como múltiplo de espaçamento para determinação da área amostral, o valor de 2,5 m. Para cada repetição, anteriormente ao “tiro” da colhedora, foram demarcadas ao longo de cada fileira, três áreas amostrais para o recolhimento das perdas, as quais se encontravam previamente limpas para a posterior passagem da colhedora (Figura 28). Cada uma destas três áreas apresentavam as dimensões de 2,5 m de largura por 10 m de comprimento, ou seja, 25 m^2 , totalizando, portanto uma área amostral de 75 m^2 . Especificamente para perdas de tocos na soqueira, conforme a classificação que será feita a seguir, dado a característica da perda, ou

¹¹ Dado a impossibilidade de mensuração de perdas invisíveis no campo (RIPOLI; RIPOLI, 2009), o presente trabalho trata apenas das perdas remanescentes no campo, ou seja, perdas visíveis.

seja, ela ocorre apenas na fileira colhida, utilizou-se o valor de largura de 1,25 m e, portanto, a área amostral neste caso é menor, sendo 37,5 m².

Figura 28 - Sub-amostra demarcada e livre de material remanescente antes de cada repetição

Após a passagem da colhedora, o material remanescente da área amostral foi recolhido, ensacado e pesado separadamente por tipo de perda (Figura 29 e Figura 30), sendo seguida a classificação proposta por Ripoli e Ripoli (2009):

- a) Rebolos inteiros (PRI): Frações de colmo integral com tamanho definido pelo picador da máquina, nesse caso, 16 cm;
- b) Frações de rebolo (PFR): Frações de cana menor que um rebolo, nesse caso, pedaços menores que 16 cm;
- c) Colmos e/ou suas frações (PCF): Frações de cana maior que um rebolo, nesse caso, pedaços maiores que 16 cm;
- d) Tocos na soqueira (PTS): Frações de colmos remanescentes na soqueira após passagem da máquina.

Figura 29 - Recolhimento das perdas remanescentes na área amostral após passagem da colhedora

Figura 30 - Tipos de perdas: A – rebolo inteiro (PRI); B – frações de rebolo (PFR); C – colmos e/ou suas frações (PCF); D – tocos na soqueira (PTS)

A somatória desses quatro tipos de perdas (equação 9) resulta no parâmetro perdas visíveis totais (PT), que quando relacionado com a com a área amostral, é possível verificar as perdas ocorridas em um hectare. Cabe ressaltar, que para a quantificação das perdas, foi descontado em todas as repetições, o valor de 0,143 kgf, referente à tara média dos sacos. Além das perdas visíveis, foram recolhidos na mesma área amostral, eventuais pedaços de raízes soltas no solo (PR), com o intuito de verificar arranques e abalos de soqueira. Vale ressaltar que tal tipo de perda não é contabilizado nas perdas visíveis totais, dado que não ocorre acúmulo de sacarose.

$$PT = PRI + PFR + PCF + PTS \quad (9)$$

Sendo:

PT = Perdas totais, em kgf ou t ha⁻¹.

PRI = Perdas de rebolos inteiros, em kgf ou t ha⁻¹.

PFR = Perdas de frações de rebolos, em kgf ou t ha⁻¹.

PCF = Perdas de colmos e/ou suas frações, em kgf ou t ha⁻¹.

PTS = Perdas de tocos na soqueira, em kgf ou t ha⁻¹.

Além da expressão em toneladas por hectare, os indicadores de perdas são geralmente apresentados também em termos percentuais, bastando relacionar os valores obtidos com a produtividade agrícola da área, conforme equação (10)¹².

$$PT^* = \frac{PT}{PA} \quad (10)$$

Sendo:

PT* = Perdas totais, em %.

PT = Perdas de totais, em t ha⁻¹.

PA = Produtividade agrícola, em t ha⁻¹.

¹² De modo a simplificar, foi apresentada apenas a relação para o índice “perdas totais”. A determinação individual, por tipo de perda, segue a mesma linha de raciocínio.

3.4.6 Consumo de combustível

O consumo horário de combustível foi determinado, na resolução de 1 ml por segundo, a partir da adaptação de um fluxômetro no circuito de combustível da máquina. A partir do consumo de combustível horário ($L h^{-1}$), foram determinados ainda os consumos por tonelada colhida (equação 11)¹³, utilizando como referência os indicadores de capacidade colheita, capacidade efetiva bruta de matéria-prima (CEBMP), capacidade efetiva bruta de colmos (CEBC) e capacidade efetiva líquida de colmos (CELC).

$$CCMP^* = \frac{CCMP}{CEBMP} \quad (11)$$

Sendo:

$CCMP^*$ = Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria-prima, em $L t^{-1}$.

$CCMP$ = Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria-prima, em $L h^{-1}$.

$CEBMP$ = Capacidade efetiva bruta de matéria-prima, em $t h^{-1}$.

3.4.7 Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado, sendo 2 tratamentos e 7 repetições para cada tratamento, totalizando 14 determinações (Figura 31). Para análise estatística aplicou-se o teste F, ao nível de significância de 5% de probabilidade, de modo a verificar se as médias apresentam diferenças significativas. Apesar de o trabalho apresentar somente dois tratamentos, sendo possível, portanto, determinar as diferenças simplesmente pela análise de variância, aplicou-se o teste Tukey para confirmar as comparações de probabilidade de médias.

¹³ De modo a simplificar, foi apresentada apenas a relação com base no consumo na capacidade efetiva bruta de matéria-prima. Os consumos na capacidade efetiva bruta e líquida de colmos seguem a mesma linha raciocínio, utilizando, evidentemente, as respectivas variáveis.

Figura 31 - Representação esquemática da área experimental

Ainda, de modo a verificar a relação entre a velocidade de deslocamento e as variáveis em análise, utilizou-se o coeficiente de correlação linear de Pearson, detalhada na equação (12), que mede a intensidade com que se manifesta uma associação linear entre duas variáveis (X e Y).

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \quad (12)$$

Sendo:

ρ = Coeficiente de correlação;

Cov = Covariância;

σ = Desvio padrão.

Fonte: Lira (2004).

O intervalo de medida para tal coeficiente varia entre -1 e 1, sendo que valores positivos indicam a tendência de uma variável aumentar à medida que a outra aumenta, e os negativos, o contrário, sugerindo que o aumento de uma variável implica na redução da outra. Quanto mais próximo dos extremos, maior a intensidade da relação, podendo-se estipular ainda uma interpretação qualitativa mediante definição de intervalos, conforme Lira (2004) citando Callegari-Jacques (2003):

- Se $0,00 < |\rho| < 0,30$, existe fraca correlação linear;
- Se $0,30 \leq |\rho| < 0,60$, existe moderada correlação linear;
- Se $0,60 \leq |\rho| < 0,90$, existe forte correlação linear;
- Se $0,90 \leq |\rho| < 1,00$, existe correlação linear muito forte.

3.5 Desempenho econômico

O desempenho econômico da colhedora foi avaliado no sentido de verificar o custo por tonelada colhida, determinado a partir da relação entre os custos fixos e variáveis com a capacidade de trabalho da máquina. O desenvolvimento do modelo computacional tomou como base a estrutura apresentada por Santos (2011).

O custo operacional (CO) é determinado pela razão entre o custo horário da colhedora (CHC) e a capacidade de trabalho da máquina, que no caso refere-se à capacidade efetiva bruta de matéria- prima (CEBMP) determinada no ensaio de campo, conforme equação (13).

$$CO = \frac{CHC}{CEBMP} \quad (13)$$

Sendo:

CO = Custo operacional, em R\$ t⁻¹;

CHC = Custo horário da colhedora, em R\$ h⁻¹;

CEBMP = Capacidade efetiva bruta de matéria-prima, em t h⁻¹.

O custo horário da colhedora é resultante da soma entre custo fixo e custo variável, conforme equação (14).

$$CHC = CFH + CVH \quad (14)$$

Sendo:

CHC = Custo horário da colhedora, em R\$ h⁻¹;

CFH = Custo fixo horário, em R\$ h⁻¹;

CVH = Custo variável horário, em R\$ h⁻¹.

O cálculo do custo fixo horário baseou-se na metodologia proposta pela American Society of Agricultural and Biological Engineers – ASABE (2011), conforme equação (15). Cabe ressaltar que a equação abaixo originalmente contempla apenas os custos com depreciação, juros, alojamentos, seguros e taxas, e que, de forma a apurar o custo de forma mais real, foi considerado ainda os custos atrelados a operadores (COP).

$$CFH = \frac{\left\{ VI \times \left[\left(\frac{1 - VF}{VUA} \right) + \left[\left(\frac{1 + VF}{2} \right) \times i \right] + AST \right\} + COP}{NHTA} \quad (15)$$

Sendo:

CFH = Custo fixo horário, em R\$ h⁻¹;

VI = Valor inicial, em R\$;

VF = Valor final, em % do valor inicial;

VUA = Vida útil, em anos;

i = Taxa de juros aplicada ao capital médio, em %;

AST = Custo anual com alojamento, seguros e taxas, em % em relação ao valor inicial;

COP = Custo com operadores, em R\$ ano⁻¹;

NHTA = Número de horas trabalhadas no ano.

Para o valor inicial (VI), utilizou-se o montante de R\$ 1.060.000,00, apurado junto a concessionárias que comercializam o modelo de colhedora em questão. No valor final (VF), considerou-se 15% em relação ao valor inicial da máquina, determinado a partir de entrevistas com fabricantes, usinas e prestadores de serviços. Ressalta-se que atualmente a compra de colhedoras usadas não é prática muito comum no setor, visto os altos custos de manutenção atrelados ao aumento das horas de utilização da máquina, conforme citação de Banchi et al. 2012c.

Para a vida útil em anos (VUA), pelo fato de depender, entre outros, da intensidade de utilização da máquina, utilizou-se a relação entre vida útil em horas (VUH) e número de horas trabalhadas por ano (NHTA), conforme equação (16). Para VUH foi utilizado o valor de 12.000 horas e para NHTA utilizou-se 2.900 horas, de acordo com valores apresentados por (Banchi et al. 2012c).

$$VUA = \frac{VUH}{NHTA} \quad (16)$$

Sendo:

VUA = Vida útil, em anos;

VUH = Vida útil, em horas;

NHTA = Número de horas trabalhadas no ano.

No caso da taxa de juros (i), o valor considerado foi de 5,0 % a.a. O mesmo foi apurado junto a programas do Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES (2011) para fins de aquisição de máquinas agrícolas, como PRONAMP (Programa Nacional de Apoio ao Médio Produtor Rural) e MODERFROTA (Programa de Modernização da Frota de Tratores Agrícolas e Implementos Associados e Colheitadeiras), com taxa de juros de 5,0% e 5,5% a.a., respectivamente. Para alojamento, seguros e taxas (AST), considerou-se 2% em relação ao valor inicial, conforme Santos (2011).

Por fim, o custo com operadores (COP) foi determinado pela equação (17). Os valores de referência utilizados foram obtidos junto a Oliveira (2012), sendo: NOP = 4; SOP = 1.600 e ET = 75%.

$$COP = NOP \times SOP \times (1 + ET) \times 12 \quad (17)$$

Sendo:

COP = Custo com operadores, em R\$.ano⁻¹;

NOP = Número de operadores por máquina;

SOP = Salário médio do operador, em R\$.mês⁻¹;

ET = Encargos trabalhistas, em %.

O cálculo do custo variável horário (CVH), no caso de colhedoras, envolve basicamente os custos com combustível (CCB), lubrificantes (CCL) e reparos e manutenção (CRM), conforme equação (18).

$$CVH = CCB + CCL + CRM \quad (18)$$

Sendo:

CVH = Custo variável horário, em R\$ h⁻¹.

CCB = Custo com combustível, em R\$ h⁻¹.

CCL = Custo com lubrificantes, em R\$ h⁻¹.

CRM = Custo com reparos e manutenção, em R\$ h⁻¹.

O cálculo do custo com combustível é realizado por meio da equação (19). A referência para o preço do combustível (PL) foi o diesel, cujo valor utilizado foi de 2,08 R\$ L⁻¹, de acordo com o sistema de levantamento de preços da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2012), enquanto que para o consumo de combustível foram utilizados os valores determinados no ensaio de campo, considerando o consumo efetivo na matéria-prima (CCEMP).

$$CCB = PL \times CCMP \quad (19)$$

Sendo:

CCB = Custo com combustível, em R\$ h⁻¹.

PL = Preço do combustível, em R\$ L⁻¹.

CCMP = Consumo de combustível efetivo na matéria-prima, em L h⁻¹.

Para o custo com lubrificantes, utilizou-se como referência a proporção do custo com combustíveis, conforme equação (20), que de acordo com Banchi et al. (2005) é em média de 11,58% para colhedoras de cana-de-açúcar.

$$CCL = CCB \times PLC \quad (20)$$

Sendo:

CCL = Custo com lubrificantes, em R\$ h⁻¹.

CCB = Custo com combustível, em R\$ h⁻¹.

PLC = Consumo relativo de lubrificantes em relação ao combustível, em %.

O custo de reparos e manutenção (CRM) utilizou como base ASABE (2011), que relaciona o presente custo com o valor inicial e vida útil da máquina, conforme equação (21).

$$CRM = \frac{FRM \times VI}{VUH} \quad (21)$$

Sendo:

CRM = Custo com reparos e manutenção, em R\$ h⁻¹;

FRM = Fator de reparos e manutenção, em %;

VI = Valor inicial, em R\$;

VUH = Vida útil, em horas.

Para determinação do FRM, utilizou-se a equação (22), proposta por Banchi et al. (2008) e desenvolvida empiricamente com base em estudo de colhedoras de cana de 8 diferentes usinas, fabricadas no período de 1997 e 2007.

$$FRM = (4 \times 10^{-9} \times VUH^2) + (3 \times 10^{-5} \times VUH) \quad (22)$$

Sendo:

FRM = Fator de reparos e manutenção, em %;

VI = Valor inicial, em R\$;

VUH = Vida útil, em horas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do canavial: Porte, produtividade agrícola e umidade do solo

Na realização do ensaio, o porte do canavial foi definido como ereto (Figura 32), com 90% dos colmos acima do ângulo de 45°, conforme descrito na Figura 26. A Figura 35 apresenta os resultados obtidos de produtividade agrícola, onde se observa uma variabilidade entre as repetições, sendo que para o mesmo talhão a amplitude da variável foi de 38 t ha⁻¹, com mínimo de 136 t ha⁻¹ e máximo de 174 t ha⁻¹. Apesar desses extremos, nota-se certa concentração de valores entre 155 e 160 t ha⁻¹, sendo que em termos médios não houve diferença estatística ao nível de 5% de significância entre os tratamentos.

Vale ressaltar que tal nível de produtividade é considerado satisfatório para produção de cana-de-açúcar e ainda que para este trabalho não se possa afirmar estatisticamente que o espaçamento duplo alternado foi o principal fator desse bom resultado, há indícios de que a adoção do sistema teve influência. Considerando que a área do estudo é de primeiro corte, os resultados obtidos se mostram bem superiores aos valores também de primeiro corte para a região Centro-Sul canavieira, que de acordo com o MAPA (2012), nas últimas safras foram de: 105,10 t ha⁻¹ na safra 2007/2008; 105,80 t ha⁻¹ na safra 2008/2009; 110,44 t ha⁻¹ na safra 2009/10; 108,56 t ha⁻¹ na safra 2010/11 e; 92,14 t ha⁻¹ na safra 2011/12.

Figura 32 - Porte do canavial

Figura 33 - Produtividade agrícola (t ha⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Em relação à umidade do solo, a partir das amostras de solo efetuadas, apresentam-se na Figura 34 os resultados obtidos, onde se observa que os valores pouco variaram entre as repetições, com média entre os tratamentos não diferindo estatisticamente ao nível de 5% de significância. Sendo assim, observa-se que o ensaio foi realizado dentro das condições aceitáveis de campo e que, portanto, a umidade não influenciou na porcentagem de terra arrastada junto à matéria-prima (matéria estranha mineral).

Figura 34 - Umidade do solo (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

4.2 Velocidade efetiva de deslocamento (km h^{-1})

Na Figura 35 são apresentados os resultados para velocidade efetiva de deslocamento. Como se nota em nenhuma repetição os valores atingiram as velocidades pré-estabelecidas em cada tratamento, sendo $5,0 \text{ km h}^{-1}$ para V1 e $7,0 \text{ km h}^{-1}$ para V2. Tal fato está relacionado, principalmente, a alta produtividade agrícola da área, conforme detalhamento realizado no item anterior. Apesar disso, os tratamentos resultaram em diferença estatística ao nível de 5% de significância, alcançando, portanto, o objetivo de se trabalhar com diferentes velocidades. Ressalta-se ainda, que dado à dificuldade em se obter com precisão valores de velocidade em nível de campo, entende-se pelos valores encontrados, que as variações ocorridas dentro de cada tratamento são perfeitamente aceitáveis.

Figura 35 - Velocidade efetiva de deslocamento (km h^{-1}) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

4.3 Desempenho operacional

De forma a resumir as informações, é apresentado na Tabela 24 os resultados para a análise de variância e Teste de Tukey (5%) para cada variável do trabalho. A abordagem individual e detalhada de cada parâmetro, inclusive confrontando os resultados encontrados com trabalhos de outros autores, é realizada do item 4.3.1 ao item 4.3.3. Como se nota, as variáveis que diferiram estatisticamente ao nível de 5% de significância, ou seja, que foram influenciadas pela velocidade de deslocamento, remetem basicamente a parâmetros de capacidade de colheita e consumo de combustível.

Tabela 24 – Resultados da análise de variância e Teste de Tukey (5%) para cada variável

Variável	Und.	F tratamentos	Média geral	Desvio-padrão	DMS (5%)	CV (%)	Teste de Tukey a 5%:	
							V1	V2
Velocidade de deslocamento – VE	km h ⁻¹	58,43**	4,65	0,34	0,39	7,23	3,97 b	5,34 a
Produtividade agrícola – PA	t ha ⁻¹	0,66	156,88	10,86	12,64	6,92	159,24 a	154,53 a
Matéria estranha vegetal – MEV	%	1,50	2,29	0,46	0,53	20,03	2,14 a	2,44 a
Matéria estranha mineral – MEM	%	0,54	0,39	0,22	0,25	56,04	0,34 a	0,43 a
Matéria estranha total – MET	%	1,94	2,67	0,52	0,60	19,34	2,48 a	2,87 a
Perdas de rebolos inteiros – PRI	t ha ⁻¹	4,16	1,11	0,82	0,95	73,40	1,56 a	0,67 a
Perdas de frações de rebolos – PFR	t ha ⁻¹	0,02	1,47	0,86	1,01	58,61	1,44 a	1,5 a
Perdas de tocos na soca – PTS	t ha ⁻¹	0,34	3,37	2,62	3,05	77,87	3,78 a	2,96 a
Perdas de colmos e/ou suas frações – PCF	t ha ⁻¹	2,27	0,98	0,70	0,81	71,24	0,7 a	1,26 a
Perdas totais – PT	t ha ⁻¹	0,27	6,93	3,91	4,55	56,36	7,48 a	6,39 a
Perdas de rebolos inteiros – PRI	%	4,49	0,69	0,48	0,56	69,98	0,96 a	0,42 a
Perdas de frações de rebolos – PFR	%	0,04	0,93	0,51	0,59	54,97	0,9 a	0,95 a
Perdas de tocos na soca – PTS	%	0,28	2,09	1,55	1,80	74,10	2,3 a	1,87 a
Perdas de colmos e/ou suas frações – PCF	%	2,66	0,63	0,45	0,52	71,78	0,43 a	0,82 a
Perdas totais – PT	%	0,20	4,33	2,24	2,61	51,71	4,6 a	4,06 a
Eficácia de manipulação – EM	%	0,20	95,67	2,24	2,61	2,34	95,4 a	95,94 a
Perdas de raízes – PR	t ha ⁻¹	0,17	0,04	0,08	0,10	197,99	0,03 a	0,05 a
Cap. de colheita de matéria-prima – CEBMP	t h ⁻¹	36,08**	178,85	15,13	17,62	8,46	154,57 b	203,14 a
Cap. de colheita de colmos (bruto) – CEBC	t h ⁻¹	36,05**	174,01	14,52	16,91	8,34	150,71 b	197,3 a
Cap. de colheita de colmos (líquido) – CELC	t h ⁻¹	38,44**	166,50	13,70	15,95	8,23	143,8 b	189,19 a
Cons. combust. matéria-prima – CCMP	L h ⁻¹	36,41**	68,72	0,78	0,91	1,14	67,46 b	69,98 a
Cons. combust. matéria-prima – CCMP	L t ⁻¹	24,66**	0,39	0,04	0,04	9,04	0,44 a	0,35 b
Cons. combust. colmos (bruto) – CCEBC	L t ⁻¹	24,19**	0,40	0,04	0,04	8,97	0,45 a	0,36 b
Cons. combust. colmos (líquido) – CCELC	L t ⁻¹	25,95**	0,42	0,04	0,04	8,90	0,47 a	0,37 b

* Para todas as variáveis o “Grau de Liberdade do Resíduo” foi 12; ** Apresentou diferença estatística na análise de variância a um nível de significância de 5%; *** DMS (5%) – Diferença mínima significativa; CV (%) – Coeficiente de variação.

A influência da velocidade de deslocamento nos parâmetros analisados, inclusive, pode ser mais bem visualizada na Figura 36, que representa o coeficiente de correlação entre as variáveis. Como já destacado no material e métodos (item 3), o intervalo de medida varia entre -1 e 1, sendo que valores positivos indicam a tendência de uma variável aumentar à medida que a outra aumenta, e os negativos, o contrário, sugerindo que o aumento de uma variável implica na redução da outra. Quanto mais próximo dos extremos, maior a intensidade da relação, podendo-se estipular ainda uma interpretação qualitativa mediante definição dos intervalos.

MEV – Matéria estranha vegetal; MEM – Matéria estranha mineral; MET – Matéria estranha total; PRI – Perda de rebolos inteiros; PFR – Perda de frações de rebolos; PTS – Perda de toco na soqueira; PCF – Perda de colmos e ou suas frações; PT – Perdas totais; EM – Eficácia de manipulação; PR – Perda de raízes; CEBMP – Capacidade efetiva bruta de matéria-prima; CEBC - Capacidade efetiva bruta de colmos; CELC - Capacidade efetiva líquida de colmos; CCMP – Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria-prima; CCEBC - Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de colmos; CCELC – Consumo de combustível na capacidade efetiva líquida de colmos.

Figura 36 - Coeficiente de correlação: Influência da velocidade de deslocamento nas variáveis analisadas

Observa-se que as variáveis que resultaram em diferença estatística apresentam correlação de forte a muito forte com a velocidade de deslocamento, sendo que os parâmetros relacionados à capacidade de colheita da máquina, como esperado, aumentam de acordo com o aumento de velocidade. No caso do consumo de combustível, nota-se que o consumo horário da máquina aumenta com o avanço da velocidade, enquanto que, o consumo por tonelada colhida decresce.

Para as demais variáveis, que remetem à qualidade da operação, dado que tratam basicamente de perdas e matéria estranha, as correlações se mostram de fraca a moderada. O aumento das perdas, muitas vezes associado ao aumento da velocidade da máquina, não foi verificado nas condições do trabalho. Os resultados, inclusive, se mostraram poucos conclusivos a respeito, já que enquanto alguns tipos de perdas diminuem com o avanço da velocidade, outros aumentam. Os índices de matéria estranha no geral aumentaram, porém, novamente, sendo as correlações consideradas de fraco a moderado.

No detalhamento individual dos parâmetros, será feita uma análise adicional para aqueles que apresentaram correlação de forte a muito forte com a velocidade de deslocamento, verificando-se a linha de tendência e respectiva equação que define a curva, sendo possível encontrar ainda, por meio de derivação, o ponto de ótimo da relação.

4.3.1 Capacidade efetiva de colheita

Os resultados para capacidade efetiva de colheita são apresentados em nível de matéria-prima (CEBMP) e colmos (CEBC e CELC), respectivamente, na Figura 37, Figura 38 e Figura 39. Ressalta-se que a diferença do indicador entre matéria-prima e colmos, esta basicamente relacionada ao indicador de matéria estranha total, cujos resultados são detalhados posteriormente do item 4.3.2.1 ao 4.3.2.3, sendo que no caso de colmos esta sendo descontado o teor de matéria estranha. A diferenciação entre “bruto” e “líquido”, na capacidade de colmos, por sua vez, relaciona-se ao indicador de perdas durante o processo de colheita, cujos resultados são detalhados posteriormente do 4.3.2.4 ao item 4.3.2.8, sendo que o indicador “líquido” desconsidera as perdas.

Figura 37 - Capacidade efetiva bruta de matéria prima ($t\ h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 38 - Capacidade efetiva bruta de colmos ($t\ h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 39 - Capacidade efetiva líquida de colmos ($t h^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Como se nota para as três variáveis, os valores para o tratamento V2 foram superiores ao V1, diferindo estatisticamente ao nível de 5% de significância. Tal diferença, como já salientada, esta atrelada a maior velocidade de deslocamento da máquina, que à medida que aumenta resulta em maior capacidade colheita.

Essa relação pode ser mais bem visualizada na Figura 40, cuja curva de tendência e respectiva equação que define a mesma, apresentam alto coeficiente de determinação (R^2). Derivando tal equação, verificou-se que neste caso o ponto de ótimo para a relação entre capacidade de colheita e velocidade foi de $5,65 km h^{-1}$.

Optou-se por mostrar a curva relacionada à capacidade efetiva líquida de colmos, tendo em vista que os outros parâmetros de capacidade de colheita não consideram a qualidade da operação, em especial perdas, e, portanto, indicariam que o ponto ótimo da relação seria a maior velocidade obtida, visto as considerações quanto à capacidade teórica de colheita na equação (1) no item 2.2.2. Ainda assim, nota-se que o ponto de ótimo para capacidade de colheita ficou bastante próximo ao maior valor encontrado nas repetições ($5,78 km h^{-1}$), o que sugere, novamente, que as perdas tiveram pouca relação com a velocidade de trabalho.

Figura 40 - Relação entre capacidade efetiva líquida de colmos (t h⁻¹) e velocidade de deslocamento (km h⁻¹)

Em análise comparativa¹⁴ com outros trabalhos que tratam do desempenho efetivo de colhedoras, é possível verificar na Figura 41 que a colheita realizada no espaçamento duplo alternado, ou seja, com a máquina colhendo numa única passada duas fileiras de cana, aumentou significativamente a capacidade de colheita de matéria-prima se comparado a resultados em espaçamento simples. Para o tratamento V1, cuja velocidade média foi de 3,97 km h⁻¹, a capacidade de colheita média da máquina ficou em torno de 155 t h⁻¹, ao passo que para os trabalhos listados, nessa mesma faixa de velocidade, os valores ficaram por volta de 50 t h⁻¹. No tratamento V2, tem-se a mesma percepção, com média de capacidade de colheita próximo a 200 t h⁻¹ frente a valores em torno de 80 t h⁻¹ dos outros trabalhos, considerando a mesma faixa de velocidade.

Teoricamente, com a adoção do espaçamento duplo alternado, a capacidade de colheita da máquina, numa mesma velocidade, iria ser o dobro do desempenho no espaçamento simples. Entretanto, observa-se que os valores foram ainda maiores, o que pode ser explicado pela elevada produtividade agrícola do canavial (no caso, média em torno de 155 t ha⁻¹), conforme conclusões apresentadas por Monaco Junior (2011) e Banchi et al. (2012), já mostradas anteriormente na Figura 22 e Figura 12, respectivamente, em que a capacidade da máquina, numa mesma velocidade, aumenta de acordo com a produtividade agrícola colhida.

¹⁴ Ressalta-se que, pelo menos 9 dos 12 trabalhos analisados utilizaram de metodologia de ensaio de campo semelhante a este trabalho.

Figura 41 – Comparativo de resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Capacidade efetiva bruta de matéria-prima ($t\ h^{-1}$)

Fonte: Cardoso (2011); Carvalho (2009); Ripoli (2004); Nery (2000); Furlani (1995); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Meyer (2001); Belardo (2010); Carvalho Filho (2000); Mazzonetto (2004); Yadav et al. (2002), adaptado.

4.3.2 Qualidade da operação de colheita

4.3.2.1 Matéria estranha mineral (%)

Na Figura 42 são apresentados os resultados para o indicador de qualidade “matéria estranha mineral (MEM)”. Como se observa, em apenas uma repetição de cada tratamento os valores se mostraram em níveis mais elevados, não ultrapassando, entretanto, o indicador de 1%. Na média, os tratamentos ficaram em torno dos 0,4%, não resultando em diferenças estatísticas significativas ao nível de 5% de probabilidade. Pode-se concluir, portanto, que os valores ficaram em níveis satisfatórios quanto à MEM, sendo considerados como “baixo” na classificação do CTC (Tabela 3).

Na análise comparativa com os outros trabalhos (Figura 43), observa-se que os resultados encontrados se encontram numa faixa comum de valores, situada numa amplitude que varia entre 0,00 e 1,00%, não havendo, a princípio, influência do espaçamento duplo alternado para tal variável.

Figura 42 – Matéria estranha mineral (%) em cada repetição em cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 43 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Matéria estranha mineral (%)

Fonte: Cardoso (2011); Nery (2000); Furlani (1995); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Belardo (2010); Carvalho Filho (2000); Schmidt Junior (2011), adaptado.

4.3.2.2 Matéria estranha vegetal (%)

Na Figura 44 são apresentados os resultados para o indicador de qualidade “Matéria estranha vegetal (MEV)”. Os valores apurados no ensaio não apresentaram diferença estatística significativa ao nível de 5%, ficando com valores médios de 2,14% para o tratamento V1 e 2,44% para o tratamento V2. Utilizando-se como base os critérios do CTC (Tabela 3), pode-se dizer que todas as repetições estão dentro dos limites desejáveis para tal parâmetro. Destaca-se, novamente, que tais valores são referências considerando o sistema de colheita de cana crua picada.

Quando comparado aos trabalhos da revisão bibliográfica, observa-se, inclusive, que os valores se encontram entre os mais baixos da amostra. Apenas os resultados encontrados por Cardoso (2011), que trabalha com o uso de dessecantes em pré-colheita, apresentou resultados no mesmo intervalo de valores. Os demais trabalhos apresentam resultados bastante dispersos, mas é possível observar certa concentração de valores no intervalo de 5% a 8%.

Figura 44 - Matéria estranha vegetal (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 45 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Matéria estranha vegetal (%)

Fonte: Cardoso (2011); Nery (2000); Furlani (1995); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Belardo (2010); Carvalho Filho (2000); Schmidt Junior (2011), adaptado.

4.3.2.3 Matéria estranha total (%)

Na Figura 46 são apresentados os resultados para o indicador de qualidade “Matéria estranha total (MET)”, que nada mais é do que a soma de MEM e MEV. Além dos valores totais, que para os tratamentos não diferiram estatisticamente ao nível de 5% de significância, pode ser visualizado na ilustração a distribuição para cada tipo de impureza. No geral, as impurezas vegetais respondem por 85% do material estranha total “agregado” à matéria-prima colhida.

Dado essa participação, as conclusões para a Figura 47, que compara o presente trabalho com os demais elencados na revisão bibliográfica, se mostram muito semelhantes a Figura 45, que ilustra as impurezas vegetais entre os trabalhos. Como se observa, as médias dos tratamentos V1 e V2 são os menores valores encontrados quando se compara aos trabalhos.

Figura 46 - Matéria estranha total (%) e distribuição de cada tipo de impureza em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 47 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Matéria estranha total (%)

Fonte: Cardoso (2011); Nery (2000); Furlani (1995); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Belardo (2010); Carvalho Filho (2000); Schmidt Junior (2011), adaptado.

4.3.2.4 Perdas de rebolos inteiros (t ha^{-1} e %)

A Figura 48 e a Figura 49 apresentam os resultados para perdas de rebolos inteiros em toneladas por hectare e em valores percentuais, respectivamente. Nota-se que os valores do tratamento V1 foram, em geral, maiores que o tratamento V2, em média, praticamente o dobro quando os comparados entre si. Apesar dessa diferença, os resultados não apresentaram diferença estatística significativa ao nível de 5% de significância.

Na Figura 50 e na Figura 51 é possível comparar visualmente os resultados com trabalhos que utilizaram metodologia semelhante de amostragem de perdas. Como se observa apesar dos valores apurados em t ha^{-1} (Figura 50) serem maiores do que os resultados encontrados por Belardo (2010) e Ripoli (2004), cujas perdas por rebolos inteiros se encontram num patamar de $0,20 \text{ t ha}^{-1}$, os resultados em níveis percentuais (Figura 51) se mostram num intervalo comum entre os trabalhos pesquisados. A diferença entre as análises se dá tendo em vista que as perdas em montantes percentuais estão relacionadas à produtividade agrícola do canavial, que no caso ficou em torno de 155 t ha^{-1} , resultando, consequentemente, numa diluição de valores.

Figura 48 - Perdas de rebolos inteiros (t ha^{-1}) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 49 - Perdas de rebolos inteiros (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 50 – Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de rebolos inteiros (t ha⁻¹)

Fonte: Belardo (2010); Ripoli (2004), adaptado.

Figura 51 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas rebolos inteiros (%)

Fonte: Nery (2000); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Carvalho Filho (2000); Ripoli (2004), adaptado.

4.3.2.5 Perdas de frações de rebolos (t ha⁻¹ e %)

Os resultados para perdas de frações de rebolos são apresentados na Figura 52 e Figura 53, respectivamente nas unidades t ha⁻¹ e %. Como se nota, em média, os resultados ficaram muito próximos entre os tratamentos, com valores em torno de 1,50 t ha⁻¹ ou 0,90%, não resultando, portanto, em diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância.

Quando comparado a outros trabalhos, os resultados em t ha⁻¹ (Figura 54) se mostram pouco acima dos valores encontrados por Belardo (2010), e bem superiores aos de Ripoli (2004). Na análise quanto a valores percentuais (Figura 55), entretanto, os valores acabam por ficar entre os menores da amostra, visto, novamente, a relação com a alta produtividade agrícola do canavial.

Figura 52 - Perdas de fração de reboles (t ha⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 53 - Perdas de fração de reboles (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 54 – Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de frações rebolos (t ha⁻¹)

Fonte: Belardo (2010); Ripoli (2004), adaptado.

Figura 55 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de frações de rebolos (%)

Fonte: Nery (2000); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Carvalho Filho (2000); Ripoli (2004), adaptado.

4.3.2.6 Perdas de tocos na soqueira ($t\ ha^{-1}$ e %)

Na Figura 56 e Figura 57 são apresentados os resultados em $t\ ha^{-1}$ e %, respectivamente, para perdas de tocos na soqueira. Como se nota, os valores foram maiores para o tratamento V1, cuja média ficou em $3,78\ t\ ha^{-1}$ ou 2,30%, comparativamente ao tratamento V2, que atingiu valores médios de $2,96\ t\ ha^{-1}$ ou 1,87%. Ainda assim, os tratamentos não diferiram estatisticamente ao nível de 5% de significância.

No comparativo com os trabalhos, observa-se que os valores em $t\ ha^{-1}$ (Figura 58) se mostraram acima dos encontrados por Ripoli (2004) e Belardo (2010). Dentre os tipos de perdas já abordados, a classificação “tocos na soqueira” foi a que apresentou a maior diferença em relação a resultados de outros autores. Na análise percentual (Figura 59), os valores do trabalho, no geral, também ficaram acima dos resultados de outros trabalhos, ainda que a diluição pela produtividade agrícola tenha diminuído as diferenças.

Os maiores valores para perdas de tocos na soqueira em espaçamento duplo alternado podem estar associados a três aspectos inicialmente: i) Paralelismo e nivelamento dos sulcos, conforme preconiza Furlani Neto (1995b); ii) Maior vigor e robustez da soqueira, tendo em vista a competição por luz que a planta é submetida com adensamento das entre-fileiras duplas, sendo que quando ocorrem perdas de soca, em especial pela “altura de tocos”, as mesmas tendem a ser maiores e; iii) Dado a grande quantidade de material vegetal, a visualização da entre-fileira a ser colhida é muitas vezes dificultada, em especial em canaviais acamados (que não foi o caso do estudo). Tal problema, entretanto, pode ser facilmente corrigido mediante utilização de ferramentas de agricultura precisão, como o emprego das coordenadas do plantio na colheita.

Figura 56 - Perdas de tocos na soqueira (t ha⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 57 - Perdas de tocos na soqueira (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 58 – Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas tocos na soca ($t\ ha^{-1}$)

Fonte: Belardo (2010); Ripoli (2004), adaptado.

Figura 59 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de tocos na soca (%).

Fonte: Nery (2000); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Carvalho Filho (2000); Ripoli (2004), adaptado.

4.3.2.7 Perdas de colmos e/ou suas frações ($t\ ha^{-1}$ e %)

Os resultados para perdas de colmos e/ou suas frações (PCF) são apresentados, respectivamente, em $t\ ha^{-1}$ e %, na Figura 60 e Figura 61. Dentre as classificações de perdas abordadas, esta foi a que a primeira que apresentou, em média, maiores valores para o tratamento V2 ($1,26\ t\ ha^{-1}$ ou $0,82\%$) quando comparado a V1 ($0,70\ t\ ha^{-1}$ ou $0,43\%$). Ainda assim, os tratamentos não mostraram diferença estatística ao nível de 5% de significância.

Na análise comparativa com os trabalhos, os valores se mostram novamente em maiores patamares sob a ótica “toneladas por hectare” (Figura 62), enquanto que o diagnóstico em termos percentuais acaba por ficar dentro de uma faixa comum à maioria dos valores, dado, novamente, sua relação com a produtividade agrícola.

Figura 60 - Perdas de colmos e/ou suas frações ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 61 - Perdas de colmos e/ou sua frações (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 62 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de colmos e/ou suas frações ($t\ ha^{-1}$)

Fonte: Belardo (2010); Ripoli (2004), adaptado.

Figura 63 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de colmos e/ou suas frações (%)

Fonte: Nery (2000); De Leon (2000); Molina Junior (2000); Carvalho Filho (2000); Ripoli (2004), adaptado.

4.3.2.8 Perdas totais (t ha⁻¹ e %)

Os resultados para perdas totais são apresentados na Figura 64 e Figura 65, respectivamente em t ha⁻¹ e %. Apesar de não serem verificadas diferenças estatísticas significativas ao nível de 5%, os valores para o tratamento V1 foram levemente superiores aos do tratamento V2, reflexo dos resultados individuais dos tipos de perdas já apresentados, em que todos eles, com exceção da classificação “colmos e/ou suas frações”, foram superiores em V1. Nota-se ainda uma amplitude de valores entre as repetições, em especial para o tratamento V1, cujos extremos vão de 2,02 a 14,40 t ha⁻¹. No computo total, as perdas de tocos na soca assumem grande importância, tendo em vista que sua participação relativa é geralmente a maior entre as repetições (Figura 66).

Ainda que o intervalo de velocidade de deslocamento da máquina deste trabalho tenha sido relativamente curto, foi possível verificar que as perdas de matéria-prima não aumentaram mediante aumento de velocidade, sendo tal conclusão semelhante à de outros

autores, como Ripoli et al (1999), Nery (2000), Molina Junior (2000), Carvalho Filho (2000), De León (2000), Carvalho (2009) e Belardo (2010).

Figura 64 - Perdas totais (t ha⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 65 - Perdas totais (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 66 - Participação relativa (%) de cada tipo de perda, nas perdas totais

No comparativo com outros trabalhos (Figura 67), nota-se a princípio que a colheita em espaçamento duplo alternado resultou em maiores perdas de matéria-prima, com valores girando em torno de 7 t ha^{-1} , ao passo que trabalhos que tratam de espaçamento simples, apesar de valores dispersos, ficam abaixo de 5 t ha^{-1} . Na análise de perdas em termos percentuais (Figura 68), a elevada produtividade agrícola do talhão acabou por diluir os valores, fazendo com que as perdas para o espaçamento duplo alternado situem-se numa faixa comum aos trabalhos que constam de espaçamento simples. Portanto, apesar de em valores absolutos o espaçamento duplo alternado resultar em maiores perdas, em termos relativos os resultados acabaram sendo mitigados. Ainda assim, os valores foram considerados como “alto” perante classificação do CTC (Tabela 3), porém aceitáveis de acordo com Belardo (2010), que cita o valor de 5% como sendo um limite entre a maioria das usinas.

É evidente que tal condição foi dada pela alta produtividade do canavial, sendo que em áreas onde a produção não for tão expressiva, as perdas na colheita se tornam um gargalo para o espaçamento duplo alternado, visto que o material deixado no campo é sinônimo de desperdício financeiro. Portanto, melhorias contínuas devem promovidas no sentido reduzir as perdas, podendo-se elencar inicialmente: i) Maior atenção ao preparo de solo e plantio, de

modo a promover um micro-relevo adequado, com nivelamento do corte de base; ii) Desenvolvimento de variedades aptas a colheita mecânica, em especial quanto ao porte de vigor; iii) Adoção de ferramentas de agricultura de precisão, como o piloto automático, tornando possível a utilização das coordenadas do plantio na colheita, além de diminuir consideravelmente erros no paralelismo entre-fileiras; iv) Qualificação dos operadores e; v) Constantes melhorias nas colhedoras e demais máquinas envolvidas no processo de colheita.

Figura 67 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas totais (t ha⁻¹)

Fonte: Mazzonetto (2004); Meyer (2001); Belardo (2010); Ripoli (2004); Schmidt Junior (2011); Furlani (1995); Yadav et al. (2002), adaptado.

Figura 68 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas totais (%)

Fonte: Carvalho (2009); Molina Junior (2000); De Leon (2000); Yadav et al. (2002); Cardoso (2011); Mazzonetto (2004); Carvalho Filho (2000); Ripoli (2004); Schmidt Junior (2011), adaptado.

4.3.2.9 Perdas de raízes (t ha⁻¹)

Os resultados para perdas de raízes são apresentados na Figura 69. Como se nota, em apenas 4 das 14 repetições foram verificadas raízes expostas após a passagem da colhedora, sendo que os valores médios encontrados são bastante próximos entre os tratamentos, não diferindo estatisticamente ao nível de 5% de significância. No comparativo com os outros trabalhos (Figura 70), os valores se encontram numa faixa comum de valores, entre 0,00 e 0,10 t ha⁻¹.

Figura 69 - Perdas de raízes ($t\ ha^{-1}$) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 70 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Perdas de raízes ($t\ ha^{-1}$)

Fonte: Nery (2000); De Leon (2000), adaptado.

4.3.2.10 Eficácia de manipulação

Complementando as conclusões realizadas para as variáveis de perdas, são ilustrados na Figura 71 os valores para eficácia de manipulação das repetições e respectivos tratamentos. Tal indicador nada mais é do que um reflexo das perdas determinadas em campo, visto que expressa quanto da matéria-prima existente na lavoura foi devidamente colhida, sendo que quanto mais próximo de 100% estiver o indicador, melhor a operação foi realizada. Como se observa, as médias dos tratamentos ficaram bastante próximas, com maior amplitude de valores, como já destacado, para o tratamento V1. Para Belardo (2010), valores acima de 95% são consideráveis aceitáveis.

No comparativo com outros trabalhos que tratam de espaçamento, observa-se, novamente, que as perdas na colheita em espaçamento duplo alternado ainda se mostram um gargalo para a operação, já que os valores verificados, ainda que de certa forma aceitáveis, ficaram abaixo de 6 dos 9 trabalhos confrontados, cuja faixa de concentração se deu em torno de 98%. A propósito, os 3 trabalhos que apresentaram valores inferiores ao deste trabalho, são os mais “antigos” da amostra, o que permite inferir uma certa evolução no processo de colheita mecanizada.

Figura 71 - Eficácia de manipulação (%) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 72 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Eficácia de manipulação (%)

Fonte: Carvalho Filho (2000); Ripoli (2004); Nery (2000); Carvalho (2009); Schmidt Junior (2011); Belardo (2010); De Leon (2000); Cardoso (2011); Mazzonetto (2004), adaptado.

4.3.3 Consumo de combustível

Assim como as variáveis de capacidade de colheita, os indicadores de consumo de combustível serão apresentados em relação à matéria-prima e colmos, este ainda sob a diferenciação entre “bruto” e “líquido”. A diferenciação, inclusive, está simplesmente quanto à capacidade que o consumo toma como base.

O consumo na capacidade efetiva bruta de matéria-prima (CCMP) é apresentado na Figura 73 e Figura 74, respectivamente em L h⁻¹ e L t⁻¹, enquanto que os consumos na capacidade efetiva bruta e líquida de colmos são apresentados em L t⁻¹ na Figura 75 e Figura 76, respectivamente.

Figura 73 - Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima (L h⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 74 - Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima (L t⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 75 - Consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de colmos (L t⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 76 - Consumo de combustível na capacidade efetiva líquida de colmos (L t⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Como se observa, quando analisada sob a perspectiva horária (Figura 73), o consumo de combustível é maior para o tratamento V2 quando comparado ao V1, enquanto que no diagnóstico do consumo por tonelada colhida (Figura 74; Figura 75 e Figura 76), o cenário se inverte, sendo que em ambas as análises as médias dos tratamentos mostraram diferença estatística ao nível de 5% de significância. Tais relações estão fortemente relacionadas com a velocidade de deslocamento e a consequente capacidade de colheita, conforme já abordado, sendo que com o aumento de velocidade colhe-se mais cana, exigindo mais da máquina e fazendo com que seu consumo horário aumente. Em contrapartida, como colhe-se mais, o consumo por tonelada decresce. Na Figura 77 e Figura 78 é possível verificar de forma mais clara tais relações, cujas respectivas curvas de tendência apresentam alto coeficiente de determinação (R^2). Optou-se por mostrar a relação apenas para o consumo na matéria-prima, já que o comportamento do consumo em “colmos” se mostra bastante semelhante.

No caso do consumo por tonelada colhida, foi possível, inclusive, a derivação da equação que define a curva, sendo que o ponto de ótimo encontrado foi $5,31 \text{ km h}^{-1}$. Para o consumo horário, dado a característica da variável, tal análise não foi possível, sendo que o resultado indicaria velocidade nula, onde o consumo horário é zero.

Figura 77 - Relação entre consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima (L h^{-1}) e velocidade de deslocamento (km h^{-1})

Figura 78 - Relação entre consumo de combustível na capacidade efetiva bruta de matéria prima (L t⁻¹) e velocidade de deslocamento (km h⁻¹)

No comparativo com trabalhos em espaçamento simples, o consumo de combustível horário do trabalho se mostra entre os maiores da amostra, cuja faixa de concentração de valores se encontra em 55 L h⁻¹(Figura 79). Entretanto, dado a maior capacidade de colheita pela máquina no espaçamento duplo alternado, os valores para o consumo por tonelada colhida são os menores da amostra, sendo praticamente metade quando comparados aos resultados no espaçamento simples, na mesma faixa de velocidade (Figura 80). Como se nota, no tratamento V1 o consumo por tonelada ficou próximo aos 0,50 L t⁻¹, ao passo que nos trabalhos que tratam de espaçamento simples os valores ficaram em torno de 1,2 L t⁻¹. Para o tratamento V2, o valor se mostrou próximo ao 0,35 L t⁻¹, enquanto que nos trabalhos em espaçamento simples, os resultados giraram em torno de 0,70 L t⁻¹.

Figura 79 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Consumo de combustível ($L h^{-1}$)

Fonte: Carvalho Filho (2000); Yadav et al. (2002); Nery (2000); Mazzonetto (2004); Schmidt Junior (2011); Belardo (2010); Ripoli (2004), adaptado.

Figura 80 - Comparativo entre resultados da pesquisa e trabalhos de outros autores: Consumo de combustível ($L t^{-1}$)

Fonte: Carvalho Filho (2000); Nery (2000); Mazzonetto (2004); Schmidt Junior (2011); Belardo (2010); Ripoli (2004); Cardoso (2011), adaptado.

4.4 Desempenho econômico

Considerando a metodologia apresentada no item 3.5, os custos de colheita ($\text{R\$ t}^{-1}$) para cada repetição em cada tratamento, bem como suas respectivas médias, são apresentados na Figura 81. Cabe ressaltar que tais resultados tratam do desempenho efetivo da colhedora, não sendo contabilizados, portanto, os tempos de interrupção que ocorrem durante a operação, nem as outras etapas do subsistema de colheita, ou seja, transbordo e transporte.

Como se nota, os custos por tonelada colhida no tratamento V2 são em média 30% inferiores aos do tratamento V1. Tal fato, está atrelado principalmente à velocidade de deslocamento da máquina, que na medida em que aumenta, resulta em maior capacidade de colheita e menor consumo de diesel por tonelada colhida, conforme respectivos apontamentos realizados nos itens 4.3.1 e 4.3.3, ocasionando, consequentemente, redução de custos da operação.

Essa relação pode ser visualizada de forma mais clara na Figura 82, onde o coeficiente de determinação (R^2) indica forte relação entre os elementos. Nota-se que o custo de colheita por tonelada colhida é bastante sensível à velocidade da operação, em especial para menores valores, já que considerando o intervalo que vai de 3,50 a 4,50 km^{-1} , a variação de custos fica entre 2,20 e 3,00 $\text{R\$ t}^{-1}$, ou seja, uma amplitude de quase 40% em apenas 1 km h^{-1} .

Derivando-se a equação que define a curva, foi possível encontrar o ponto de ótimo da relação, que ficou em 5,32 km h^{-1} , valor este muito próximo ao encontrado para o consumo de diesel por tonelada. Como já mencionado, atingir com precisão velocidades de deslocamento é bastante complicado, especialmente em nível de campo, e que, portanto, considerando as condições do trabalho, pode-se assumir um intervalo compreendido entre 5,00 e 5,50 km h^{-1} como sendo o ideal para a colheita no que diz respeito a custos.

Figura 81 - Estimativa do custo de colheita (R\$ t⁻¹) em cada repetição para cada tratamento (V1 e V2) e respectivas médias

Figura 82 - Relação entre custo de colheita (R\$ t⁻¹) e velocidade de deslocamento (km h⁻¹)

A Tabela 25 apresenta a distribuição dos elementos que compõe os custos da colheita em questão, sendo os valores encontrados bastante semelhantes aos apurados por Banchi et al. (2008b). Na análise clássica entre custos fixos e variáveis, se observa que os custos variáveis representam cerca de 2/3 do custo horário da máquina, enquanto que os custos fixos respondem por aproximadamente 1/3. Na análise individual dos fatores, nota-se que o consumo de combustível representa a maior fatia, com quase 40% do custo total, seguido por reparos/manutenções e depreciações, com aproximadamente 20% cada. Se somados os custos dos operadores, que em termos relativos ficam próximos a 10%, tem-se praticamente 90% do custo máquina.

Tabela 25 - Participação relativa (%) dos elementos de formação de custos da colhedora

Detalhamento	Participação relativa - %
Custo total	100,00%
Custo fixo	36,41%
Depreciação	19,63%
Juros	2,75%
Alojamento, seguros e taxas	1,91%
Operador	12,12%
Custo variável	63,59%
Combustível	37,61%
Lubrificantes	4,36%
Reparos e manutenção	21,62%

Outra análise pertinente quando se analisa os elementos, é a sensibilidade do custo em função das variáveis consideradas. Na Figura 83 é representado o impacto no custo de colheita, em percentual, mediante variação de $\pm 10\%$ nos fatores, individualmente. Posto de outra forma, como reage o custo por tonelada colhida caso haja o aumento ou redução na ordem de 10% em cada variável, sem que as outras sejam modificadas.

De forma geral, duas variáveis se mostram como de maior relevância para o custo, sendo “Valor inicial” e “Preço do combustível”, o que de certa forma era esperado, tendo em vista a participação relativa dos elementos (Tabela 25). Ou seja, pelo fato de estar associada com os componentes de custos “Depreciação”, “Reparos e manutenção”, “Juros” e “Alojamento, seguros e taxas”, que quando somados representam cerca de 45% do custo, o valor inicial da máquina é variável de maior impacto, enquanto que o preço do combustível, implicitamente relacionado com a fatia “Combustível”, ocupa a segunda posição, representando cerca de outros 40%.

Figura 83 - Análise de sensibilidade: Impacto no custo de colheita mediante variações individuais de $\pm 10\%$ nos fatores de formação

Observa-se ainda que nenhum impacto, seja ele negativo ou positivo, correspondeu de forma diretamente proporcional à variação dos elementos, ou seja, nenhum “choque” de 10% resultou em variações no custo na ordem de 10%. Tal fato está relacionado, novamente, às participações relativas de cada elemento no custo. Além disso, nota-se que para todas as variáveis, com exceção de “Vida útil” e “Horas trabalhadas ano”, os impactos são simétricos, reagindo na mesma ordem, independente de aumento ou redução das variáveis.

No caso de “Vida útil” e “Horas trabalhadas ano”, como destacado, os impactos são assimétricos, sendo que quando há redução nas respectivas variáveis, o custo reage de forma mais acentuada do que quando existem aumentos. Pode-se inferir que tal fato está atrelado à diluição de custos fixos da máquina (Figura 84), sendo que tais indicadores se mostram bastante sensíveis às variações negativas. Especificamente para “Horas trabalhadas ano”, que é um indicador mais palpável em termos de controle de máquinas agrícolas, observa-se que o valor utilizado como referência de 2.900 horas, está próximo do ponto mínimo na relação com o custo por tonelada colhida. Variações a partir de -30%, ou seja, valores de utilização anual inferiores a 2.000 horas por ano, entretanto, aumentam significativamente os custos por tonelada colhida. É importante ressaltar que apesar da sensibilidade do custo diminuir consideravelmente com aumento do número de horas trabalhadas, a maior utilização de uma

mesma máquina contribui para a redução do numero de conjuntos mecanizados como um todo.

Ainda na Figura 84 é possível verificar novamente a simetria dos choques para as demais variáveis, cujas relações se apresentam de forma linear, além da maior sensibilidade dos fatores “Valor inicial” e “Preço do combustível”, visto que apresentam uma maior inclinação das retas.

Figura 84 - Custo de colheita (R\$ t⁻¹) mediante variações percentuais nos principais fatores de formação de custos

Para os trabalhos realizados em espaçamento simples cuja forma de apresentação dos resultados se mostrou semelhantes a este, especificamente quanto às variáveis, “velocidade”, “capacidade efetiva bruta de matéria-prima”, “consumo de combustível” e “eficácia de manipulação”, foi possível simular os custos de colheita para tal sistema e, portanto, comparar aos resultados para o espaçamento duplo alternado. Cabe ressaltar que todas as premissas foram mantidas, com exceção do valor inicial da máquina, que no caso de colhedoras de uma

fileira é menor. O valor considerado foi de R\$ 860.000,00, apurado junto a concessionárias especializadas.

Como se observa na Figura 85, ainda que o valor da máquina seja maior e as perdas ocorridas na operação fiquem em patamares mais elevados, os custos efetivos de colheita verificados se mostram menores para o espaçamento duplo alternado quando comparado a trabalhos em espaçamento simples. Considerando as faixas específicas de velocidades para cada tratamento, têm-se uma redução de custos média em torno de 50% para o espaçamento duplo alternado, fruto, principalmente, da colheita simultânea de duas fileiras, que aliada à alta produtividade, resultou em elevados valores de capacidade de colheita.

Vale ressaltar, novamente, que de forma alguma o presente trabalho tem a intenção de afirmar que a questão sobre perdas na operação deve ser colocada em segundo plano, visto que os custos de colheita, apesar do maior nível de perdas, se mostram menores no espaçamento duplo alternado. Pelo contrário, matéria-prima deixada no campo pode não impactar de forma expressiva nos custos de colheita, mas é prejuízo à atividade canavieira como um todo, visto que o material poderia estar sendo processado.

Figura 85 - Comparativo entre os resultados da pesquisa e simulação com valores de trabalhos que tratam de espaçamento simples: Custos de colheita (R\$ t⁻¹)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Carvalho Filho (2000); Belardo (2011); Mazzonetto (2004); Cardoso (2011); Ripoli (2004) e Nery (2000).

Na Figura 85 é possível notar novamente a sensibilidade do custo de colheita perante a velocidade de operação. Como já destacado, as reduções de custos são muito expressivas mediante as variações em baixas velocidades. A partir de, aproximadamente, 5 km h^{-1} , entretanto, essa sensibilidade é reduzida consideravelmente, visto que o custo efetivo de colheita fica num intervalo entre 3,00 e 4,00 R\$ t^{-1} . Tal consideração é importante, visto que muitas vezes parte-se do princípio de que quanto mais rápido colher melhor, de modo que o custo da operação seja cada vez menor. Deve-se levar em consideração, entretanto, que altas velocidades resultam em maiores riscos à planta durante a operação, além do que, os custos com manutenção da máquina tendem a ser mais elevados. Portanto, complementando a questão do ponto de ótimo determinado quanto à custos de colheita, pode-se dizer que uma velocidade de trabalho pela colhedora entre 5 e 6 km h^{-1} , esta atendendo de forma satisfatória a operação, visto que alia menores custos, boa qualidade de processamento e maior conservação da máquina.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e na discussão apresentada pode-se concluir a respeito do desempenho da colhedora que:

- ✓ As variáveis que apresentaram diferença estatística ao nível de 5% de significância remetem-se basicamente a parâmetros de capacidade de colheita e consumo de combustível, podendo-se afirmar que sofreram influência da velocidade de deslocamento, apresentando, inclusive altos coeficientes de correlação. Dentre elas, apenas o consumo de combustível horário aumentou de acordo com o aumento de velocidade, sendo que nas demais, a relação foi inversa, com decréscimo de valores à medida que se aumenta a velocidade.
- ✓ As variáveis que remetem a qualidade da operação, ou seja, perdas, eficácia de manipulação e matéria estranha, não sofreram influência da velocidade de operação, apresentando correlações de fraca a moderada.
- ✓ Para as variáveis que mostraram relação com a velocidade de deslocamento, foi possível a determinação de curvas de tendências e respectivas equações, cujos coeficientes de determinação (R^2) se mostraram elevados, aferindo-se, inclusive, o ponto de ótimo para as relações, sendo: 5,65 km h⁻¹ para a capacidade de colheita e 5,31 km h⁻¹ para consumo de combustível por tonelada colhida.
- ✓ Em análise comparativa com trabalhos de outros autores que tratam do desempenho de colhedoras em espaçamento simples, foi possível verificar os seguintes pontos em relação à colheita mecanizada de cana-de-açúcar no espaçamento duplo alternado:
 1. A capacidade de colheita da máquina, considerando a mesma faixa de velocidade, foi muito maior no espaçamento duplo alternado, alcançando valores em torno de 150% superiores ao espaçamento simples. Esse aumento significativo se deu em função da colheita simultânea de duas fileiras e da alta produtividade agrícola do canavial;
 2. Em termos de consumo de combustível, os resultados também se mostraram competitivos, sendo que apesar do consumo horário ser superior, dado maior exigência da máquina pela alta produção, os valores por tonelada colhida no espaçamento duplo alternado foram praticamente a metade daqueles verificados para espaçamento simples;

3. A respeito da qualidade da operação de colheita, os valores relacionados à matéria estranha ficaram dentro dos limites aceitáveis. Os indicadores de perdas, entretanto, se mostraram mais elevados, em torno de 7 t ha^{-1} , quando comparados a resultados de outros trabalhos no espaçamento simples, que apresentam resultados dispersos, mas no geral, abaixo de 5 t ha^{-1} . A relação com a alta produtividade agrícola, contudo, acaba por suavizar as perdas, fazendo com que os valores sob a perspectiva percentual se aproximem mais dos outros trabalhos. Ainda assim, pode-se dizer que as perdas mostram-se um gargalo para a colheita no espaçamento duplo alternado;
4. Dentre os tipos de perdas, chama-se atenção para a classificação “tocos na soqueira”, respondendo, em média, por cerca de 40% do total de perdas entre as repetições.

A respeito do desempenho econômico verificou-se que:

- ✓ O aumento da velocidade de deslocamento da máquina, dado maior capacidade de colheita e menor no consumo de combustível por tonelada colhida, resulta em menores custos por tonelada colhida, determinando-se que o ponto ótimo para a relação, nas condições do trabalho, é de $5,32 \text{ km h}^{-1}$.
- ✓ Na análise de distribuição dos custos de colheita, verificou-se que os custos variáveis representam cerca de 2/3 do custo horário da máquina, sendo o custo com combustível a maior parcela, com cerca de 40% do montante total.
- ✓ Na simulação de custos efetivos de colheita em espaçamento simples, a partir de dados de outros estudos, e o posterior comparativo com os resultados deste trabalho, verificou-se que os custos por tonelada colhida se mostram inferiores em torno de 50% para o espaçamento duplo alternado quando comparado a trabalhos em espaçamento simples.
- ✓ O custo de colheita se mostrou bastante sensível perante a velocidade de operação, em especial para menores valores, visto que num intervalo entre $3,50$ e $4,50 \text{ km}^{-1}$ a amplitude do custo por tonelada colhida foi de quase 40%. A partir de aproximadamente 5 km h^{-1} , tal sensibilidade é reduzida consideravelmente, de forma que os valores se situam num intervalo entre $3,00$ e $4,00 \text{ R\$ t}^{-1}$. Como altas velocidades resultam em maiores riscos à planta durante a operação, além do que, os custos com manutenção da máquina tendem a ser mais elevados, conclui-se que uma velocidade de trabalho pela

colhedora entre 5 e 6 km h^{-1} , esteja atendendo de forma satisfatória a operação, visto que alia menores custos, boa qualidade de colheita e maior conservação da máquina.

Por fim, fica evidente que a adoção do espaçamento duplo alternando se mostra bastante competitiva, desde que determinadas ações sejam tomadas no sentido de manter as perdas em níveis aceitáveis de qualidade.

REFERÊNCIAS

- _____. **Protocolo AgroAmbiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista**. Protocolo de cooperação que celebram entre si, o governo do Estado de São Paulo, a Secretaria de Estado do Meio Ambiente, a Secretaria da Agricultura e Abastecimento e a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, para a adoção de ações destinadas a consolidar o desenvolvimento sustentável da indústria da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. São Paulo: GESP/SMA/SAA/UNICA, 04 jun. 2007. 3 p. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/cana/protocolo.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2012.
- ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira 2011**. São Paulo, 2011. 158p. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuario.html>. Acesso em: 27 jan. 2012.
- ANP. Sistema de levantamento de preços. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/>. Acesso em 26 out. 2012.
- ASABE. Agricultural machinery management data ASAE D497.7. In: _____. **ASABE standards**. St. Joseph, 2011. p. 1-8.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; FRANÇA, L.S.F. Análise do consumo de lubrificantes em máquinas agrícola. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 7, p. 8-10, 2005.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; ZAGO, C.A. Estudo dos custos com reparo e manutenção em colhedoras de cana-de-açúcar: Parte II. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 31, p. 8-10, 2008a.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; ZAGO, C.A. Estudo dos custos com reparo e manutenção em colhedoras de cana-de-açúcar: Parte III. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 31, p. 8-10, 2008b.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; MARTINS, J.M.S.; DIMASE, M. Capacidade operacional de colhedoras de cana-de-açúcar – Modelagem matemática em função da produtividade agrícola e da vida da máquina. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 77, p. 42-45, 2012a.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; ALBUQUERQUE, R. de La F.; COLI, R.A. Gestão de mecanização – Frota e operações agrícolas. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 74, p. 42-47, 2012b.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; FERREIRA, V.A.C.; MARTINS, J.M.S. Análise de índices técnicos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar na safra 2011/12. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 72, p. 12-15, 2012c.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; FERREIRA, V.A.C.; SCARANELLO, L.T. Análise de reforma de colhedoras de cana-de-açúcar. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 75, p. 40-43, 2012d.
- BARBOSA, F. da S. **Resistência à seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica do solo**. 2010. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- BELARDO, G. de C. **Avaliação de desempenho efetivo de três colhedoras em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) sem queima**. 2010. 137p. Dissertação (Mestrado em Ciências.

Área de concentração: Máquinas agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

BNDES. Apoio financeiro. **Programas e fundos**. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Programas_e_Fundos/. Acesso em: 26 out. 2012.

BNDES. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008. 216p. ISBN: 978-85-87545-24-4. Disponível em: <http://www.bioetanoldecana.org/>. Acesso em: 22 jul. 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Desenvolvimento sustentável. Agroenergia. Estatísticas. Produção. **Produção brasileira de cana-de-açúcar, açúcar e etanol**. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/SETEMBRO_2012/evolucao%20produtividade%20cana.pdf. Acesso em: 26 dez. 2012a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de produção e agroenergia. **Anuário estatístico da agroenergia 2010**. Brasília, 2011b. 223p. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/anuario_agroenergia/index.html. Acesso em: 27 jan. 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2011: Ano base 2010**. Rio de Janeiro, 2011a. 266p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 02 mar. 2012.

CARDOSO, G.B.C. **Aplicação de dessecante na cultura de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) para colheita mecanizada**. 2011. 71p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Máquinas agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CARVALHO FILHO, S.M. **Colheita mecanizada: desempenho operacional e econômico em cana sem queima prévia**. 2000. 108p. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

CARVALHO, L. de S. **Desempenho operacional de uma colhedora em cana crua na Região da Grande Dourados – MS**. 2009. 36p. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Mato Grosso do Sul, 2009.

CASAGRANDE, A.A. **Informações da literatura sobre espaçamentos na cultura da cana-de-açúcar**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 1., 2000, Ribeirão Preto/SP. **Anais...** Ribeirão Preto: IDEA, 2000. p. 48-54.

CASE IH. **Colhedoras de cana – Série A8000**. Folheto. Disponível em: http://www.caseih.com/brazil/Products/Colhedoras-e-Colheitadeiras/A8000-e-A8800/Documents/Folheto_A8000.pdf. Acesso em: 16 mai. 2012.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira:** cana-de-açúcar, safra 2012/13, terceiro levantamento, dezembro 2012. Brasília, 2011. 18 p. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_12_10_34_43_boletim_cana_portugues_12_2012.pdf. Acesso em: 30 jan. 2012.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. Piracicaba, 2006. 112p.

COX, D. Sugarcane row spacing standard. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 8., 2006, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2006.

CTC. **Perdas de cana e impurezas vegetais e minerais na colheita mecanizada**. Disponível em: http://www.coplana.com/gxpsites/..%5Cgxpsfiles%5Cws001%5Cdesign%5CDownload%5CCirculares%5CPerdas_na_colheita_mecanizada.pdf. Acesso em: 01 jun. 2012.

DALBEN, L.C. Alternativas de colheita mecanizada com mais de uma linha. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 5., 2011, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, 2011.

DE LÉON, M.J. **Avaliação de desempenho operacional de duas colhedoras em cana (*Saccharum spp.*) crua**. 2000. 112p. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

DI GIULIO, G;. Motor bicomustível ganha cada vez mais consumidores. **Inovação Uniemp**, Campinas, v. 2, n. 1, mar. 2006 . Disponível em <http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942006000100022&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 22 mar. 2012.

ELIAS, A.I.; PINTO, R.S. de A. Potencial e desafios para a colheita mecanizada de cana no Brasil. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 10., 2008, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2008.

FAO. Statistics. **FAOSTAT**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/?lang=en>. Acesso em: 09 mar. 2012.

FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L.; CAMPOSSILVAN, D.; STOLF, R. Wide base furrow sugarcane planting: five harvest productions. In: CONGRESS OF THE ISSCT, 17., 1980, Manila, Philippines. **Proceedings...** Manila, Philippines, 1980. p. 1058-1068.

FRAGA, A. Corrida nos canaviais: Mecanização da colheita acirra disputas no mercado de colhedoras, que movimenta R\$ 1 bilhão ao ano. **Globo Rural**, 11 ago. 2012. Disponível em: <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI311903-18283,00-CORRIDA+NOS+CANAIAIS.html>. Acesso em: 29 dez. 2012.

FURLANI NETO, V.L. **Colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): avaliação em canaviais com e sem queima prévia**. 1995. 111p. Tese (Doutorado em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995a.

FURLANI NETO, V.L. Proposta de espaçamentos para mecanização em solos de baixa fertilidade – Ambientes C, D, e E. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 11., 2009, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2009.

FURLANI NETO, V.L. Sulcos alternados duplos (SAD) e simples: controle de tráfego na colheita de cana picada. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 13, n. 4, p. 14-16, Mar./Abr. 1995b.

IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 09 mar. 2012.

JOHN DEERE. **3520 - Colhedora de cana John Deere**. Folheto. Disponível em: http://www.deere.com.br/pt_BR/ag/products/new-equipment/pdf/index.html. Acesso em: 16 mai. 2012.

JOHN DEERE. **3522 - Colhedora de cana 2 linhas John Deere**. Folheto. Disponível em: http://www.deere.com.br/pt_BR/ag/products/new-equipment/pdf/index.html. Acesso em: 20 jan. 2012.

LIRA, S.A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 196p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Métodos Numéricos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MAFIOLETTI, R.; MARTINS, G.; TURRA, F. Produção de etanol nos Estados Unidos da América. **Revista de política agrícola**, Secretaria de política agrícola, Companhia nacional de Abastecimento, Ano XX, n 3, Publicação Trimestral, p. 96 – 107.

MAGRO, J.A. Espaçamentos combinados na cultura da cana. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 13., 2011, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2011.

MAPA. Desenvolvimento sustentável. Agroenergia. Estatísticas. Produção. **Evolução da produtividade da cana-de-açúcar por corte**. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arg_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/SETEMBRO_2012/evolucao%20produtividade%20cana.pdf. Acesso em: 26 dez. 2012c.

MARIN, F.R. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. Cultivo. Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 31 dez. 2012.

MAZZONETTO, A.L. **Colheita integral de cana (*Saccharum spp.*) crua, análise de desempenho operacional**. 2004. 88p. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MEYER, E. The performance of machinery for mechanical harvesting and loading of sugarcane. In: Annual Congress of the South African Sugarcane Technologies Association (SASTA), 75, **Proceedings...** 2001. Disponível em: http://www.sasta.co.za/wp-content/uploads/Proceedings/2000s/2001_meyer_THE%20PERFORMANCE%20OF%20MACHINERY.pdf. Acesso em: 15 dez. 2012.

MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1974. 301p.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: FEALQ, 1996. 722p.

MILANEZ, A.Y.; BARROS, N.R.; FAVERET FILHO, P. de S.C. **O perfil do apoio do BNDES ao setor sucroalcooleiro**. BNDES. Publicações. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2801.pdf. Acesso em: 16 mai, 2012.

MOLINA JUNIOR, W.F. **Proposta de metodologia descritiva para ensaio padronizado de colhedoras de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2000. 140p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MONACO JUNIOR, L.C. Plantio espaçamento alternado. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 13., 2011, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2011.

MORAES, M.A.F.D. de. O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. **Economia aplicada**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 605-619, out.-dez. 2007.

MORELLI, J.L. Espaçamento duplo: É viável para a colheita mecanizada ? In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 6., 2004, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2004.

NERY, M.S. **Desempenhos operacional e econômico de uma colhedora em cana crua**. 2000. 108p. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Máquinas agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

NEVES, J.L.M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar picada e alternativas para sua redução**. 2003. 223p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

OLIVEIRA, M.P. de. **Dimensionamento operacional e econômico de um sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar: estudo de caso**. 2012. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

PAES, L.A.D. Levantamento dos níveis de impurezas nas últimas safras. In: IMPUREZAS E QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2011, Sertãozinho. **Anais...** Sertãozinho, 2011.

PARANHOS, S.B. **Espaçamentos e densidades de plantio em cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1972. 109p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Acompanhamento da safra 2012/2013 na região Centro-Sul**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2012. 47p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA.

PINAZZA, A.H.; STOLF, R.; MARGARIDO, L.A.C.; MACEDO, N. Sistema de produção de cana-de-açúcar em sulco duplo para a viabilização da mecanização de culturas intercalares. **STAB. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, v. 27, p. 73-76, 2008.

RIDESA. **Censo Varietal 2011**. Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Biotecnologia e Produção Vegetal e Animal, Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.ridesa.com.br/ckfinder/userfiles/files/Revista%20Censo%20Varietal%202011.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2012.

RIPOLI, M.L.C. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para fins energéticos**. 2004. 213p. Tese (Doutorado em Agronomia. Área de concentração: Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.

RIPOLI, T.C.C. Ensaio & certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. In: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiroz”, 1996. Cap. 13, p. 635-674.

RIPOLI, T.C.C.; NERY, M.S.; LEÓN, M.J. De; PIEDADE, S.M.S. Desempenho operacional de uma colhedora em cana crua em função da velocidade de avanço. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 2, p. 199-207, dez. 1999.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Edição dos autores. Piracicaba, 2009. 333p.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Edição dos autores, 2007. 198p.

RONQUIM C.C. **Queimada na colheita de cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. Embrapa monitoramento por satélite, 2010. 45p. (Documentos, 77)

ROSSETO, A.; PASCOTO, V. Os espaçamentos devem mudar? In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 3., 2001, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, IDEA, 2001. p. 17-27.

SANTAL. **Tandem SII**. Folheto. Disponível em: <http://www.santal.com.br/produtos/colhedora-tandem-sii/>. Acesso em: 16 mai. 2012.

SANTOS, N.B. dos. **Identificação dos fatores críticos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2011. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SÃO PAULO (Estado). Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf. Acesso em: 02 jun. 2012.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Etanol Verde, Resultados das safras**. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/resultado-das-safras>. Acesso em: 15 jul 2012.

SCHMIDT JUNIOR, J.C. **Avaliação de desempenho efetivo de colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 2011. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Máquinas agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

STOLF, R.; FURLANI NETO, V.L.; CERQUEIRA LUZ, P.H.; Nova metodologia de mecanização a espaçamentos estreitos em cana-de-açúcar. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v. 7, n. 32, p. 14-33, jan./fev. 1987.

UNICA. **Multimídia**. Apresentações. Os desafios do setor sucroenergético e o “movimento + etanol”. Disponível em: <http://www.unica.com.br/multimedia/apresentacao/>. Acesso em: 25 mai. 2012a.

UNICA. **Multimídia**. Apresentações. Retomada do crescimento e conscientização sobre o etanol: Prioridades do setor sucroenergético para 2012 e além. Disponível em: <http://www.unica.com.br/multimedia/apresentacao/>. Acesso em: 27 jan. 2012b.

UNICA. **Multimídia**. Publicações. Cartilha da bioeletricidade. Disponível em: <http://www.unica.com.br/multimedia/publicacao/>. Acesso em: 22 mai. 2012.

UNICA. **Sustentabilidade**. Protocolo agroambiental. Disponível em: <http://www.unica.com.br/protocolo-agroambiental/>. Acesso em: 30 abr. 2012d.

UNICA. **Unicadata**. Produção. Histórico de produção e moagem. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5>. Acesso em: 18 jul. 2012c.

YADAV, R.N.S.; SHARMA, M.P.; KAMTHE, S.D.; TAJUDDIN, A.; SANDEEP YADAV; TEJRA, R.K. Performance evaluation of sugarcane chopper harvester. **Sugar Tech**, India, v. 4, n. 3/4, p. 117-122, 2002.