



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

AMÉRICO FERRAZ DIAS NETO

**ANÁLISE ECONÔMICA E OPERACIONAL DE PREPARO DE SOLO E
COLHEITA MECANIZADA**

**ECONOMIC AND OPERATIONAL ANALYSIS OF SOIL TILLAGE AND
MECHANIZED HARVESTING**

Campinas
2021

AMÉRICO FERRAZ DIAS NETO

**ANÁLISE ECONÔMICA E OPERACIONAL DE PREPARO DE SOLO E
COLHEITA MECANIZADA**

**ECONOMIC AND OPERATIONAL ANALYSIS OF SOIL TILLAGE AND
MECHANIZED HARVESTING**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de Máquinas Agrícolas.

Thesis presented to the Faculty of Agricultural Engineering of the University of Campinas in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Agricultural Engineering in the area of Agricultural Machinery.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Albiero

Coorientador: Dra. Raffaella Rossetto

ESTE TRABALHO CORRESPONDE A
VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA
PELO ALUNO AMÉRICO FERRAZ DIAS
NETO, E ORIENTADA PELO PROF. DR.
DANIEL ALBIERO.

Campinas
2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

D543a Dias Neto, Américo Ferraz, 1973-
Análise econômica e operacional de preparo de solo e colheita mecanizada / Américo Ferraz Dias Neto. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Daniel Albiero.
Coorientador: Raffaella Rossetto.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Preparo do solo. 3. Colheita. 4. Solos - Compactação. 5. Modelagem. 6. Carta de controle de qualidade. 7. Sistemas agrícolas. I. Albiero, Daniel, 1975-. II. Rossetto, Raffaella, 1959-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Economic and operational analysis of soil tillage and mechanized harvesting

Palavras-chave em inglês:

Sugarcane

Soil tillage

Harvest

Compaction

Modeling

Agricultural systems

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Daniel Albiero [Orientador]

Paulo Sérgio Graziano Magalhães

Jorge Luís Mangolini Neves

José Paulo Molin

João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Data de defesa: 02-12-2021

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9472-8737>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6966820613640238>

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Américo Ferraz Dias Neto**, aprovada pela Comissão Julgadora em 02 de dezembro de 2021, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Prof. Dr. Daniel Albiero – Presidente e Orientador

Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães – Membro Titular

Dr. Jorge Luís Mangolini Neves – Membro Titular

Dr. José Paulo Molin – Membro Titular

Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva – Membro Titular

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Dedicatória

A minha família: Nat, Guto, Malu e Bia.

Ao avôhai Antônio (*in memoriam*).

Agradecimentos

A Deus, por me dar o dom divino da vida;

Aos meus pais, Américo e Arlete, que forneceram suporte financeiro para meu desenvolvimento educacional, que se mostra essencial na minha trajetória de vida;

À equipe que já atuou ou ainda atua comigo no setor sucroalcooleiro, em especial ao Thiago Rafael Soares profissional ligado ao CCT que coordenou a equipe de trabalho durante os ensaios de desempenho de colhedora, Douglas Date que deu apoio no suporte técnico dos computadores de bordo. Armene José Conde e Maurilio Guereste que foram decisivos no desenvolvimento de implemento canteirizador que resultou nos dados para as análises deste trabalho, bem como na coleta dos mesmos; Armene também me ensinou muito sobre manejo conservacionista nos anos que fomos colegas de trabalho.

Aos meus amigos Antônio Celso Joaquim, que contribuiu muito com suas análises de ambientes de produção, Claudimir Pedro Penatti, pela sua orientação em fertilidade de solos ao longo destes anos, Gustavo S. Oliveira e Sérgio L. Verdicchio pelo apoio na obtenção de informações de equipamentos CaseIH bem como na busca de fomentos para o desenvolvimento do simulador de colheita e a Central Máquinas Agrícolas, em especial ao Matheus Guadaim Rosa pelo apoio financeiro para a obtenção do simulador.

Ao professor Dr. Daniel Abieiro e à Dra. Raffaella Rossetto pelo incentivo, dedicação e orientação. Ao professor Dr. João Domingos Biagi pela participação ativa neste projeto, suas contribuições foram importantes.

Em especial agradeço ao Luís Felli por ter me proporcionado uma experiência única de trabalho confiando a responsabilidade de estratégias e inovações agrícolas, a ATIVOS AGROINDUSTRIAL pelos dados utilizados nos estudos de preparo de solos e a UMOE BIONERGY pelos dados referentes a agricultura digital bem como o teste de desempenho a campo em frente de colheita mecanizada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Epígrafe

“O sucesso não chegará até você; você é que tem que chegar a ele”

Marva Collins

Resumo

A cana-de-açúcar, por necessitar de intensa mecanização e intensa demanda de capital para as operações agrícolas, apresenta oportunidades para a implantação de sistema de manejo sustentável com possibilidade de incrementos na margem de contribuição. O sistema de tráfego controlado (STC) apresenta-se como alternativa que abrange: práticas conservacionistas, planejamento de base física, operações de preparo de solo e colheita mecanizada. Apesar de consenso em relação à natureza qualitativa dos efeitos de compactação, dados detalhados para diferenciá-la entre diferentes tipos de solo ou condições climáticas, ou mesmo entre diferentes sistemas agrícolas permanecem escassos, o que limita o uso dos dados para curvas de custo econômico. Em uma empresa, é possível avaliar o impacto econômico de sistemas operacionais agrícolas por meio de análise de margem de contribuição, tomando como base indicadores de desempenho operacional, resultados experimentais e dados de pesquisa acadêmica. Assim, observações realizadas a campo em conjunto com modelagem de operações agrícolas para avaliação de resultados agronômicos e econômicos são o foco do desenvolvimento desta pesquisa. Em sistemas de preparo de solo foram feitos ensaios a campo para o preparo canteirizado versus o preparo com subsolador, por meio de ferramentas de controle estatístico de processo para avaliação de qualidade; posteriormente, foram realizadas modelagem econômica e operacional para explorar alternativas de preparo localizado, aderente ao STC, frente ao sistema de preparo convencional e reduzido. Concluiu-se que o sistema de preparo localizado apresenta como vantagens maior eficácia na descompactação, adequação às condições requeridas ao STC em relação a geometria de áreas mobilizadas e não mobilizadas, desenvolvimento de sistema radicular, atratividade econômica e redução de impactos ambientais – menor emissão de GEE - quando comparados ao sistema de preparo convencional ou reduzido. Diversos trabalhos foram realizados para avaliar o desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar, tendo sempre como foco mensurar a capacidade operacional a velocidade constante; neste trabalho a abordagem é propor um modelo que determine a capacidade operacional de colheita utilizando como variáveis as componentes que definem o índice de colheitabilidade (IC) e a capacidade nominal da colhedora (RN) em receber e processar a cana-de-açúcar através de seus órgãos ativos. A validação do modelo de colheita mecanizada foi realizada por meio de teste de desempenho com duração de 24 horas, os resultados obtidos a campo utilizando-se recursos agricultura digital, não diferem

estatisticamente entre os resultados obtidos por meio de modelagem e os obtidos no teste de desempenho; o modelo foi submetido a cenários que levaram em consideração variações de RN, IC, produtividade, comprimento de percurso de colheita, espaçamento e quantidade de linhas colhidas simultaneamente, possibilitando análises para gestão e dimensionamento de ativos bem como introdução de tecnologias. Como etapa final apresenta-se modelo para custo de produção de uma tonelada de cana-de-açúcar, combinando os modelos e cenários utilizados para preparo de solo e colheita, demonstrando que a modelagem apresenta-se como ferramenta que pode suportar a tomada de decisão em empresas agrícolas.

Palavras-chave: Sistema de tráfego controlado; Preparo de solo localizado; Colheita mecanizada; Controle estatístico de processo; Agricultura digital; Modelagem operacional e econômica.

Abstract

Sugarcane, as it requires intense mechanization and intense demand for capital for agricultural operations, presents opportunities for the implementation of a sustainable management system with the possibility of increasing the contribution margin. The Controlled Traffic Farming System (CTF) presents itself as an alternative that encompasses: conservation practices, physical-based planning, soil preparation operations and mechanized harvesting. Despite consensus regarding the qualitative nature of compaction effects, detailed data to differentiate it between different types of soil or climatic conditions, or even between different agricultural systems, remain scarce, which limits the use of data for economic cost curves. In a company, it is possible to assess the economic impact of agricultural operating systems through contribution margin analysis, based on operating performance indicators, experimental results and academic research data. Thus, field observations in association with modeling agricultural operations to assess agronomic and economic results will be the focus of the development of this research. In soil preparation systems, field trials were carried out for masonry preparation vs. preparation with a subsoiler, using statistical process control tools for quality assessment; later, economic and operational modeling was carried out to explore localized preparation alternatives, adherent to CTF, compared to the conventional and reduced preparation system. It was concluded that the localized tillage system has the advantages of greater efficiency in decompaction, adaptation to the conditions required by the CTF in relation to the geometry of mobilized and unmobilized areas, development of a root system, economic attractiveness and reduction of environmental impacts - lower emission of GHG - when compared to the conventional or reduced preparation system. Several works were carried out to assess the operational performance of sugarcane harvesters, always focusing on measuring operational capacity at constant speed; In this work, the approach is to propose a model that simulates the operational harvesting capacity using as variables the components that define the harvestability index (HI) and the harvester's nominal capacity (NC) to receive and process the sugarcane through its active organs. The validation of the mechanized harvesting model was performed through a performance test lasting 24 hours, the results obtained in the field using digital agriculture resources, do not differ statistically; the model was submitted to scenarios that took into account variations in NC, HI, productivity, harvest path length, spacing and number of lines harvested simultaneously, enabling analysis for asset management and sizing, as

well as the introduction of technologies. As a final step, a model for the production cost of a ton of sugar cane is presented, combining the models and scenarios used for soil preparation and harvest, demonstrating that modeling presents itself as a tool that can assume -to lead decision-making in agricultural companies.

Keywords: Controlled traffic system; Localized soil tillage; Mechanized harvest; Statistical process control; Digital agriculture; Operational and economic modeling.

Lista de Ilustrações

Figura 1- Evolução da produção da cana-de-açúcar no Brasil	40
Figura 2- Áreas de cultivo de cana-de-açúcar mapeadas por imagens de satélite.....	41
Figura 3- Evolução da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil.....	41
Figura 4 - Evolução da produtividade agrícola da cana-de-açúcar no Brasil.....	42
Figura 5 – Componentes que caracterizam a zona de manejo.....	46
Figura 6- Trincheira indicando zona de compactação.....	52
Figura 7- Trincheira indicando ausência de camada compactada	52
Figura 8 - Comparação estilizada do efeito sobre a margem bruta de diferentes estratégias de gerenciamento de compactação	54
Figura 9- Sistema radicular de cana planta.....	57
Figura 10- Sistema radicular cana soca	58
Figura 11- Ilustração da área de tráfego no ciclo da cana de açúcar	64
Figura 12 - Representação esquemática de sistema de piloto automático.....	66
Figura 13 - Necessidade de sistematização do terreno devido a problemas de conservação de solo.....	70
Figura 14 - Evolução do plantio de cana-de-açúcar no Brasil.....	73
Figura 15 – Susceptibilidade a erosão em Latossolos em função da textura do solo.....	74
Figura 16 - Representação esquemática do conceito de Canteirização	77
Figura 17 – Subsolador de 5 hastes utilizado para descompactação	82
Figura 18 - Implemento canteirizador para espaçamento 1,50 m entre linhas de cana-de-açúcar acoplado a um trator. 1 - Depósito para 2.000 kg de corretivos; 2 -Segas circulares; 3 - Haste subsoladora com duto para saída de corretivos; 4 – rodas para controle de profundidade para enxada rotativa; 5 – ancinho para colocar palha na direção da rotativa.	83
Figura 19 – Subsolador para preparo localizado de 4 hastes.....	84
Figura 20 – Disposição geométrica de subsolador de 4 hastes para preparo localizado	84
Figura 21 - Esquema de um sistema de colheita, destacando-se os subsistemas de colheita, transbordo e transporte	87
Figura 22- Representação esquemática de colheita mecanizada de cana-de-açúcar em espaçamento entre linhas de 1,50 m	89
Figura 23 – Evolução da colheita mecanizada na cultura de cana-de-açúcar no Brasil.	90
Figura 24- Custos da matéria-prima	91

Figura 25 – Distribuição espacial de ambientes de produção em uma usina. Onde: A, B, C, D e E representam as zonas de manejo agrícola, sendo A zona de manejo com maior potencial de produção agrícola e E a de menor potencial.	92
Figura 26 – Distribuição de frentes de colheita em uma unidade de bioenergia dividida em 6 frentes de colheita, onde as frentes de 1 a 5 são frentes de colheita administradas pela unidade de bioenergia e a frente 6 refere-se a fornecedor de matéria-prima que administra a colheita mecanizada em sua área.	93
Figura 27 – Detalhe de sequência de colheita mensal da Frente 1, operando nos meses de março (3) a novembro (11).....	94
Figura 28- Esquema de uma colhedora de cana picada com destaque para os principais órgãos ativos.....	95
Figura 29 – Órgãos ativos internos de colhedora de cana-de-açúcar	96
Figura 30 – Velocidade de avanço e velocidade de alimentação de colhedora.....	97
Figura 31 – Avaliação de sincronismos de velocidade de avanço e velocidade periférica de rolos alimentadores, transportadores e picadores	98
Figura 32 – Capacidade operacional de 3 marcas de colhedora de cana-de-açúcar.....	99
Figura 33- Captura de valores com automação agrícola	101
Figura 34- Alcance da automação nos processos agrícolas.....	102
Figura 35 - Interface de gestão on-board por computador de bordo	105
Figura 36 – Tipos de interface e utilização mais adequada para Corte, Transbordo e Transporte.....	105
Figura 37 – Centro operações agrícolas – Usina São Martinho.	107
Figura 38 - Modelo de carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada. LSC: limite superior de controle; LIC: limite inferior de controle. $\bar{x}$: média estimada dos valores individuais.....	109
Figura 39- Esquema do processo de modelagem	111
Figura 40 – Áreas onde foram realizadas as avaliações de preparo localizado com canteirizador	113
Figura 41 - Sonda hidráulica coletando amostra para análise de densidade	114
Figura 42 – Avaliação de taxa de infiltração.....	115
Figura 43 – Trincheira para avaliação de características geométricas e desenvolvimento de sistema radicular em preparo localizado com canteirizador PSPC 1102.....	116
Figura 44 – 1) Profundidade do canteiro; 2) Detalhe da medição profundidade do canteiro; 3) Largura do canteiro; 4) Detalhe da medição da largura do canteiro	116

Figura 45 - 1) Largura da área para tráfego controlado; 2) Detalhe da medição da largura da área destinada a tráfego controlado; 3) Altura da área de compactada para tráfego controlado; 4) Detalhe da medição da altura da área de compactada para tráfego controlado	117
Figura 46 – Profundidade do sistema radicular em preparo realizado com canteirizador	117
Figura 47 – Avaliação de qualidade operacional de preparo localizado 120 DAP. 1) região descompactada pelo canteirizador; 2) Compactação; 3) Região de solo sem compactação.	118
Figura 48 - Avaliação de qualidade operacional em área de preparo convencional utilizando subsolador de 5 hastes, espaçadas em 400 mm, a 120 DAP	118
Figura 49 – Sequência de operações no sistema de preparo convencional	120
Figura 50 – Sequência de operações no sistema de preparo reduzido.....	121
Figura 51 – Sequência de operações no sistema de preparo localizado associado ao canteirizador	121
Figura 52 – Sequência de operações no sistema de preparo localizado associado à subsolagem localizada	122
Figura 53- Utilização do aplicativo Google Earth para avaliação de declividade.....	133
Figura 54- 1) Canavial sem ocorrência de fatores que prejudicam a colheabilidade. 2) Canavial com alta ocorrência de plantas daninhas. 3) Impacto das plantas daninhas na colhedora	133
Figura 55 – 1) Canavial ereto e sem ocorrência de fatores que prejudicam a colheita mecanizada. 2) Canavial com maioria dos colmos tombados. 3) Canavial com todos os colmos tombados	134
Figura 56 – 1) Canavial nivelado e sistematizado. 2) Canavial com ocorrência de pedras. 3) Canavial em área com erosão.....	134
Figura 57 – Área de realização de teste de desempenho de frente de colheita mecanizada	142
Figura 58 – Processos agrícolas envolvidos na produção de cana-de-açúcar	143
Figura 59 – Avaliação de densidade aparente em área de preparo localizado em espaçamento de 1,5 m.....	147
Figura 60 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 200 mm em região destinada ao canteiro. z_i : valor	

estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	148
Figura 61 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 400 mm em região destinada ao canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	148
Figura 62 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 600 mm em região destinada ao canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	149
Figura 63 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 200 mm em região destinada ao tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	149
Figura 64 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 400 mm em região destinada ao tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	150
Figura 65 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 600 mm em região destinada ao tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	150
Figura 66 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para taxa de infiltração para área de canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle.....	151
Figura 67 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para taxa de infiltração para área de tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle.....	152
Figura 68 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de mobilização de solo para área de canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	153
Figura 69 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para largura de mobilização de solo para área de canteiro. z_i : valor estimado da média móvel	

exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	153
Figura 70 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de não mobilização de solo para área de tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	154
Figura 71 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para largura de não mobilização de solo para área de tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	154
Figura 72 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade do sistema radicular. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	155
Figura 73 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de mobilização de solo com canteirização. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	155
Figura 74 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de mobilização de solo com subsolagem. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	156
Figura 75 – Desenvolvimento de sistema radicular em área canteirizada (esquerda) e subsolada (direita), 90 DAP.	157
Figura 76 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade sistema radicular 90 DAP em área canteirizada. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	157
Figura 77 - Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade sistema radicular 90 DAP em área subsolada. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle	158
Figura 78 – Custos de sistema de preparo de solo agrupados por custos fixos, variáveis e insumos. SPC: sistema de preparo de solo convencional; SPR: sistema de preparo de solo	

reduzido; SPLC: sistema de preparo de solo associado a canteirizador e SPLS: sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada.....	166
Figura 79 - Custos de sistema de preparo de solo agrupados por custos fixos, variáveis e insumos sem aplicação de fósforo. SPC: sistema de preparo de solo convencional; SPR: sistema de preparo de solo reduzido; SPLC: sistema de preparo de solo associado a canteirizador e SPLS: sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada.....	167
Figura 80 – Comparativo de custos entre SPC (sistema de preparo de solo convencional) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador)	168
Figura 81 - Comparativo de custos entre SPC (sistema de preparo de solo convencional) e SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada) ..	169
Figura 82 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador).....	170
Figura 83 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado ao canteirizador) sem aplicação de P_2O_5	171
Figura 84 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada)	172
Figura 85 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada) sem aplicação de P_2O_5	172
Figura 86 - Comparativo de custos entre SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador).....	173
Figura 87 - Comparativo de custos entre SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador) sem aplicação de P_2O_5	174
Figura 88 – Índices de tempo de desempenho operacional	195
Figura 89 – Tempos logísticos em teste de desempenho de colhedoras	196
Figura 90 – Horas improdutivas em teste de desempenho de colhedoras	197
Figura 91 – Capacidade operacional real e obtido por modelo de colheita mecanizada	197

Figura 92 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em velocidade operacional (Vop) e capacidade operacional corrigida da colhedora (RCC) em espaçamento de 1,50 m.....	199
Figura 93 - Representação esquemática de colheita mecanizada de cana-de-açúcar em espaçamento duplo alternado.	200
Figura 94 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em velocidade operacional (Vop) e capacidade operacional corrigida da colhedora (RCC) em espaçamento de 0,90 m x 1,40 m	201
Figura 95 – Comparativo de custo na operação de corte mecanizado de cana-de-açúcar entre espaçamento de 1,50 m e 0,90 m x 1,40 m.....	202
Figura 96- Representação esquemática de colheita mecanizada de cana-de-açúcar no espaçamento duplo alternado	203
Figura 97 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em velocidade operacional (Vop) e capacidade operacional corrigida da colhedora (RCC) em colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50m	204
Figura 98 - Comparativo de custo na operação de corte mecanizado de cana-de-açúcar entre espaçamento de 1,50 m , 0,90 m x 1,40 m e colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m.....	205
Figura 99 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em relação transbordo / colhedora (Reltc) e capacidade operacional transbordo (ROTT) em espaçamento de 1,50m.....	206
Figura 100 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em relação transbordo / colhedora (Reltc) e capacidade operacional transbordo (ROTT) em espaçamento de 0,90 m x 1,40 m	207
Figura 101 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em relação transbordo / colhedora (Reltc) e capacidade operacional transbordo (ROTT) em colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m.....	208
Figura 102 - Comparativo de custo na operação de carregamento de cana-de-açúcar entre espaçamento de 1,50 m , 0,90 m x 1,40 m e colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m.....	209
Figura 103 – Distribuição percentual de tempos em 24 horas em operação de colheita mecanizada em espaçamento de 1,50 m.....	210
Figura 104- Diagrama de Pareto para ofensores de colheita mecanizada	211

Figura 105 – Efeito do comprimento de percurso em desempenho operacional de colhedora de cana-de-açúcar em espaçamento de 1,50 m. ROC: capacidade operacional colhedora; TM: manobra de fim de linha; HPC: horas produtivas colhedora e Custocolheita: custo da colheita mecanizada R\$ t ⁻¹	212
Figura 106 – Dimensionamento de transbordos em função do TCH, capacidade operacional colhedora (ROC) e capacidade operacional transbordo (ROTT) para espaçamento de 1,50 m.....	213
Figura 107 – Distribuição percentual de custos nas operações de sistema de colheita mecanizada	214
Figura 108 – Custo do CCT em função do TCH em espaçamento de 1,50 m	214
Figura 109 – Participação de custos nas operações de corte e carregamento de cana-de-açúcar em função do espaçamento	216
Figura 110 – Impacto de índice de colheitabilidade (IC) em horas produtivas colhedora (HPC), tempo manobra fim de linha (T _{mfl}) e velocidade operacional (Vop)	218
Figura 111 – Impacto do índice de colheitabilidade (IC) em capacidade operacional corrigida de colhedora (RCC), capacidade operacional de colhedora (ROC), capacidade operacional transbordo (ROTT) e velocidade operacional (Vop).....	219
Figura 112 – Custos e consumo de diesel nas operações de corte e carregamento em função do índice de colheitabilidade (IC).....	220
Figura 113 – Dimensionamento de colaboradores, colhedoras e transbordos e investimento. Ncol: necessidade de colhedoras; Op. Colhedoras: operadores de colhedora; NTran: necessidade de transbordos; Op. Transbordo: operadores de transbordo	221
Figura 114 – Receita operacional para sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador (SPLC) e sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada (SPLS) com e sem fosfatagem para colheita de uma linha em espaçamento de 1,5 m	223
Figura 115 - Receita operacional para sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador (SPLC) e sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada (SPLS) com e sem fosfatagem para colheita simultânea de 2 linhas em espaçamento de 1,50m.....	224
Figura 116 – Implemento para preparo localizado PSCP1102.....	249
Figura 117 – Componentes piloto automático Trimble®.....	251
Figura 118 – Monitor FMX Trimble®	251

Figura 119 – AgGPS NavController II Trimble®	252
Figura 120 – Antena RTK Trimble®	252
Figura 121 – Kit antena e base RTK Trimble®	252
Figura 122 – Auto sense Trimble®	252
Figura 123 – Base RTK Trimble® AgGPS 542.....	253
Figura 124 - Rádio TDL 450h Trimble®	253

Lista de Tabelas

Tabela 1- Estratégias de manejo de nutrientes em nos sistemas de preparo convencional e localizado com parcelas na Austrália	78
Tabela 2 - Recomendações de manejo sustentável para cultura de cana-de-açúcar em função da textura do solo.....	85
Tabela 3 – Operações de preparo de solo em função da classe textural.....	85
Tabela 4 – Características das principais colhedoras de cana-de-açúcar	89
Tabela 5 – Caracterização das áreas de ensaios de preparo localizado	113
Tabela 6 – Limites de densidade aparente por grupamento de solo.....	114
Tabela 7 – Premissas financeira para modelagem de operações de preparo de solo....	123
Tabela 8- Premissas operacionais para operações de preparo de solo	123
Tabela 9 – Premissas de tempos logísticos para operações de preparo de solo (min dia ⁻¹)	124
Tabela 10 – Premissas para suprimento de insumos para operações de preparo de solo (min dia ⁻¹)	124
Tabela 11 – Premissas consumo operacional para operações de preparo de solo.....	125
Tabela 12 – Premissas de suprimentos operacionais para operações de preparo de solo (min dia ⁻¹)	125
Tabela 13 – Insumos utilizados no sistema de preparo convencional.....	126
Tabela 14 – Insumos utilizados no sistema de preparo reduzido e localizado associado a subsolagem localizada	126
Tabela 15 – Insumos utilizados no sistema de preparo localizado com canteirizador .	126
Tabela 16 – Variáveis definidas para as equações utilizadas na modelagem de operações de preparo de solo.....	127
Tabela 17 – Calendário de impacto da adoção de SPLC ou SPLS.....	128
Tabela 18 – Variáveis definidas para as equações utilizadas na modelagem para evolução do canavial.....	129
Tabela 19 – Custos de produção de cana-de-açúcar (R\$ ha ⁻¹) das usinas na região Centro-Sul, safra 2019/2020	129
Tabela 20- Índice de colheabilidade.....	132
Tabela 21- Parâmetros de definição de velocidade de colhedora.....	134
Tabela 22 - Parâmetros de avaliação de índice de colheabilidade	135

Tabela 23 – Variáveis definidas para as equações utilizadas na modelagem de operações de corte, carregamento e transporte.....	136
Tabela 24- Premissas gerais utilizadas no modelo de sistema de colheita mecanizada	138
Tabela 25 – Premissas financeiras utilizadas no modelo de sistema de colheita mecanizada	138
Tabela 26 – Consumo operacional de operações de sistema de colheita mecanizada .	138
Tabela 27 – Premissas operacionais para operações de sistema de colheita mecanizada	138
Tabela 28 – Tempos logísticos para operações de sistema de colheita mecanizada	139
Tabela 29 – Tempos de manutenção de operações de sistema de colheita mecanizada	139
Tabela 30 - Tempos de suprimentos operacionais para sistema de colheita mecanizada	140
Tabela 31 – Índice de colheitabilidade para análise exploratória de modelo de sistema de colheita mecanizada.....	141
Tabela 32 – Características da área do teste de desempenho de colhedoras	141
Tabela 33 – Premissas para estimativa do valor da tonelada de cana-de-açúcar	145
Tabela 34 – Formação de custos de produção de uma tonelada de cana-de-açúcar.....	145
Tabela 35 – Avaliação visual de trincheiras para operações de canteirização e subsolagem	156
Tabela 36 – Equações para modelagem de operações de preparo de solo	161
Tabela 37 – Equações para cálculo dos custos variáveis em operações de preparo de solo	162
Tabela 38 – Equações para cálculo dos custos fixos em operações de preparo de solo	162
Tabela 39 – Equações para cálculo do custo total em operações de preparo de solo...	163
Tabela 40 – Resultados operacionais e custos para operações de preparo de solo	164
Tabela 41 – Equações para modelagem de evolução de canavial	175
Tabela 42 – Evolução de canavial para SPC, SPR, SPLC e SPLS; considerando aumento de 10% TCH no SPLC e SPLS.....	176
Tabela 43 – Fluxo de caixa (FC) e valor presente líquido (VPL) para sistemas de preparo de solo considerando aumento de 10% TCH no sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador (SPLC) e sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada (SPLS)	177
Tabela 44 – Margem de contribuição (R\$) entre sistemas de preparo de solo.....	178
Tabela 45 – Margem de contribuição relativa (%)	180

Tabela 46 - Margem de contribuição (R\$) entre sistemas de preparo de solo – sem fosfatagem	181
Tabela 47 - Margem de contribuição (%) – sem fosfatagem	181
Tabela 48 – Quadro de investimentos sistema de preparo de solo convencional.....	182
Tabela 49 – Quadro de investimento sistema de preparo de solo reduzido	182
Tabela 50 – Quadro de investimento sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador	182
Tabela 51 – Quadro de investimento sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada	183
Tabela 52 – Equações gerais processo de colheita mecanizada	185
Tabela 53 – Capacidade operacional corrigida da colhedora	185
Tabela 54 – Equações para definição de tempos e movimentos e disponibilidade para o processo de colheita mecanizada.....	186
Tabela 55 – Horas motor colhedora e transbordo.....	186
Tabela 56 – Equações para definição do capacidade operacional efetiva de colhedora de cana-de-açúcar.....	187
Tabela 57 – Equações para definir desempenho operacional de carregamento de cana-de-açúcar.....	188
Tabela 58 – Equações para definir desempenho operacional de transporte de cana-de-açúcar.....	188
Tabela 59 – Capacidades operacionais de colheita, carregamento e transporte de cana-de-açúcar.....	189
Tabela 60 – Consumo de combustível e lubrificante na colheita mecanizada	189
Tabela 61 – Capacidades operacionais de colheita mecanizada para a gestão por indicadores.....	190
Tabela 62 – Custos fixos e variáveis para a colheita mecanizada de cana-de-açúcar..	191
Tabela 63 – Custos totais expressos em R\$ t ⁻¹ e R\$ h ⁻¹ para colheita mecanizada de cana-de-açúcar.....	192
Tabela 64 – Dimensionamento de recursos para processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.....	193
Tabela 65 – Índice de colheitabilidade da área destinada a teste de desempenho. As cores atribuídas a cada indicador estão relacionadas as notas atribuídas a cada indicador que compõem o índice.....	194
Tabela 66 – Tempos e movimentos obtidos no teste de desempenho operacional	194

Tabela 67 – Índices de colheabilidade para avaliação de características operacionais de lavoura	217
Tabela 68 – FC, VPL, custos e receitas da tonelada de cana-de-açúcar para SPC com fosfatagem	222
Tabela 69 - Principais operações referentes aos processos de preparo de solo, plantio, tratos culturais e CCT	237
Tabela 70- Características técnicas implemento de preparo localizado Antoniosi PSPC 1102 - Figura 116	249
Tabela 71- Características trator 230 cv	249
Tabela 72 – Piloto Automático - Figura 117	250
Tabela 73 – Calendário agrícola.....	254
Tabela 74 - Parametrização para definir índice de colheabilidade de uma área hipotética	255

Lista de Abreviaturas

A	: Absenteísmo
AA	: Aproveitamento agroindustrial
Abas_comb	: Abastecimento combustível
Abc	: Abastecimento de corretivo
Abh	: Abastecimento de herbicida
Abi	: Abastecimento de inseticida
ACTFA	: Australian Controlled Traffic Farming Association Inc.
Afer_dos	: Aferição de dosagem
Área_1C	: Área 1ºCorte
Área_2C	: Área 2ºCorte
Área_3C	: Área 3ºCorte
Área_4C	: Área 4ºCorte
Área_5C	: Área 5ºCorte
Área_moagem	: Área destinada a moagem
Área_plantio	: Área plantio
Área_total	: Área total explorada
Área_tratos	: Área destinada a tratos culturais de soqueira
Área_viveiros	: Área viveiros
ATR	: Açúcares totais recuperáveis
Cambvclub	: Consumo de lubrificante caminhão bate/volta
Cambvclubt	: Consumo de lubrificante total caminhão bate/volta
Cambvcomb	: Consumo de combustível tonelada caminhão bate/volta
Cambvcombt	: Consumo de combustível total caminhão bate/volta
Cambvcustcomb	: Custo combustível caminhão bate/volta
Cambvcustlub	: Custo lubrificante caminhão bate/volta
Cambvcustman	: Custo manutenção caminhão bate/volta
Cambvcustoper	: Custo operadores caminhão bate/volta
Cambvcustton	: Custo total caminhão bate/volta tonelada
Cambvcusttotal	: Custo total caminhão bate/volta
Camclub	: Consumo de lubrificante caminhão
Camclubt	: Consumo de lubrificante total caminhão
Camcomb	: Consumo de combustível tonelada caminhão
Camcombt	: Consumo de combustível total caminhão
Camcustcomb	: Custo combustível caminhão
Camcustlub	: Custo lubrificante caminhão
Camcustman	: Custo manutenção caminhão
Camcustoper	: Custo operadores caminhão
Camcustton	: Custo total caminhão tonelada
Camcusttotal	: Custo total caminhão
Camicustman	: Custo manutenção semi-reboque
CAN	: Controller Area Network ou Rede de Área de Controle
Cana_própria	: Participação cana própria
CBVT	: Ciclo bate/volta
CCAM	: Ciclo caminhão
CCAMH	: Ciclo caminhões

Cclub	: Consumo de lubrificante tonelada colhedora
Cclubt	: Consumo de lubrificante total colhedora
Ccomb	: Consumo de combustível tonelada colhedora
Ccombt	: Consumo de combustível total colhedora
CCT	: Corte, carregamento e transporte
Ccustcomb	: Custo combustível colhedora
Ccustlub	: Custo lubrificante colhedora
Ccustman	: Custo manutenção colhedora
Ccustoper	: Custo operadores colhedora
Ccusttotal	: Custo total colhedora
CDCAM	: Ciclos por dia caminhão
CDT	: Ciclos por dia Transbordo
CEP	: Controle estatístico de processo
Check	: Checklist
Check _{pneu}	: Check pneu
Colm	: número de colmos em um metro linear
Comb	: Combustível
Comb _{cam}	: Combustível caminhão
CONAB	: Companhia Nacional de Abastecimento
CONSECANA	: Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Alcool
Consumo_muda	: Consumo de cana para plantio
CSMC	: Cenário sistema de manejo convencional
CSTC	: Cenário sistema de tráfego controlado
CT	: Comprimento de percurso
CTC	: Centro de Tecnologia Canavieira
Ctrans	: Capacidade Transbordo
Custcomb_prep	: Custo Combustível
Custcomb_prepha	: Custo Combustível por hectare
Custlub_prep	: Custo Lubrificante
Custlub_prepha	: Custo Lubrificante por hectare
Custman_prep	: Custo Manutenção
Custman_prepha	: Custo Manutenção por hectare
Custo_prep	: Custo preparo
Custo_prepha	: Custo preparo por hectare
Custocolheita	: Custo total colhedora tonelada
Custoper_prep	: Custo operadores preparo
Custoper_prepha	: Custo operadores preparo por hectare
Custotração	: Custo total transbordo tonelada
Custo _{transporte}	: Custo total transporte de cana
D	: diâmetro do colmo (cm)
D_bico	: Desentupimento de bico
Dab	: Deslocamento abastecimento
Dabc	: Deslocamento abastecimento corretivo
Dabh	: Deslocamento abastecimento herbicida
Dabi	: Deslocamento abastecimento inseticida
DAP	: Dias Após o Plantio
D _{car}	: Deslocamento carregado

D _{carga}	: Densidade de carga
DCT	: Distância carregamento transbordo
Depre _{prep}	: Depreciação preparo
Depre _{prepha}	: Depreciação preparo por hectare
Deprec	: Depreciação colhedora
Deprecam	: Depreciação caminhão
Deprecambv	: Depreciação caminhão bate/volta
Depret	: Depreciação transbordo
DES	: Dias efetivos de safra
Dfaq	: Duração troca facas
DISP _{CAM}	: Disponibilidade de caminhões
Dist _{bv}	: Distância bate/volta
Dlub	: Duração lubrificação
DMC	: Duração manutenção em campo
Dmec	: Disponibilidade mecânica
DMO	: Duração manutenção em oficina
DS	: Dias de safra
DU _{prep}	: Dias uteis preparo
Dvaz	: Deslocamento vazio
Enc	: Encargos sociais
Enc	: Encargos sociais
ERP	: Enterprise Resource Planning
Esp	: espaçamento entre linhas (m)
Esp	: Espaçamento entre fileiras
ESR	: Estoque sobre rodas
Estoq	: Estoque de cana
F	: Folguistas
FC	: Fluxo de caixa
FC _{Arrendameto}	: Fluxo de caixa de arrendamento
FC _{Lavoura}	: Fluxo de caixa de formação de lavoura
FC _{Tratos}	: Fluxo de caixa de tratos culturais de soqueira
GEE	: Gases de efeito estufa
GPRS	General Packet Radio Services ou Serviços Gerais de Pacote por : Rádio
GPS	: Global Positioning System
H	: altura do colmo (cm)
HE _{prep}	: Horas efetivas preparo
Himp	: Horas improdutivas
Himp _{prep}	: Horas improdutivas preparo
HM _{prep}	: Horas motor preparo
HMC	: Horas motor colhedora
HMT	: Hora motor transbordo
HPC	: Horas produtivas colhedora
HTA	: Hodometro total ano
I _{Turno}	: Intervalo entre turnos
IA	: Intervalo de abastecimento
IC	: Índice de colheabilidade

ICC	: Índice colheita corrigido
ICO	: Impacto capacidade operacional
Ifaq	: Intervalo troca de facas
Ilub	: Intervalo entre lubrificação
IMC	: Intervalo entre manutenções em campo
IMO	: Intervalo manutenção na oficina
IoT	: Internet of Things
IPEA	: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
L_trabalho	: Largura de trabalho
Lcol	: Linhas colhidas
Leq	: Limpeza de equipamentos
Leq	: Limpeza de equipamentos
LI	: Lubrificante implemento
LI_prep	: Logística insumos preparo
Longevidade	: Longevidade do canavial
Lub	: Lubrificante
Lubimp	: Lubrificante implemento
MA	: Mudança de área
Man	: Manutenção
Man_prep	: Manutenção
Manimp	: Manutenção implemento
MAP	: Fosfato monoamônico
Maux	: Manobra auxiliar
M _{dia}	: Moagem diária
M _{hora}	: Moagem horária
ML	: Margem líquida
MMEP	: Média Móvel Exponencialmente Ponderada
Moagem_safra	: Capacidade de processamento industrial
N _{cam}	: Necessidade de caminhões
N _{cambv}	: Necessidade de caminhões bate/volta
Ncol	: Necessidade de colhedoras
Nfre	: Número de frentes
NL	: Linhas colhidas simultâneas
N _{Semi}	: Necessidade de semi-reboques
Ntran	: Necessidade de transbordos
Pea_prep	: Produtividade efetiva ano
Ped_prep	: Produtividade efetiva dia
Peh_prep	: Produtividade efetiva hora
Plin	: Produtividade linear
PR	: Paradas para refeição
Produção_propria	: Produção de cana própria
QM_prep	: Quantidade manobras
QMT	: Quantidade manobras transbordo
R_nominal	: Capacidade nominal preparo
Raio	: Distância frentes
RCC	: Capacidade operacional corrigida da colhedora
RECAMBVD	: Capacidade operacional efetiva caminhão bate/volta 24 horas

RECAMD	: Capacidade operacional efetiva caminhão 24 horas
RECD	: Capacidade operacional efetiva colhedora 24 horas
RECM	: Capacidade operacional efetiva colhedora hora motor
RECP	: Capacidade operacional efetiva hora produtiva colhedora
Reltc	: Relação transbordo / colhedora
RETP	: Capacidade operacional efetiva hora produtiva transbordo
RN	: Capacidade nominal
ROC	: Capacidade operacional colhedora
ROCAM	: Capacidade operacional caminhão
ROCAMBV	: Capacidade operacional caminhão bate/volta
ROTT	: Capacidade operacional transbordo
Sal	: Salário
Semi	: Composição
SGPA	: Sistema de Gerenciado de Processos Automatizados
SLE	: Seguros e licenças equipamento
SPC	: Sistema de preparo de solo convencional
SPLC	: Sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador
SPLS	: Sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada
SPR	: Sistema de preparo de solo reduzido
STC	: Sistema de tráfego controlado
T_LP	: Tempo logístico preparo
Tab	: Tempo abastecimento
T _{acam}	: Abastecimento caminhão
T _{amostra}	: Amostragem
Taxa _{multiplicação}	: Taxa de multiplicação de viveiros
T _{campo}	: Engate/desengate - Campo
T _{carga}	: Transferência de carga
TCH	: Produtividade do canavial
TCH_1	: Produtividade 1ºCorte
TCH_2	: Produtividade 2ºCorte
TCH_3	: Produtividade 3ºCorte
TCH_4	: Produtividade 4ºCorte
TCH_5	: Produtividade 5ºCorte
TCH _{total}	: Produtividade em área total explorada
TCHV	: Produtividade de viveiros
Tclub	: Consumo de lubrificante transbordo
Tclubt	: Consumo de lubrificante total transbordo
Tcomb	: Consumo de combustível tonelada transbordo
Tcombt	: Consumo de combustível total transbordo
TCTM	: Tempo comprimento tiro + Manobra
TCTM _{prep}	: Tempo comprimento tiro + Manobra preparo
TCTT	: Tempo para carregar transbordo
Tcustcomb	: Custo combustível transbordo
Tcustlub	: Custo lubrificante transbordo
Tcustman	: Custo manutenção transbordo
Tcustoper	: Custo operadores transbordo

Tcusttotal	: Custo total transbordo
T _{descarga}	: Descarregamento
T _{edbv}	: Engate/desengate bate/volta
T _{faq}	: Tempo troca de facas
Ticlubt	: Consumo de lubrificante total implemento transbordo
Ticustman	: Custo manutenção implemento transbordo
T _{lcam}	: Lubrificação caminhão
T _{logc}	: Tempo logística colheita
T _{logcam}	: Tempo logística caminhão
T _{logt}	: Tempo logística transbordo
TLT _{prep}	: Tempo logístico total preparo
T _{lub}	: Tempo em lubrificação
TM	: Manobra fim de linha
T _{man}	: Tempo em manutenção
TMC	: Tempo de manutenção em campo
T _{mfl}	: Tempo manobra fim de linha
TMO	: Tempo manutenção oficina
TM _{TOT}	: Tempo manobras totais
TO	: Taxa de oportunidade
T _{PBVC}	: Tempo percurso bate/volta carregado
T _{PBVV}	: Tempo percurso bate/volta vazio
T _{peso}	: Pesagem
Transp	: Capacidade de transporte
TSO _{prep}	: Tempo suprimentos operacionais preparo
TSO _C	: Tempo suprimentos operacionais colhedora
TSO _{Cam}	: Tempo suprimentos operacionais caminhão
TSO _T	: Tempo suprimentos operacionais transbordo
TT	: Turnos de trabalho
TTCT	: Tempo total de ciclo transbordo
TTT	: Troca de turno
TTTp	: Troca de turno preparo
T _{usina}	: Engate/desengate - Usina
USDA	: United States Department Of Agriculture
Ut _{prep}	: Utilização preparo
Utc	: Utilização colhedora
Utcam	: Utilização caminhão
Utcambv	: Utilização caminhão bate/volta
Utt	: Utilização transbordo
V _{bv_{car}}	: Velocidade caminhão bate/volta carregado
V _{bv_{vaz}}	: Velocidade caminhão bate/volta vazio
V _{car}	: Velocidade carregado
Vcomb	: Valor do combustível
VCT	: Volume colhido por linha
VIE	: Valor inicial do equipamento
VIE	: Valor inicial do equipamento

VII	: Valor inicial do implemento
Vlub	: Valor lubrificantes
Vmax	: Velocidade máxima colhedora
Vop	: Velocidade operacional
Vop_prep	: Velocidade operacional preparo
VPL	: Valor presente líquido
VRE	: Valor residual equipamento
VRI	: Valor residual implemento
VUE	: Vida útil equipamento
VUI	: Vida útil implemento
V _{vaz}	: Velocidade vazio

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	35
2 OBJETIVOS.....	39
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
3.1 Importância da cultura de cana-de-açúcar	40
3.2 Solo e agricultura.....	44
3.3 Zonas de manejo agrícola	45
3.4 Compactação	47
3.4.1 Impacto da compactação na eficiência do uso de fertilizantes.....	55
3.4.2 Sistema radicular	56
3.5 Tráfego controlado	59
3.5.1 Sistema de direção assistido	65
3.6 Manejo conservacionista	67
3.7 Preparo de solo.....	71
3.7.1 Preparo de solo na cultura de cana-de-açúcar	72
3.7.2 Definições de preparo de solo	74
3.7.3 Operações agrícolas de preparo de solo para cultura de cana-de-açúcar ..	79
3.7.4 Recomendações de preparo em função da textura	85
3.8 Sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar	86
3.8.1 Modelagem da etapa de colheita mecanizada	94
3.9 Agricultura digital ou agricultura 4.0.....	99
3.9.1 Automação agrícola.....	101
3.9.2 Tecnologia embarcada de computador de bordo.....	103
3.9.3 Comunicação e telemetria	105

3.9.4	Gestão da informação na agricultura digital	106
3.10	Controle estatístico de processo.....	107
3.10.1	Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada.....	109
3.11	Modelagem em agricultura.....	109
4	MATERIAIS E MÉTODOS	113
4.1	Avaliação de qualidade de operações de preparo de solo	113
4.2	Modelagem de sistemas de preparo de solo.....	120
4.2.1	Modelagem de operações de preparo de solo.....	120
4.2.2	Modelagem de evolução de canavial para análise de sistemas de preparo de solo	128
4.3	Modelagem do sistema de colheita mecanizada.....	130
4.3.1	Agricultura digital empregada.....	130
4.3.2	Índice de colheitabilidade.....	132
4.3.3	Modelagem de operações do sistema de colheita mecanizada de cana-de- açúcar	135
4.3.4	Parâmetros operacionais de campo	140
4.3.5	Caracterização da área de teste de desempenho	141
4.3.6	Teste de qui quadrado	142
4.4	Modelagem para determinação do custo da tonelada de cana-de-açúcar.	143
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	147
5.1	Análise aplicada a preparo de solo.....	147
5.1.1	Resultados em campo do sistema de preparo localizado	147
5.1.2	Análises de desempenho de operações e sistemas de preparo de solo...	159
5.1.3	Impacto de sistemas de preparo de solo	174
5.2	Análise da colheita mecanizada.....	184
5.2.1	Validação do modelo.....	184
5.2.2	Análise exploratória de modelo de colheita mecanizada	198

5.3 Análise integrada de preparo de solo e colheita mecanizada e obtenção do custo por tonelada de cana-de-açúcar produzida.....	221
6 CONCLUSÕES.....	225
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	227
ANEXO 1.....	237
ANEXO 2.....	241
ANEXO 3.....	249
ANEXO 4.....	254
ANEXO 5.....	255

1 Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas mais importantes do agronegócio brasileiro. Sendo o Brasil o primeiro produtor e exportador mundial de açúcar e segundo exportador de etanol. A cogeração de energia elétrica e o etanol como biocombustível contribuem para a matriz energética renovável, sendo o etanol um biocombustível de grande competitividade no mercado internacional (RAMOS, 2016).

Desde 1975, ano marcado pelo advento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), uma sequência de mudanças se cristalizou na economia brasileira e em seus sistemas produtivos, sendo talvez a agroindústria da cana-de-açúcar a que mais mudanças e desafios experimentou no conjunto das atividades de base agrícola. Com ela, o Brasil desenvolve tecnologias, conquista importantes mercados e torna-se referência na produção de energia renovável nos planos nacional e internacional. Neste percurso, a agroindústria passou por prosperidades e crises que se alternaram e marcaram a experiência do país em lidar, ao mesmo tempo, com desafios econômicos, sociais e ambientais da produção e do consumo (IPEA, 2016).

Nas últimas décadas, grandes mudanças ocorreram na agroindústria canavieira no Brasil. Cresceram os mercados de açúcar, etanol, energia da cogeração; surgiram o bioplástico, diesel da cana, biogás proveniente de subproduto -vinhaça e torta de filtro - e outras dezenas de coprodutos da cana; foram adotados a mecanização da colheita, novas formas de plantio, novos cultivares. Na regulação, foram superados os tempos de cotas de produção de açúcar, fortes subsídios e uma série de medidas que restringiam a produção e o comércio. A partir dos anos 1990, descentralizaram-se as atribuições estatais, desburocratizou-se parte do processo produtivo, adotando-se, em tese, a regulação voltada para a qualidade, a segurança no abastecimento e o fomento à inovação (IPEA, 2016). de Maria et al. (2016) complementam que os sistemas de produção da cana-de-açúcar, o principal produto do agronegócio paulista, e que ocupa aproximadamente 30% da área cultivável do estado de São Paulo, passaram por importantes mudanças tecnológicas, em função do desenvolvimento científico, das exigências ambientais, da legislação e da busca por maior produtividade e sustentabilidade.

A emergência das energias renováveis, principalmente a partir da década de 1990, além de coincidir com o período de expansão do etanol no Brasil, registrou também uma sucessão de acontecimentos que trouxeram e ainda trazem desafio ao setor produtivo

(IPEA, 2016). O fato de que o etanol é obtido a partir de uma fonte renovável e com menor emissão de gases de efeito estufa (GEE) em comparação aos combustíveis fósseis também ampliou sua maior aceitação no mercado. Em uma sociedade mais consciente quanto ao impacto ambiental de determinadas escolhas, tais vantagens constituem um diferencial de extrema importância, especialmente para aplicações em grandes centros urbanos (SILVA, 2012). Apesar da capacidade para fornecimento interno e exportação de etanol, as recorrentes crises no setor sucroenergético indicam necessidade de investimentos em tecnologias de maior precisão e eficiência que promovam redução dos custos de produção (RAMOS, 2016).

A palavra “crise”, na agroindústria canavieira, tem sido mais usual que a menção à sua trajetória, importância, desafios e perspectivas. Mesmo diante de um crescimento vertiginoso da produção no período de 2004 a 2014, a persistente dificuldade financeira, o endividamento e a baixa lucratividade são aspectos mais ressaltados nas últimas safras. Características como produção de 16% da energia do país e geração de 1 milhão de empregos, além da diversificação produtiva e do apelo ambiental no consumo, não têm sido suficientes para superar as dificuldades (IPEA, 2016).

De acordo com Braunbeck e Magalhães (2014) a indústria da cana-de-açúcar pode se beneficiar de tecnologias de mecanização que promovam a redução de investimentos, custos operacionais, redução de perdas na colheita e redução do uso de combustíveis fósseis e suas emissões, e que otimizem a eficiência operacional dos complexos ciclos de operações mecanizadas envolvendo diversos equipamentos interativos.

Em função do desenvolvimento tecnológico e das exigências ambientais, de legislação e de mercado, os sistemas de produção da cultura canavieira sofreram substanciais alterações, gerando, portanto, novas demandas para assegurar a conservação do solo e da água (DE MARIA et al., 2016). A tecnologia de produção agrícola deve ser aprimorada com foco não apenas na produtividade e na redução da demanda por novas áreas, mas principalmente na melhoria dos impactos ambientais para os quais a mecanização tem importante contribuição a dar (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2014). A redução de gás de efeito estufa está no contexto do desenvolvimento de tecnologias de produção agrícola.

Souza (2012) afirma que o uso de maquinário agrícola em todas as atividades relacionadas com o preparo do solo, tratamentos culturais e colheita, tem como consequência o tráfego intenso sobre o solo com baixa capacidade operacional das máquinas, elevado

custo operacional e com efeitos danosos à sustentabilidade do sistema, como compactação dos solos. Isso ocorre porque o sistema de manejo promove o tráfego dos rodados na região da soqueira, podendo influenciar negativamente no desenvolvimento radicular, na produtividade e longevidade do canavial. Fazendo referência a irreversível utilização de máquinas para realização de colheita, Ramos (2016) relata que os principais fatores operacionais que impactam a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, são o preparo do solo e sistematização dos talhões em termos tanto dimensionais, quanto de nivelamento. Estes elementos são fundamentais para a qualidade do produto colhido, eficiência energética e operacional, bem como a manutenção da longevidade dos canaviais.

O ciclo produtivo da cana-de-açúcar envolve operações que demandam energia para o preparo do solo em profundidade, preparo do sulco de plantio, plantio e transporte de fertilizantes, além da colheita que extraí cerca de 100 Mg ha⁻¹ de biomassa, incluindo a palha. Nesse ciclo, a preparação da área específica para plantio - canteiro - visa criar um ambiente favorável ao desenvolvimento da planta permitindo a infiltração e armazenamento de água, a circulação de gases e a propagação das raízes. No entanto, as rodas ou esteiras dos equipamentos promovem uma reacomodação das partículas, criando um forte arranjo estrutural necessário para suportar o peso dos equipamentos (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2014). O advento da mecanização tem contribuído com importantes ferramentas para a implantação de novas tecnologias e inovações, capazes de aperfeiçoar o manejo da cultura e otimizar os ganhos produtivos e econômicos. Porém, o intenso tráfego de equipamentos agrícolas durante todo o ciclo pode provocar alteração da qualidade física, acarretando mudanças no comportamento do solo e impactos negativos sobre a produtividade do canavial (ESTEBAN et al., 2019; JIMENEZ et al., 2021; GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019; MAZARON, 2019).

O novo cenário de intensa mecanização no setor canavieiro exige uma reengenharia na interpretação das variáveis relacionadas ao desenvolvimento das plantas, ou seja, uma revisão e reinterpretação de conceitos, especialmente dos que se referem ao preparo do solo, alinhamento das fileiras de cana e manejo e conservação dos solos e da água (MAZZA, 2015). Aspectos relacionados à compactação do solo têm sido considerados como limitantes para o aumento da produtividade na cultura da cana-de-açúcar. Diante disso, o setor vem buscando alternativas para o preparo do solo por meio de sistemas que sejam capazes de melhorar a produtividade dos canaviais e, conseqüentemente, sua competitividade no mercado (MAZARON, 2019).

Segundo Rossi Neto (2015) não há dúvidas que o aumento da produção brasileira de cana-de-açúcar não pode apenas estar relacionado ao aumento da área plantada, mas também, e mais importante, no incremento da produtividade. Assim, melhorar o manejo da cana-de-açúcar a fim de elevar a produtividade dos canaviais é de essencial importância para suprir esse aumento da demanda nacional e mundial por bioenergia.

De acordo com o IPEA (2016) esperam-se incrementos tecnológicos voltados para a área agrônômica do setor sucroenergético– induzidos ou direcionadas pelo mercado -, por meio do uso de novas técnicas agrícolas de produção, visando o aumento da produtividade agrônômica da cana. Sendo um dos gargalos técnicos a adequação de técnicas de manejo do solo.

A revisão bibliográfica está estruturada para contextualização de todo o trabalho desenvolvido, partindo solo como principal agente responsável por produção, explorando o efeito adverso da compactação, tráfego controlado e soluções de manejo conservacionista para exploração racional. Enfoca-se também no sistema de colheita mecanizado por ter potencial efeito em compactação e também por ter seu desempenho atrelada a parâmetros de planejamento de implantação de canavial e sistemas de preparo de solo.

2 Objetivos

O desenvolvimento da pesquisa abordada está dividida em três etapas.

A primeira etapa tem como foco avaliar questões relativas ao preparo de solo localizado por meio de canteirização – densidade aparente, taxa de infiltração e desenvolvimento de sistema radicular –, sua adequação geométrica quanto ao sistema de tráfego controlado – STC - e compara-lo a operação de subsolagem quanto a descompactação de solo e desenvolvimento de raízes. A partir daí é apresentado modelo que permite a comparação entre três sistemas de preparo de solo – convencional, reduzido e localizado com canteirizador ou subsolador – possibilitando a construção de cenários que permitam a avaliação operacional e econômica.

A segunda etapa aborda o sistema de colheita mecanizada, onde a proposta é apresentar indicador definido como índice de colheitabilidade que associado ao capacidade nominal da colhedora - capacidade de processamento do equipamento - e medições operacionais obtidas a partir de ferramentas que compõem a agricultura digital, possibilitem a criação de modelo para dimensionamento e gestão de recursos.

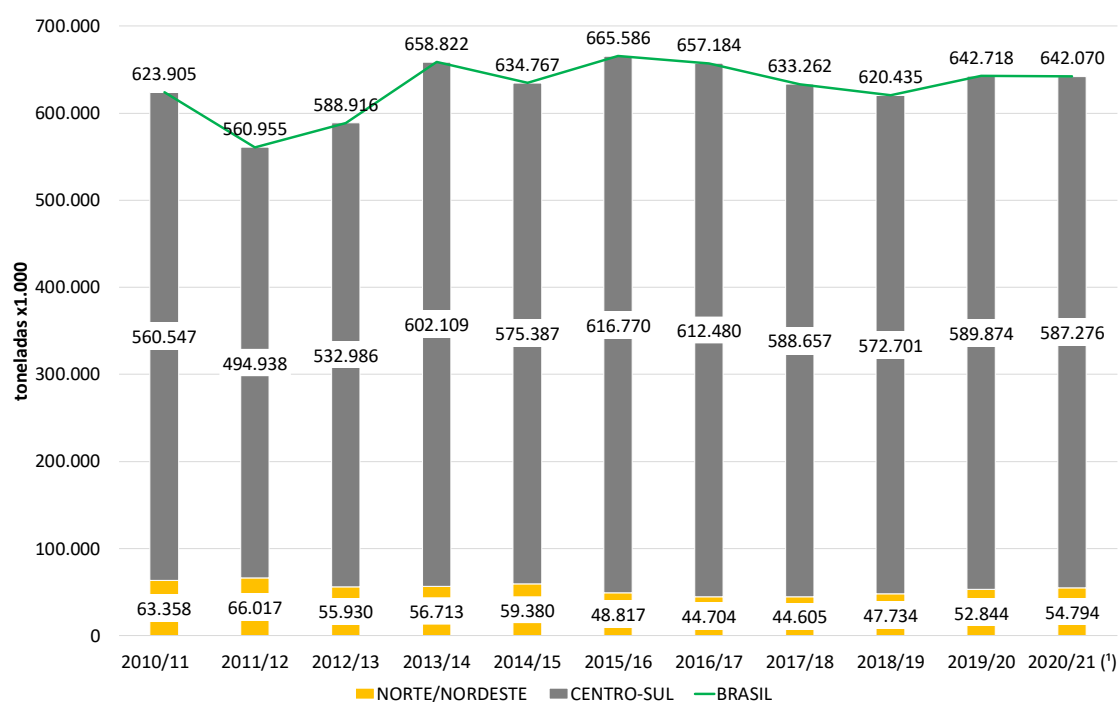
A última etapa consiste na elaboração de modelo que tem como resposta a receita operacional resultante da produção de uma tonelada de cana-de-açúcar, usando como entrada de dado as informações obtidas nas etapas anteriores, associadas a indicadores de mercado.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Importância da cultura de cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e de açúcar do mundo, e é o segundo maior produtor de etanol, situando-se entre os maiores exportadores de açúcar (NACHILUK, 2020). A cultura de cana-de-açúcar passou por uma revolução tecnológica nas últimas décadas, com a adoção de práticas sustentáveis e a extração de novos subprodutos. Além da produção de açúcar, o setor sucroalcooleiro produz etanol, que proporciona uma redução de 90% de emissão de gases causadores de efeito estufa em relação à gasolina e; energia elétrica com baixíssimo impacto ambiental, produzida próxima aos centros consumidores (UNICA, 2020). Dados da CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento – a safra 2020 está estimada em cerca de 642 milhões de toneladas de cana-de-açúcar - Figura 1.

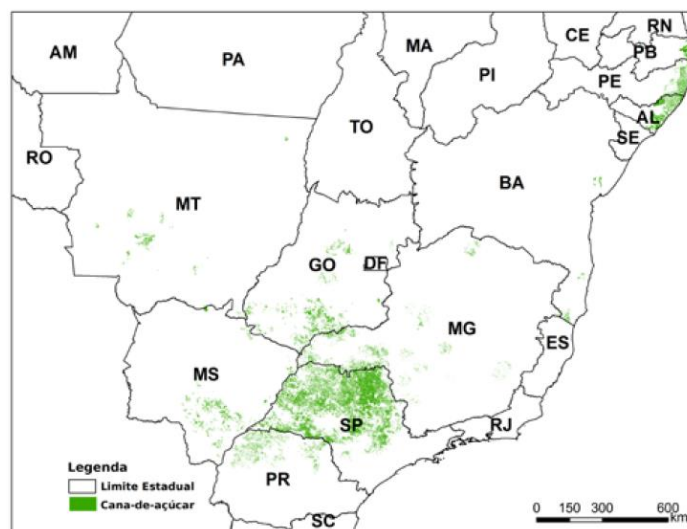
Figura 1- Evolução da produção da cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: CONAB (2020)

A cultura da cana-de-açúcar está presente em 1,2% do território nacional, concentrada principalmente em estados do Centro-Sul e Nordeste - Figura 2 - e está presente na vida de 70 mil produtores (UNICA, 2020).

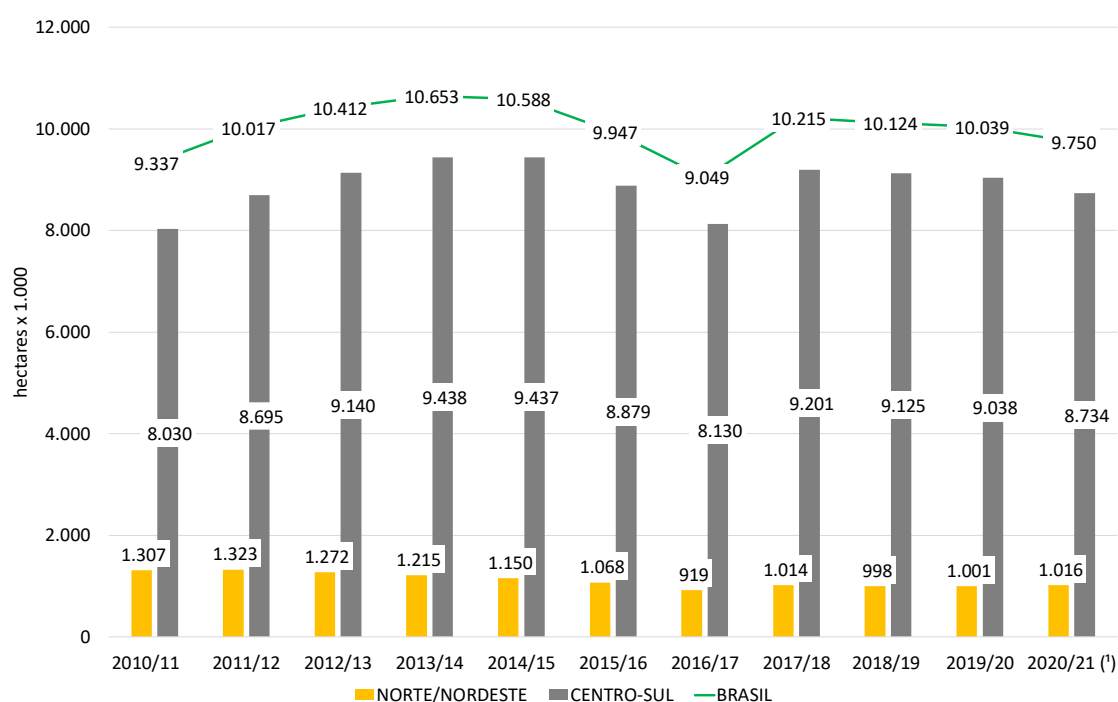
Figura 2- Áreas de cultivo de cana-de-açúcar mapeadas por imagens de satélite



Fonte: CONAB (2020)

A área cultivada para safra 2020 é de 9,75 milhões de hectares - Figura 3 -, sendo que 4,23 milhões de hectares são cultivados no Estado de São Paulo, e a Região Sudeste, como um todo, representa 5,17 milhões de hectares (CONAB, 2020).

Figura 3- Evolução da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil

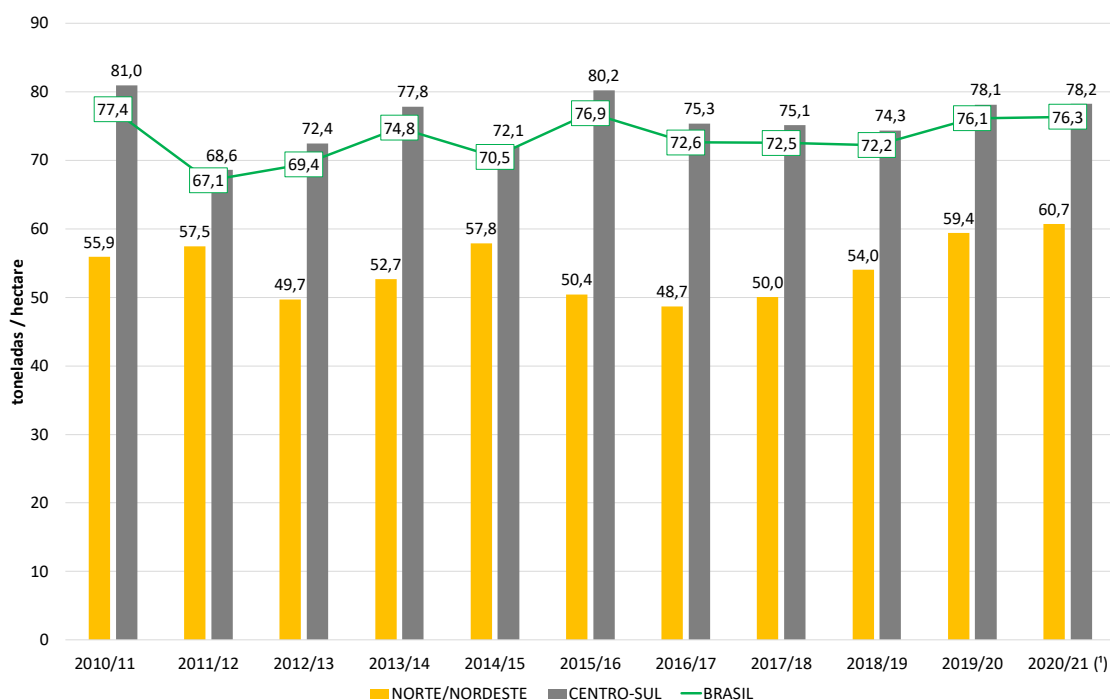


Fonte: CONAB (2020).

A estimativa de produção mundial de açúcar para a safra 2019/20, de acordo com a *United States Department Of Agriculture - USDA* -, será em torno de 174 milhões de toneladas. O Brasil deverá ser responsável pela produção estimada de 17,3% do açúcar mundial. Os principais países produtores de açúcar a partir de cana são Brasil, Tailândia e Índia (NACHILUK, 2020). A produção de etanol proveniente da cana de açúcar está estimada para a safra 2020 em 27,9 bilhões de litros e a de açúcar em 39,3 milhões de toneladas (CONAB, 2020).

Em relação ao valor bruto da produção agropecuária do Estado de São Paulo a estimativa preliminar indica que em 2019 a cultura foi responsável por 36,06% (R\$28,98 bilhões) do valor bruto da produção total paulista, configurando-se como a principal atividade econômica de sua agricultura. O complexo sucroenergético (açúcar e o etanol) ocupou posição de destaque nas exportações paulistas de 2019, representando 26,89% (US\$4,07 bilhões) das exportações do estado (NACHILUK, 2020). De acordo com a CONAB (2020) a produtividade média nacional é de 76,3 Mg ha⁻¹. A Figura 4 ilustra que a produtividade vem se mantendo estável, havendo necessidade de buscar alternativas tecnológicas para alavancá-la.

Figura 4 - Evolução da produtividade agrícola da cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: CONAB (2020).

Numerosos estudos e relatórios de entidades de pesquisa e fomento de energias renováveis reconhecem a experiência brasileira na área do etanol como exemplar no contexto internacional. Introduzida há mais de quatrocentos anos no Brasil, a cana-de-açúcar tornou-se a principal fonte de energia da biomassa no plano global. A soma de etanol com a energia utilizada pela própria indústria na produção sucroquímica, mais a oferta comercial de energia elétrica proveniente da queima do bagaço e da palha da cana, resultam em 16% da oferta total de energia no país. Tal porte se equipara ao da energia hidrelétrica na oferta primária de energia, sendo inferior apenas à oferta dos derivados do petróleo na matriz energética nacional. Para tanto, a produção de etanol desenvolve e incorpora tecnologias e gera em torno de 1 milhão de empregos (IPEA, 2016). As tecnologias nacionais desenvolvidas para a exploração comercial da cana-de-açúcar, tanto na área agrícola como na área industrial, foram determinantes para que o Brasil se tornasse uma referência na produção de açúcar e etanol a baixo custo (SILVA, 2012).

Mudanças e crises na economia, exigências de maior proteção da vegetação natural, da água e do solo modelaram a forma de produção da cana-de-açúcar e de seus derivados. A agroindústria tem se adaptado a esses fatores. Além disso, tem diversificado a produção e viabilizado novas tecnologias – como os carros bicom bustíveis e a geração de energia elétrica (IPEA, 2016). No período de 2008 a 2018, o setor sucroenergético passou por uma das mais graves crises da história. Além do desaquecimento da economia global, o setor foi penalizado por políticas públicas altamente distorcidas no mercado doméstico, assim como por fatores endógenos ao sistema produtivo. No mercado internacional, a eclosão da crise financeira mundial restringiu o acesso e encareceu o crédito a partir de 2008, num momento em que as empresas se encontravam em franca expansão. Além desse panorama externo desfavorável, o momento foi marcado pela perda de atratividade do etanol no mercado interno devido à política discricionária de precificação da gasolina e à desoneração tarifária deste derivado visando ao controle inflacionário. Esse quadro levou a perdas de eficiência e ao aumento nos custos de produção da indústria canavieira, estabelecendo uma situação insustentável para muitas empresas do setor, contribuindo para a estagnação de produção de cana-de-açúcar (FARINA et al, 2018).

3.2 Solo e agricultura

O solo tem um papel essencial na preservação da vida na Terra. A principal função do solo reside no fato de representar o suporte para a prática da agricultura, visando garantir a segurança alimentar das pessoas, devido às suas propriedades físicas e biológicas, à sua fertilidade, à sua capacidade de fornecer plantas com a água e nutrientes necessários para seu crescimento (TENU et al., 2012). Chamen (2011) trata o solo como um recurso global, por ser vital para o nosso bem-estar quanto o do planeta, mas este recurso está sendo degradado. Atenção particular deve ser dada às cargas nos rodados dos equipamentos agrícolas superiores a 6 Mg, juntamente com as altas pressões de inflação dos pneus, que têm impacto negativo no subsolo.

A estrutura do solo é um dos atributos mais importantes que afetam a produção agrícola, porque ela interfere na profundidade que as raízes podem penetrar, na quantidade de água que pode ser armazenado no solo e no movimento da fauna, água e aeração no solo (PAGLIAI et al., 2004). A degradação do solo é um grande problema ambiental em todo o mundo, e há fortes evidências de que os processos de degradação do solo representam uma ameaça imediata para a biomassa e a produção econômica, bem como um risco de longo prazo para a futura safra. Portanto, é absolutamente necessário que tais processos de degradação do solo sejam controlados (PAGLIAI et al., 2004). A degradação do solo pode ser física (erosão, compactação), química (perda de matéria orgânica, contaminação, salinização) e biológica perda de matéria orgânica e a redução resultante das comunidades microbiológicas) (TENU et al., 2012; ROSSETTO et al., 2014). No caso da degradação física do solo, duas características importantes são afetadas: densidade do solo e estrutura. Isso significa que a densidade do solo aumenta (o solo é compactado) e os elementos estruturais são danificados (deformados, triturados, cortados, quebrados, fragmentados) (TENU et al., 2012).

A análise e a interpretação das características dos solos integradas ao clima para a definição do planejamento das diversas atividades que envolvem a exploração com a cultura da cana-de-açúcar, tais como épocas e opções de preparo do solo, épocas de plantio e de colheita, integrando a estas duas últimas as opções varietais, praticamente determinam a possibilidade de êxito das estratégias a serem adotadas, no que se refere ao novo cenário de plantio e colheita mecanizados (MAZZA, 2015).

O CTC (2004) em projeto voltado para sistema de conservação de solo, contextualizou a interação solo e agricultura da seguinte forma:

- ➔ A utilização agrícola do solo exige a remoção da cobertura original das áreas, substituindo-a pela cultura econômica que se pretende explorar. Por mais cuidadosa e planejada que seja a interferência do homem nesse processo, não existem maneiras de modificar o perfil cultural sem romper o equilíbrio dinâmico anteriormente existente entre o meio e os agentes de intemperismo.
- ➔ A partir do momento em que se remove a cobertura original do terreno, ocorrem modificações nos componentes físicos, químicos e biológicos do solo e este passa a perder fertilidade. A intensidade de perda é inversamente proporcional ao nível de manejo agrônômico que venha a ser adotado na condução da nova lavoura.
- ➔ Áreas com solos originalmente férteis, quando exploradas de forma intensiva e descuidada, perdem rapidamente sua fertilidade através da exportação de nutrientes pelas culturas, se a reposição por meio de fertilizantes não for feita de forma e em quantidades adequadas. Esse é um problema grave, mas não irreversível, pois pode ser corrigido desde que se invista adequadamente na recuperação da fertilidade.
- ➔ O problema mais sério e de natureza irreversível é a perda de partes do próprio solo que, submetido aos agentes erosivos (chuvas, principalmente), tem sua camada superficial removida e, com ela, todas as propriedades essenciais para a manutenção das plantas cultivadas.

3.3 Zonas de manejo agrícola

Pode-se definir zona de manejo agrícola como sendo uma determinada microrregião cujas características edafoclimáticas definam a adoção de um sistema de manejo técnico-agrônômico - Figura 5 - visando à exploração do máximo potencial disponível (DINARDO-MIRANDA, L.L. et al., 2008). A caracterização de zonas de manejo agrícola permite o conhecimento dos recursos naturais disponíveis que quando cruzados com as necessidades da cultura, possibilitam:

- ➔ O adequado manejo varietal em função das épocas de maturação – precoce, média e tardia – buscando o máximo da cultura;
- ➔ O manejo agrícola mais adequado para as atividades de preparo de solo, plantio, tratamentos culturais e colheita, de acordo com as características interativas entre solo e clima;

- ➔ Análise da influência da utilização de técnicas agrícolas como, o uso de resíduos industriais e irrigação sobre a cultura.

Figura 5 – Componentes que caracterizam a zona de manejo



Os componentes da zona de manejo agrícola são representados pela profundidade, que está diretamente relacionada com a disponibilidade hídrica e o volume de solo explorado pelas raízes; pela fertilidade, como a fonte de nutrientes para as plantas; pela textura, que está relacionada com o nível de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e disponibilidade hídrica; e pela água como parte da solução do solo, que é vital para a sobrevivência das plantas (ROSSETTO et al., 2014).

Na interpretação de Zona de Manejo há que se agregar, quanto ao meio físico, as características topográficas, dentre outras variáveis, como: a época de safra, especialmente com a ampliação desta; as opções tecnológicas, algumas inovadoras no setor canavieiro, a exemplo do preparo localizado/canteirizado; e, ainda, a elevada disponibilidade de variedades, que apresentam distintos desempenhos em função do pisoteio causado pelo rodado das máquinas, fator que pode ser eliminado ou reduzido com uma sistematização adequada (MAZZA, 2015).

A utilização da classificação por zonas de manejo agrícola para fins de planejamento de toda monta (longo, médio e curto prazo) é estratégico. Para fins administrativos permite a análise setorizada através do cadastramento dos diferentes ambientes que passam ser tratados como blocos de igual potencialidade, permitindo desta forma análises comparativas mais precisas, tanto no âmbito interno, como no âmbito de análise externa de propriedades e empresas agrícolas (BRENCO, 2009).

Os ambientes de produção devem ser elaborados para cada unidade de bioenergia (usina) pois os mesmos são função das propriedades físico-químicas do solo e clima da região onde a unidade está inserida, ou seja, é uma característica edafoclimática. Logo pode haver variação de produtividade de um determinado ambiente para diferentes usinas que estão localizadas em regiões diferentes.

3.4 Compactação

A produção agrícola está diretamente relacionada ao tráfego de veículos. Sem a eficiência da mecanização no plantio, tratos culturais e colheita das culturas agrícolas através de tratores e colhedoras, as práticas modernas de produção não poderiam existir. No entanto, como os veículos tornaram-se progressivamente maiores, com aumento de peso, geram maiores deformações do solo e aumento da compactação (BARBOSA, 2012).

A compactação do solo pode ser definida como “a compactação da massa do solo em um volume menor”. O aumento da densidade aparente é acompanhado por mudanças estruturais, mudanças na condutividade térmica e hidráulica e nas características de transferência do gás, todas afetando o equilíbrio químico e biológico do solo (TENU et al, 2012).

Segundo Rodríguez et al. (2020) vários autores estabelecem que a compactação do solo é considerada o maior problema ambiental causado pela agricultura convencional. A compactação do subsolo também foi identificada como uma preocupação já na década de 1990, quando um grupo de trabalho foi estabelecido pela Organização Internacional de Pesquisa de Solo e Lavoura (ISTRO - *International Soil and Tillage Research Organisation*) e concluiu que metade dos solos franco-arenosos e arenosos na Holanda com teores de argila inferiores a 17,5% apresentam super compactação nos 0,2 m superiores do subsolo (CHAMEN, 2011). Tenu et al. (2012) definem como compactação artificial (antrópica) do solo o resultado do tráfego exagerado imposto por operações agrícolas, operações de transporte etc. A intensidade da compactação antrópica depende de diferentes fatores. Alguns deles pertencem ao solo, nomeadamente à sua susceptibilidade à compactação: distribuição granulométrica irregular, estrutura instável, teor reduzido de húmus, etc. Outros fatores são influenciados pelas características do equipamento agrícola; esta compactação é favorecida pelas máquinas pesadas que exercem alta pressão sobre o solo, pelo aumento do número de

passagens, pelo aumento da pressão de ar dos pneus, pelo tráfego agrícola realizado em solo úmido etc.

A compactação do solo é causada pela alta intensidade de tráfego e pressão dos pneus no solo do trator e é combinada na colheita, principalmente quando essas operações são realizadas em solo úmido ou com pneus de alta pressão no solo (CERSIOLA et al, 2015), resultando em redução da colheita (TENU et al, 2012). Chamen (2011) afirma que, a compactação do solo é uma consequência inevitável dos sistemas agrícolas mecanizados, cujas máquinas estão degradando os solos a ponto de alguns serem considerados pouco econômicos para serem reparados.

A compactação do solo por veículos de campo tem consequências negativas para praticamente todos os aspectos da produção agrícola. Aumenta a energia necessária para estabelecer as plantações, compromete a qualidade do plantio e a produtividade agrícola, leva ao escoamento de água acelerado, erosão e perda de solo. Também está implicado no aumento das emissões de óxido nitroso e na redução da eficiência do uso de água e nutrientes (CHAMEN, 2011).

Hamza e Anderson (2005), avaliando as causas da compactação do solo, confirmaram que as principais fontes são o uso excessivo de maquinário, cultivo intensivo e manejo inadequado do solo. A baixa quantidade de matéria orgânica do solo e operações realizadas em condições de umidade do solo são fatores agravantes. Foram observadas compactação a 0,60 m de profundidade, onde efeitos de pressão de contato agem próximo à superfície e a carga dos rodados mais profundamente no perfil de solo.

Com o tamanho cada vez maior das máquinas agrícolas, o problema de compactação do solo é agravado, causando aumento dos requisitos de potência e energia, aumento das emissões de CO₂, dificuldades na preparação da área a ser plantada, emergência da planta, crescimento da planta e rendimentos reduzidos (BOCHTIS et al., 2010).

Chamen (2011) relata que a densidade aparente aumentou como resultado de cargas impostas por rodados agrícolas, em vez de naturalmente ocorrer. Embora os veículos mais pesados causem maiores tensões no solo por passagem, os veículos mais leves, quando usados repetidamente, podem causar os mesmos danos. Há evidências que sugerem que as cargas elevadas das rodas podem danificar o subsolo, mesmo quando este tem uma alta tensão de pré-compressão e o solo está seco. Atualmente grandes tensões estão sendo exercidas a 0,40 m de profundidade ou mais, a extensão da área de compactação na superfície por meio de um maior volume de pneus (exceto onde sistemas

de esteira estão sendo usados) também aumentou. Esta situação resulta em potencial negativo para os canteiros (área de deposição das sementes no solo), aumenta a necessidade de energia do preparo do solo e influenciam negativamente a qualidade das operações agrícolas.

Segundo Souza (2012), citando Hakansson e Voorhees (1997), sistemas que promovem revolvimento do solo e apresentam tráfego de máquinas pesadas, como na cultura da cana-de-açúcar, podem promover compactação do solo até 0,40 m de profundidade, resultando em alterações estruturais do solo. Um dos maiores problemas é a compactação do solo nas áreas de cana-de-açúcar, especialmente nas que adotam práticas isoladas de controle da erosão em detrimento da aplicação de um conjunto de práticas consagradas, sejam simples ou complexas, que podem garantir a eficiência do planejamento conservacionista. A compactação reduz a infiltração de água, aumentando o volume de escoamento superficial, o que indica que é necessário associar ao planejamento das práticas conservacionistas o respeito à dinâmica das águas, por meio do planejamento do escoamento superficial (DE MARIA et al., 2016).

A compactação do solo é uma das principais causas do fluxo superficial e da erosão. Nesse ínterim, os solos compactados requerem maiores custos com os arranjos de irrigação e exploração, devido à má infiltração da água e à intensificação da evapotranspiração. A compactação do solo também provoca a redução da capacidade de retenção de água e da permeabilidade, reduz a aeração do solo, aumenta significativamente a resistência à penetração e a aração, inibe o desenvolvimento das raízes das plantas e a qualidade da lavoura se deteriora (TENU et al, 2012).

Testes de campo replicados mostraram que a compactação é criada por uma combinação de carga e pressão de contato. O tráfego aumentou a resistência à penetração do solo em 47% e a densidade do solo em 15%, enquanto reduzia a produtividade do trigo em até 16%, a porosidade do solo em 10% e a infiltração em um fator de quatro (CHAMEN, 2011). Para Lanças (2015) os principais efeitos nocivos da compactação são:

- ➔ Impedimento do desenvolvimento normal das raízes;
- ➔ Diminuição da ação capilar do solo, ou seja, apresentando restrição ao fluxo ascendente de água das camadas mais profundas e do lençol freático até as raízes das plantas em épocas de déficit hídrico;
- ➔ Dificuldade de infiltração da água no solo, provocando encharcamento nos solos em nível de escoamento superficial do solo em locais declivosos.

Chamen (2011) relata que a compactação do solo pode ter um efeito direto e indireto no desempenho da cultura. O efeito direto é o grau em que a compactação interfere na capacidade da cultura de extrair água, nutrientes e ar, enquanto o efeito indireto está associado à oportunidade, ou seja, o tempo adicional que pode levar para plantio e qualidade do plantio em área onde o preparo de solo já foi realizado. Os efeitos da compactação do solo impostos por veículos de campo são extremamente negativos, podendo-se citar, entre eles:

- ➔ Redução de taxas de infiltração, drenagem de água e aeração;
- ➔ Influências negativas em produtividade agrícola (toneladas ou sacas por hectare produzidos) e gases de efeito estufa, bem como na energia necessária para enraizamento e absorção de nutrientes;
- ➔ As cargas elevadas aplicadas por equipamentos agrícolas são uma ameaça para as camadas de subsolo, cujas condições de recuperação já podem ser irreversíveis do ponto de vista econômico. Esse dano pode já ser permanente e ter um efeito negativo sobre a produtividade e as propriedades hidráulicas do solo;
- ➔ Medidas restaurativas para compactação do solo são caras e rapidamente comprometidas pelo tráfego não controlado subsequente;
- ➔ O stand da cultura é comprometido pela natureza aleatória em que a compactação é aplicada no campo, resultando em baixa produtividade.

Em todos os solos, a compactação tem um efeito prejudicial sobre a infiltração de água. Onde não houve compactação provocado por rodado agrícola, a infiltração aumentou de 84 a 400% junto com o aumento da água disponível na planta (CHAMEN, 2011). Assim a compactação altera a qualidade física do solo, com modificações em sua estrutura, criando um ambiente menos propício para o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, o que interfere na sua produtividade (SOUZA, 2012).

O CTC (2004) através da abertura de trincheiras de observação, notou que a camada compactada se situa basicamente entre 0,05 a 0,45 m de profundidade do solo. Neves (2018), citando trabalhos realizados pelo CTC, indica perda de 13% de produtividade quando a compactação ocorre na linha de cana em solo seco. A identificação da camada compactada pode ser feita por meio de equipamentos apropriados, destacando a determinação da densidade do solo, que é o método de maior precisão e largamente utilizado, uma vez que busca avaliar a proporção do espaço poroso em relação ao volume de solo.

A presença da compactação pode ser notada também através de observações dos sintomas visuais que provoca em plantas e no solo:

- a) Encrostamento ou selamento superficial do solo: forma uma fina camada de impedimento à infiltração de água e de ar, ao mesmo tempo que dificulta também a emergência das plântulas;
- b) Compactação superficial do solo, causada principalmente pelo tráfego: é possível contabilizar essa compactação como o volume de macroporos destruídos, proporcional ao volume de espaço criado pelo rebaixamento da superfície do solo em relação à sua posição original;
- c) Compactação em subsuperfície: resultante principalmente das operações de preparo de solo aparece geralmente entre 0,10 e 0,20 m de profundidade;
- d) Baixa taxa de infiltração: empoçamento de água e ocorrência frequente de enxurradas;
- e) Raízes: aspecto (ovaladas, achatadas ou normais); quantidade (abundante, pouca, normal); distribuição (superficial, no sulco de plantio, no sulco de cultivo);
- f) Consistência do solo (resistência a pressão).

Constatada a existência de camada compactada, indica-se abrir pequenas trincheiras (1,0 x 0,50 x 0,70 m) com o objetivo de detectar o limite inferior da camada mediante observação do aspecto morfológico da estrutura do solo, da forma e da distribuição do sistema radicular das plantas e/ou da resistência ao toque com instrumento pontiagudo (penetrômetro) - Figura 6 e Figura 7. O estudo das informações observadas nas paredes da trincheira irá servir para averiguar e coletar dados referentes às propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Com relação às propriedades físicas, o exame revela a presença ou ausência de camada compactada em subsuperfície bem como de um adensamento generalizado.

Figura 6- Trincheira indicando zona de compactação



Fonte: CTC (2008)

Figura 7- Trincheira indicando ausência de camada compactada



Fonte: CTC (2008)

A utilização de máquinas e implementos, tais como o arado, a grade e a enxada rotativa, resolve o problema de compactação do solo nas camadas superficiais; porém, na maioria dos casos, transfere-a para camadas mais profundas. O uso destes implementos numa área, quase sempre à mesma profundidade de preparo do solo e por

diversos anos consecutivos, tem contribuído para o surgimento de camadas compactadas abaixo da linha de ação dos órgãos ativos dos mesmos, sendo atualmente denominada compactação subsuperficial. Deve-se observar também que, apesar de onerosa, a operação de rompimento das camadas compactadas do solo, quando não realizada, representa uma sensível diminuição da produção e da produtividade da cultura, principalmente se houver déficit hídrico, gerando prejuízo para os agricultores (LANÇAS, 2015).

Antille et al. (2019) afirma que os efeitos diretos da compactação impactam diretamente no desenvolvimento fisiológico restringindo processos como a absorção de água e nutrientes, que são adversamente afetados pela impedância mecânica do solo (por exemplo, expansão e exploração da raiz, acumulação e partição de biomassa). Ainda segundo o autor, os efeitos indiretos são aqueles que se relacionam com a oportunidade, ou seja, capacidade operacional para reparar a compactação e executar operações como plantio e tratos culturais dentro do cronograma devido as condições de trafegabilidade. As oportunidades para conduzir tais operações ocorrem dentro de uma anela relativamente estreita, uma vez que é determinada pela cultura (por exemplo, estágio fisiológico), condições climáticas e do solo (trafegabilidade e friabilidade) para operações com máquinas agrícolas. Em culturas estabelecidas em solo com compactação "residual", como aquela originada durante a colheita da safra anterior, o impacto no rendimento é comumente explicado pela redução do estande de plantas e maior variabilidade do estande de plantas.

Lanças (2005) aponta como consequências da compactação do solo o aumento da exigência tratorial das operações agrícolas, o que provoca uma elevação nos custos operacionais para implantação e condução de uma cultura comercial. Como exemplo de perdas econômicas associadas à compactação tem-se penalidades de rendimento, custos adicionais como maior uso de fertilizantes para conter as perdas induzidas por compactação, além de maior uso de combustível devido aos maiores requisitos de energia para puxar implementos através do solo compactado (CHAMEN et al., 2015).

Ao usar a estratégia de subsolagem, benefícios econômicos positivos - Figura 8 - para o agricultor podem resultar do aumento da produtividade. Buscar evitar causar compactação por meio, por exemplo, do STC ou o uso de pneus de baixa pressão sobre o solo limita a incidência e/ou severidade da compactação no primeiro local e tende a oferecer rendimentos superiores e menores custos de produção (CHAMEN et al., 2015).

Figura 8 - Comparação estilizada do efeito sobre a margem bruta de diferentes estratégias de gerenciamento de compactação

\$/ha	Margem Bruta	Margem Bruta	Magem Bruta
	Custos de Produção	Custos de Produção	Custos de Produção
	Compactação Evitada (STC)	Compactação Evitada (subsolagem)	Solo Compactado (sem gerenciamento)

Fonte: Chamen et al. (2015)

Para Souza (2012) dentro do contexto de sistemas economicamente viáveis, adequações nas máquinas agrícolas têm resultado no maior peso e potência, a fim de viabilizar a utilização de áreas maiores e a redução no tempo de trabalho, porém, a produtividade das culturas depende de um equilíbrio entre as condições do solo necessárias para o crescimento das culturas e as necessárias para as operações mecanizadas.

A remoção da compactação induzida por veículo da área cultivada reduz os requisitos de energia do preparo do solo, bem como a necessidade do preparo em si. O tráfego zero reduziu os requisitos da profundidade de arado de aivecas (antes operando a 0,55 m) caiu 18% e a demanda de energia para a preparação do canteiro de sementes (sulcação) em até 87%. De maneira geral, a economia de energia registrada foi de 29-87% (CHAMEN, 2011).

Chamen (2011) após análise de diversos trabalhos de pesquisas publicados, observa que a compactação do solo por veículos teve um resultado significativamente negativo na produtividade das culturas, concluindo que as respostas negativas à compactação para 15 diferentes culturas variaram em produtividade de 2 a 81% quando submetidas a cargas de rodado de 1 a 10 Mg. Segundo Bluett (2019) durante a conferência de 2018 da International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO), a compactação do solo foi mencionada em cerca de 15% dos trabalhos apresentados, porém apenas uma pequena porcentagem deles abordando questões para sua melhoria. Menos de 1% dos trabalhos apresentados no ISTRO 2018 focaram em evitar o problema, como por exemplo, controlar o tráfego de campo. O autor afirma ainda que a utilização do STC,

que protege a maior parte da área cultivada ao restringir todo o tráfego a vias permanentes é uma alternativa viável para evitar os efeitos que podem ser causados pela compactação. Para Souza (2012) a redução do impacto das operações agrícolas sobre o solo, associada com o controle de tráfego poderia diminuir substancialmente a compactação do solo prolongando o ciclo da cultura, resultando em maior margem de contribuição/lucratividade.

Cerisola et al. (2015) relatam que o grande desafio é o diagnóstico da qualidade de vida dos solos para desenvolver um sistema produtivo, baseado na agricultura sustentável, e afirma que as melhores condições para o trânsito são inegáveis, desde que controladas, uma vez que o trânsito resulta em modificações físicas que levam à compactação. Evitar a compactação do solo diminuirá a necessidade e a intensidade do preparo do solo, aumenta o número de agregados mais estáveis e reduz o potencial de degradação da superfície do solo (CHAMEN, 2011).

Embora existam numerosas fontes de dados que demonstram a diminuição da produtividade causada pela compactação do solo, os tratamentos experimentais empregados geralmente criam um viés que limita o uso dos dados para curvas de custo econômico. A análise ao nível de empresa pode ser conduzida por meio de orçamento parcial - avaliação específica de um dos itens que compõem a peça orçamentária -, e análise de margem contribuição – comparando por exemplo, a adoção de uma nova prática e avaliando seus impactos em custos e produtividade -, com base em dados de gerenciamento de indicadores operacionais suplementados por dados experimentais e de pesquisa para caracterizar as operações. Dado que a eficácia e a duração das medidas podem variar ao longo do tempo, é necessário ter o cuidado de considerar o perfil temporal dos custos incorridos e dos benefícios alcançados, implicando o uso de técnicas como taxas de desconto financeiro ou períodos de reembolso (CHAMEN et al., 2015).

3.4.1 Impacto da compactação na eficiência do uso de fertilizantes

A compactação tem um impacto negativo no suprimento de nutrientes e na mobilidade dos mesmos no solo, sendo sua absorção prejudicada pelo enraizamento restrito da cultura, falta de oxigênio e maiores perdas (desnitrificação) do sistema do solo que podem levar à poluição difusa. A desnitrificação é maior em condições úmidas, quando o fertilizante é aplicado em solos fortemente compactados. As perdas de sedimentos desencadeadas pela compactação e a má infiltração associada aumentam a perda consequencial de fósforo e potássio. A compactação também pode aumentar as

perdas para a atmosfera na forma de dióxido de carbono e metano. No geral, evitar a compactação pode aumentar a recuperação de nutrientes em até 20% (CHAMEN, 2011).

A principal consequência do cultivo intensivo de longo prazo é a degradação da estrutura do solo, o que pode reduzir o efeito dos fertilizantes químicos. À medida que a erosão do solo aumenta, as partículas sólidas do solo e os nutrientes podem ser transportados com o consequente risco de poluição das águas superficiais (PAGLIAI et al, 2004).

3.4.2 Sistema radicular

As plantas requerem um sistema radicular que forneça água e nutrientes adequados para o crescimento dos rebentos e para os ancorar no solo. A distribuição ideal do comprimento da raiz depende principalmente da distribuição de água e nutrientes no solo (BENGOUGH et al., 2006). Em solos compactados ou camadas compactadas, a profundidade de penetração das raízes e sua densidade são restritas, sendo o efeito um desenvolvimento lento do sistema radicular. Como resultado, o acesso da planta à água e nutrientes é limitado, enquanto a capacidade do sistema radicular de neutralizar o efeito nocivo dos agentes patogênicos é diminuída (TENU et al, 2012).

Solos densos ou compactados dificultam o crescimento das raízes - tanto em extensão quanto em profundidade - e, dessa forma, o consumo de água fica limitado à planta, o que afeta seu desempenho às repetidas passagens de máquinas agrícolas (CHAMEN, 2011; RODRIGUEZ et al, 2020). De acordo com Hamza e Anderson (2005) a diminuição da fertilidade por impedimento físico do solo ao desenvolvimento do sistema radicular também ocorre em solos compactados, devido ao menor volume explorado pelas raízes, à redução do armazenamento e do fornecimento de água e nutrientes, o que leva a exigência adicional de fertilizantes com custo de produção cada vez maior.

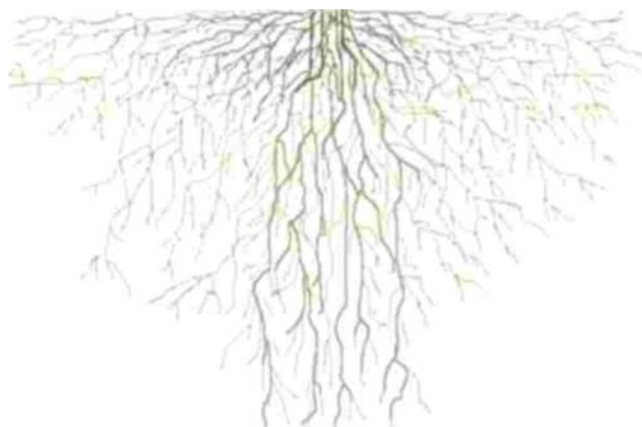
O crescimento da raiz no campo costuma ser retardado por uma combinação de estresses físicos do solo, incluindo impedância mecânica, estresse hídrico e deficiência de oxigênio. As tensões operacionais podem variar continuamente, dependendo da localização da raiz no perfil do solo, das condições prevalecentes da água no solo e do grau de compactação do solo (BENGOUGH et al., 2006). A compactação (solo superficial e subsolo) reduz a porosidade do solo, aumenta a resistência do solo e, portanto, impede a exploração da raiz do perfil. Reduz significativamente a eficiência do

uso de fertilizantes e água (irrigação e chuva) e aumenta o risco de escoamento e erosão e, portanto, de poluição e de assoreamento cursos de água. Também reduz o rendimento das colheitas. A maior parte da compactação é um produto da resistência ao movimento do tráfego de campo, uma ineficiência substancial que afeta os requisitos de energia de todas as operações de campo, particularmente aquelas em solo cultivado (BLUETT et al, 2019).

De acordo com Vasconcelos e Casagrande (2008) as raízes têm função principal na planta de sustentação, além de absorver água e nutrientes. A arquitetura do sistema radicular muda de acordo com a idade da planta, tanto entre estágios (cortes) como dentro de um mesmo estágio (meses de desenvolvimento). As primeiras raízes que se desenvolvem após o plantio da cana-de-açúcar são as raízes de fixação. Durante aproximadamente os primeiros 30 dias de brotação das gemas, a planta vive das reservas de nutrientes contidas no tolete e, parcialmente, do suprimento de água e de nutrientes proporcionados por essas raízes de fixação. A medida em que as raízes vão se desenvolvendo, a cana-planta passa a depender exclusivamente das raízes dos perfilhos.

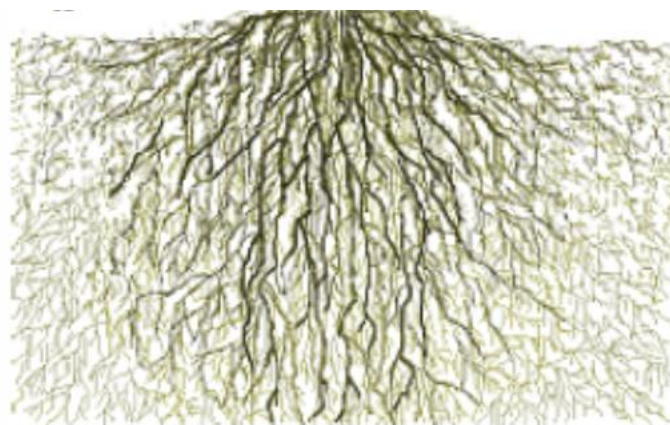
O sistema radicular da cana-planta explora mais intensamente as camadas mais superficiais, se comparado a soqueira, que apresenta um incremento na exploração de subsuperfície - Figura 9 e Figura 10. A cana-de-açúcar apresenta 70% da massa seca de raízes até 0,40 m de profundidade, sendo a região mais impactada pelo tráfego das máquinas.

Figura 9- Sistema radicular de cana planta



Fonte: Vasconcelos (2008)

Figura 10- Sistema radicular cana soca



Fonte: Vasconcelos (2008)

O desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar é função das condições edafoclimáticas e têm influência direta em algumas características da planta como a resistência à seca, eficiência na absorção de água e dos nutrientes do solo. É importante compreender o crescimento e distribuição do sistema radicular, dentro do perfil do solo, visando à máxima eficiência do seu desenvolvimento (VASCONCELOS et al., 2003). Logo, a elaboração de estratégias de manejo agrícola deve ter a componente desenvolvimento do sistema radicular como um de seus atributos principais. Em ciclo de cana-planta, há uma correlação direta entre o volume do sistema radicular e a produtividade (STORINO et al., 2008)

Tormena et al. (2002) relatam que a resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionadas com o crescimento das plantas e modificada pelos sistemas de preparo do solo. O crescimento das raízes pode causar a deformação do solo numa zona próxima à ponta das raízes e a pressão exercida contra as partículas e/ou agregados deve ser suficiente para propiciar a penetração e o alongamento das raízes. Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro e na direção preferencial do crescimento radicular. Além disso estudos recentes indicam que a resistência do solo à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas e na partição de carboidratos entre a raiz e parte aérea. Na estação seca, as plantas podem exigir eixos de raiz principais longos para acessar a água armazenada profundamente no perfil do solo, enquanto se houver água em abundância e nutrientes disponíveis, apenas uma pequena fração do comprimento da raiz pode ser suficiente (BENGOUGH et al., 2006).

Para de Maria et al. (2016) os principais pontos que devem ser levados em consideração na escolha do sistema de preparo do solo correspondem aos fatores limitantes ao desenvolvimento radicular, a saber:

- ➔ Impedimento químico: na superfície ou subsuperfície, diagnosticado por meio de análises de solos. Correção: aplicação de calcário para neutralização da acidez na profundidade de preparo do solo e aplicação de gesso (sulfato de cálcio) para melhoria da fertilidade em subsuperfície;
- ➔ Impedimento físico: diagnosticado por meio do histórico da área, número de colheitas mecanizadas e da verificação da presença de camadas compactadas. Correção: usar equipamentos mecânicos como arado, subsolador, entre outros, ou biológicos como culturas em rotação com presença de raízes pivotantes;
- ➔ Impedimento biológico: deve ser feito diagnóstico das plantas daninhas e das pragas de solos (*Migdolus*, *Sphenophorus*, nematoides) por meio de observações no campo, análise de solos e de raízes e rizomas. Controle: por meio do sistema de preparo do solo e destruição da soqueira, do uso de nematicidas e inseticidas por ocasião do plantio e soqueira e do uso de herbicidas.

Otto (2012) aponta que a colheita mecanizada sucessiva do canavial, sem cultivo da soqueira, altera as propriedades físicas da camada superficial do solo, com efeito negativo na densidade radicular da cultura. Valores de resistência à penetração inferiores a 0,75 MPa não comprometem o crescimento do sistema radicular da cana, porém resistência a penetração entre 0,75 a 2,0 MPa diminui a densidade radicular e, a partir de 2,0 MPa, há restrição severa ao crescimento radicular. Barbosa (2015) concluiu que os atributos físicos do solo resistência à penetração e densidade aparente apresentaram correlação com o desenvolvimento radicular, sendo que em solo arenoso a restrição ao crescimento das raízes ocorreu quando a resistência à penetração foi maior que 1,5 MPa e densidade aparente de 1,7 kg m⁻³, enquanto que nos solos de textura argilosa esses valores foram de 2,5 MPa e 1,25 kg m⁻³ respectivamente. Em geral, o sistema radicular da planta se concentrou nos primeiros 0,40 m (70%) e ao redor da touceira (região do sulco de plantio).

3.5 Tráfego controlado

Ao definir linhas de tráfego permanente, tem-se como principal efeito a redução da compactação do solo em todo o campo que ocorre como resultado de passagens múltiplas aleatórias de máquinas agrícolas (KINGWELL e FUCHSBICHLER,

2011). Chamen (2015) aponta que o tráfego desorganizado ou aleatório de equipamentos agrícolas em áreas de produção causa um aumento na densidade aparente de qualquer solo, o que aumenta sua resistência e reduz sua porosidade.

Chamen (2011) em extensa revisão de literatura sobre o impacto da compactação do solo na eficiência de uso de água infiltração, conclui que a infiltração aumentou em 84-400% na ausência de compactação provocada por rodado agrícola, resultando em aumento da água disponível para planta. Em condições úmidas, mitigar ou evitar a compactação pode diminuir o risco de escoamento superficial, enquanto em condições secas pode diminuir o risco de seca na planta dada a capacidade do solo de capturar água (taxa de infiltração) e armazenar água em seus poros (água disponível para a planta). A agricultura de tráfego controlado é uma tecnologia baseada em evitar a compactação do solo por meio do uso de linhas de tráfego permanentes. Tem potencial para restaurar a estrutura do solo, aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa - GEE. No entanto, aumentar a produtividade de uma maneira economicamente viável é sempre uma motivação para os agricultores se converterem a novos métodos de produção (GALAMBOŠOVÁ et al., 2014).

Hamza e Anderson (2005) definem a agricultura de tráfego controlado como um sistema de gerenciamento de maquinário de campo utilizado para proteger os solos das mudanças indiscriminadas em sua estrutura, causadas pelo tráfego não sistemático e extenso de veículos agrícolas; criando duas zonas, canteiros de cultivo sem tráfego e faixas de tráfego sem cultivo, sendo que ambos são otimizados para suas diferentes funções. O STC é um sistema de gestão agrícola especializado que vem ganhando aceitação progressiva nos países europeus e que pode ajudar a resolver os problemas mencionados relacionados a compactação (BOCHTIS et al., 2010).

A *Australian Controlled Traffic Farming Association Inc.* (ACTFA, <http://actfa.net/>) define o STC como um sistema em que:

- ➔ todas as máquinas têm o mesmo trabalho ou modular e largura de via, de modo que o tráfego de campo pode ser confinado à menor área possível de vias permanentes;
- ➔ todas as máquinas são capazes de uma orientação precisa ao longo dessas faixas de tráfego permanentes e
- ➔ o layout das faixas de tráfego permanentes é projetado para otimizar a drenagem de superfície e a logística operacional.

Define-se como STC um conjunto de tecnologias e práticas que regem o uso de maquinário que limita os danos ao solo e a compactação nas operações de maquinário de campo. Envolve o alinhamento de todas as rodas do equipamento para todas as operações de cultivo e, a seguir, restringe seu uso a faixas de tráfego definidas permanentemente (KINGWELL e FUCHSBICHLER, 2011).

Segundo Antille et al. (2019) as preocupações sobre a sustentabilidade a longo prazo de áreas sob manejo agrícola, associada à deterioração progressiva dos recursos do solo contribuíram para o desenvolvimento de estratégias de gestão de tráfego de campo mais eficientes; sendo o STC uma destas estratégias. O STC separa zonas de tráfego de zonas de crescimento de plantas e concentra a passagem de pneus em linhas permanentes, com diminuição de área submetida ao tráfego (LANÇAS, 2015; MICHELAZZO, 2018); distinguindo fisicamente essas áreas, assim uma área menor é atingida, embora mais intensamente, melhorando a capacidade de tráfego, ao mesmo tempo que suporta a melhoria da estrutura do solo entre as linhas destinadas ao tráfego, aumentando assim os rendimentos das colheitas e oferecendo outras vantagens, como a redução da sobreposição de aplicação o que representa em economia de insumos (KINGWELL e FUCHSBICHLER, 2011); evitando o custo associado ao ciclo vicioso de compactação e afrouxamento do solo praticado no sistema de plantio convencional de cana-de-açúcar (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2014).

O controle de tráfego aumentou a capacidade de água disponível de 10,2 para 15,4 mm em 0,10 m de profundidade e reduziu a densidade do solo em 50% até 0,10 m e 27% até 0,30 m de profundidade (McHUGH et al., 2009), facilitando o enraizamento com impacto positivo em produtividade, enquanto diminui potencialmente o escoamento superficial de partículas do solo, água nutrientes e produtos químicos agrícolas (HAMZA e ANDERSON, 2005).

Botta et al. (2008) consideraram os efeitos de diferentes cargas de roda e pressões sobre o solo em regimes de plantio direto e convencional em um solo franco-argiloso. Além de uma maior suscetibilidade à compactação do subsolo dentro do regime de cultivo convencional, eles concluíram que a carga da roda era o fator dominante na compactação do subsolo e era independente da pressão sobre o solo. De acordo com Chamen (2011) em um regime de tráfego controlado, há também cerca de 13% de economia com a melhoria da eficiência de tração e 30% menos forças de reboque ao operar em faixas de tráfego compactadas. Os profissionais que empregaram o STC na Austrália comprovaram a redução de demanda de energia e selecionaram tratores de

menor potência para a execução das operações agrícolas, o que resultou em redução de 60% no uso de combustível. O pesquisador sintetiza que as pesquisas econômicas provenientes da Austrália, os principais elementos que resultaram no aumento da lucratividade adotando-se o tráfego controlado foram:

- ➔ redução de até 60% no uso de combustível;
- ➔ sobreposições de aplicações de insumos reduzidas como resultado da orientação de satélite de alta precisão;
- ➔ melhores respostas a produtividade obtida por melhores taxas de infiltração de água;
- ➔ redução significativa nos insumos de cultivo.

Kingwell e Fuchsbichler (2011) em estudo conduzido em área onde o STC foi implementado concluíram que a lucratividade aumentou cerca de 50%, por meio de economia de insumos e aumento de produção, indicando que o aspecto mais valioso da tecnologia é o seu impacto benéfico no rendimento e na qualidade das safras cultivadas em solos mais sujeitos à compactação. Souza (2012) observa que para o sistema de produção da cana crua, sem queima da palha e com frequente uso da mecanização agrícola promove o tráfego intenso sobre o solo, resultando na sua compactação. O sistema de manejo com controle de tráfego agrícola representa uma alternativa viável para o setor agrícola, sendo que neste sistema são mescladas nas áreas de cultivo zonas destinadas ao tráfego e zonas destinadas somente ao crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas concentrando a passagem de pneus em linhas permanentes, diminuindo a influência da compactação sobre a cultura. Souza (2012) ainda relata que:

- ➔ O intervalo hídrico ótimo foi maior no canteiro e linha de plantio nos manejos com controle de tráfego. Predomínio de poros arredondados e complexos indicaram maior porosidade e menor compactação no manejo com controle de tráfego na linha de plantio;
- ➔ O manejo com controle de tráfego apresentou maior massa seca, superfície e volume radicular. Os manejos com controle de tráfego proporcionaram compactação na linha do rodado e preservaram a qualidade física do solo na região da soqueira, resultando no maior desenvolvimento do sistema radicular, com aumento de 18% na produtividade e 20% no rendimento de açúcar;
- ➔ O STC proporcionou melhor interação máquina-solo ao diminuir a resistência do solo ao avanço do pneu durante o deslocamento do trator em solo mais

compactado, resultando na menor demanda de combustível e redução no consumo de energia necessária no preparo do solo, uma vez que os órgãos ativos (sulcadores) trabalham em área não submetida ao tráfego. Isto também refletiu em maior capacidade de suporte de carga na linha do rodado, além do tráfego de máquinas agrícolas nos solos com maior conteúdo de água do solo e uma menor resistência ao desenvolvimento radicular na linha de plantio, devido a menor pressão de pré-consolidação;

- ➔ O sistema de manejo com controle de tráfego agrícola resultou em 18% de incremento de produtividade da cana.

Os resultados publicados por Galambošová et al. (2014) mostram que a resposta de rendimento mais comum ao STC foi um aumento na faixa de 10 a 20% e havia quase 100% de probabilidade de uma resposta de rendimento positiva em qualquer ano. Godwin et al. (2015) concluíram que o STC é relevante em reduzir os efeitos adversos do tráfego de campo, exibindo benefícios na forma de melhores capacidades operacionais das colheitas, redução do consumo de energia e melhores características de infiltração do solo. Os resultados gerados nos trabalhos conduzidos pela equipe de pesquisa na Cranfield University durante três safras, apontam que o tratamento onde foi aplicado o STC teve vantagens sobre o sistema de tráfego aleatório (sem linhas de tráfego estabelecidas), evidenciando assim as vantagens do STC. Os resultados observados em aumento de produtividade foram:

- ➔ Cevada 50%, com significância estatística de 5%;
- ➔ Milho 32,5%, com significância estatística de 15%;
- ➔ Trigo 10%, com significância estatística de 10%.

Antille et al. (2019) comentam que há evidências circunstanciais e diretas que demonstram os benefícios significativos de produtividade e sustentabilidade associados à adoção do STC e citam como impactos benéficos do STC:

- ➔ Desempenho e capacidade operacional da colheita;
- ➔ Eficiência de uso de fertilizantes e água (chuva e irrigação);
- ➔ Redução de emissões de gases de efeito estufa e
- ➔ A pesquisa e a prática agrícola também apresentam que as melhorias gerais na eficiência que podem ser alcançadas com o STC geralmente se traduzem em maior margem de lucro.

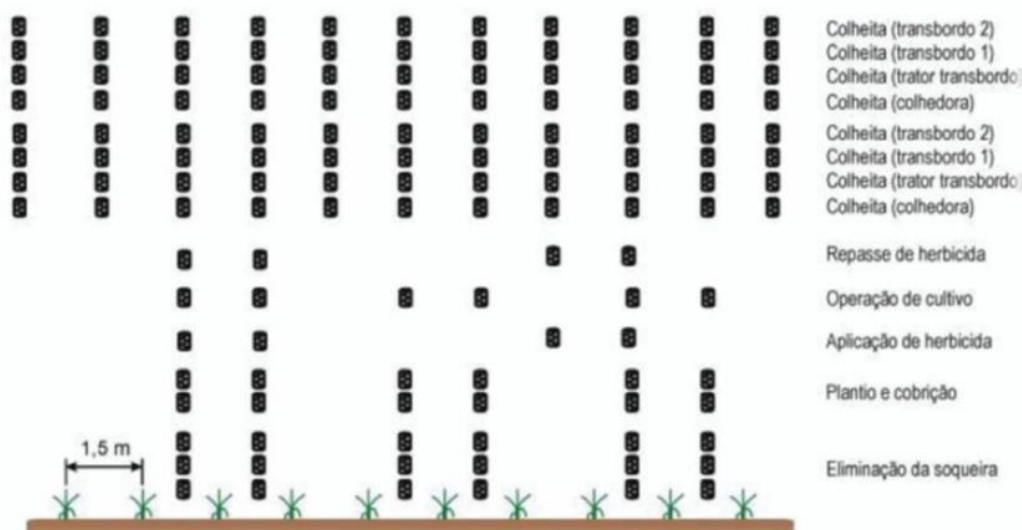
Chamen (2015) recomenda que um bom modelo de pesquisa é uma parceria estreita entre produtores agrícolas e cientistas pesquisadores conduzindo experimentos de

campo que estão em fazendas comerciais. Fazendas que usam o STC são, na verdade, locais ideais para pesquisas sobre a estrutura do solo

A compactação do solo e o pisoteio de máquinas agrícolas nas linhas de cana são dois fatores que reconhecidamente reduzem o rendimento da cana-de-açúcar e a vida útil das plantações de cana-de-açúcar (GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019). A mecanização intensiva agravou esses problemas; por isso, o controle do tráfego nos canaviais tornou-se fundamental para a sustentabilidade, pois no STC as esteiras e/ou rodados das máquinas sempre compactam na mesma entrelinha, separando as parcelas onde há cana-de-açúcar (ROSSETTO et al., 2014).

A Figura 11 ilustra as zonas de tráfego no sistema convencional de produção de cana de açúcar, sendo que na colheita cada linha é trafegada 2 vezes pelo conjunto do transbordo e colhedora. Cada pneu na Figura 11, indicado pelo retângulo preto, representa um conjunto de 2 pneus, ou seja, em todas as entre linhas de plantio tem-se 2 passagens de 2 pneus de colhedora, 2 pneus do trator, 2 pneus do transbordo 1 e 2 pneus do transbordo 2, totalizando somente durante a colheita 16 passagens de pneus com carga que variam de 1,75 Mg a 5 Mg.eixo⁻¹ (BARBOSA, 2012).

Figura 11- Ilustração da área de tráfego no ciclo da cana de açúcar



Fonte: Braunbeck e Magalhães (2014).

Sendo a cana-de-açúcar atualmente uma cultura totalmente mecanizada, desde o plantio até a colheita, passando pelas fases intermediárias de tratos culturais e demais operações, prevê-se que mais de 30 operações ocorrem num mesmo talhão ao longo de cinco cortes. Sendo assim, é muito provável que o solo apresente compactação crescente ao longo das safras, principalmente se não houver cuidado quanto à condição

de umidade do solo no momento do tráfego de máquinas. A compactação pode limitar o crescimento das raízes, bem como reduzir a infiltração da água das chuvas, permitindo assim o aumento do processo erosivo. Quanto maior o volume de água infiltrado no solo, menor será o volume de enxurrada a ser escoado sobre a superfície. Portanto, o preparo do solo deve visar entre outras coisas, melhorar as condições de infiltração da água no solo e, como consequência, diminuir o escoamento da enxurrada (DE MARIA et al., 2016).

Um ponto relevante que deve ser considerado na análise, controle e efeitos da compactação para a cultura de cana-de-açúcar é que essa cultura semiperene é cultivada em ciclo de 4 a 5 anos, ou seja, o efeito da compactação tem impacto ainda maior, implicando prejuízos agronômicos e econômicos durante esse período, podendo acarretar queda significativa de produtividade e longevidade do canavial (LANÇAS, 2015).

3.5.1 Sistema de direção assistido

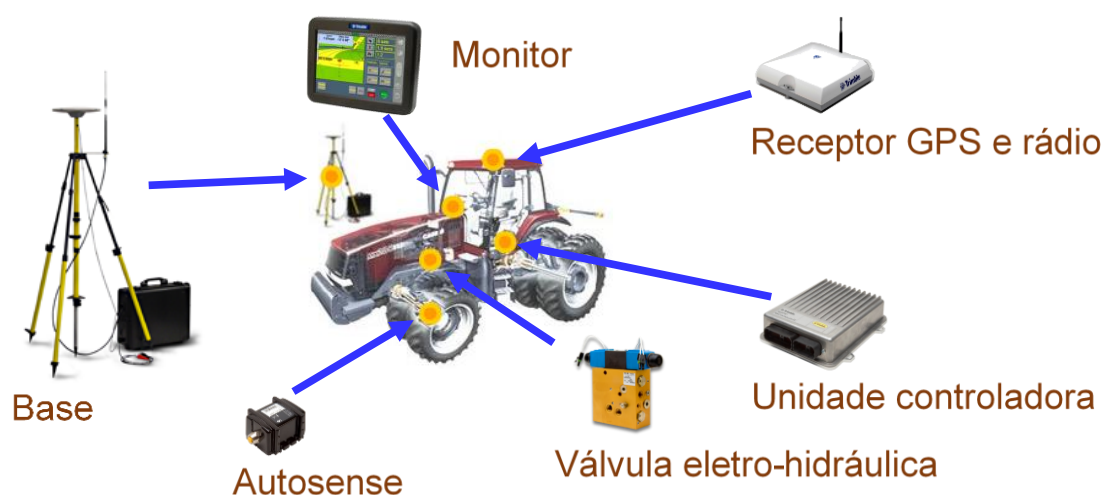
O posicionamento de alta precisão e repetibilidade dos sistemas de orientação por satélite tem sido a tecnologia que possibilita os sistemas de tráfego controlado (CHAMEN, 2011). De acordo com Souza (2012) uma técnica que tem ganhado destaque no setor sucroalcooleiro e pode ser utilizada em complemento ao controle de tráfego agrícola é o uso do sistema de direção assistido, popularmente conhecido como piloto automático. Esse equipamento é acoplado junto ao trator agrícola, onde o próprio sistema de direcionamento via satélite corrige a rota do veículo quando há necessidade, de tal forma que o deslocamento ocorra sempre paralelo a uma determinada linha de referência, permitindo um melhor aproveitamento do terreno, redução dos esforços do operador, aumentar a precisão da operação por meio de uniformização no espaçamento das linhas de cultivo e evita o tráfego dos rodados sobre a soqueira, o que prejudica a parte aérea com a quebra de colmos e o sistema radicular da cultura devido à compactação do solo (MOLIN e CARREIRA, 2006; SOUZA, 2012, SOUSA et al., 2017).

O sistema automático de direcionamento utiliza a tecnologia GNSS (Global Navigation Satellite Systems) que engloba satélites e receptores de sinais para determinação da localização geográfica (latitude, longitude e altitude) de um objeto. O sistema GNSS mais usado é GPS (Global Positioning System). Os dados de posicionamento obtidos por GNSS, são processados para comandar o esterçamento do rodado e assim manter o trator alinhado ao percurso estabelecido. Assim, os sistemas de

direção automática de tratores e demais veículos agrícolas consistem em um receptor GNSS, uma unidade processadora de dados, um sensor inercial para compensação da inclinação do trator e sinalização de mudanças bruscas no direcionamento, um sensor de ângulo de esterçamento no rodado esterçante e um atuador no sistema de direção. A atuação pode ser diretamente no esterçamento ou no volante (MASNELLLO e MOLIN, 2021; SOUZA, 2012).

As válvulas eletro-hidráulicas e os atuadores elétricos acoplados ao sistema de direção - Figura 12 -, são mais acurados e eficientes em comparação aos atuadores de volante ou diretamente na coluna da direção. Estes são sujeitos às folgas do conjunto e requerem maior tempo de resposta para as correções de direcionamento. No entanto, são mais baratos e podem ser acoplados a veículos que não foram projetados com sistema de direcionamento automático, sendo recomendados para operações que não exijam elevada exatidão (MASNELLLO e MOLIN, 2021).

Figura 12 - Representação esquemática de sistema de piloto automático



Fonte: Santiago & Cintra

Um piloto automático guiado por algum sistema GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) possui a função primordial de reduzir ao máximo falhas e sobreposições entre as passadas, não importando o horário do trabalho, seja durante o dia, seja à noite. O uso desse sistema torna-se imperativo quando se deseja realizar o controle de tráfego, colheita com piloto automático, ou sistematização planejada das linhas de plantio no talhão de cana-de-açúcar (BAIO et al., 2015).

O STC se beneficia da introdução de sistemas de auxílio à navegação e agricultura de precisão. Nos últimos anos, os auxílios à navegação, como sistemas de

direção automática, foram introduzidos para seguir os rastros com precisão e aumentar a eficiência do sistema (BOCHTIS et al., 2010).

Com a mecanização do plantio da cana-de-açúcar e dos cortes subsequentes, o uso de equipamentos de navegação por satélite tem auxiliado a preservação da linha de plantio contra a compactação gerada pelo tráfego. Os tratos culturais das soqueiras tendem a ser feitos no canteiro, assim como as adubações químicas, as aplicações da torta de filtro, calcário e gesso, mantendo as entrelinhas como um local para o tráfego de máquinas (DE MARIA et. al, 2016).

Atingir a sustentabilidade na atividade de produção da cana-de-açúcar envolve a obtenção de produtividades economicamente viáveis, o que necessariamente enquadra a longevidade da lavoura. O alinhamento adequado das fileiras de cana dilui os investimentos realizados no plantio, impactando no incremento dos rendimentos operacionais do plantio, nos tratos culturais e no corte e transbordo da matéria-prima produzida, implicando também a redução de custos, encorpando o conceito de sustentabilidade (MAZZA, 2015). O uso de piloto automático é uma alternativa viável, buscando o desenvolvimento sustentável do setor sucroalcooleiro, reduzindo a compactação e preservando a qualidade física do solo, bem como a identificação e a quantificação dos efeitos causados pelo manejo da cultura sobre o solo. Para Souza (2012) no cultivo de cana-de-açúcar, é fundamental o conhecimento destas ferramentas para implementação do manejo agrícola, o qual poderá contribuir na redução de custos no sistema de produção e ganhos de produtividade da cultura.

Os resultados obtidos por meio da aplicação de piloto automático são: aumento no tempo de trabalho da máquina por dia; velocidade operacional maior e constante; maior regularidade e uniformidade no espaçamento e; melhor qualidade de aplicação de insumos, evitando áreas com sobreposição e falhas. Os avanços tecnológicos relativos ao georreferenciamento das operações de sulcação para plantio e corte/transbordo permitem, com precisão, a manutenção da qualidade obtida no entorno da linha, com concentração da compactação na entrelinha (MAZZA, 2015).

3.6 Manejo conservacionista

Para o sucesso da implantação do STC, primeiramente deve-se pensar na exploração sustentável do solo. O solo é um dos componentes vitais do meio ambiente e constitui o substrato natural para o desenvolvimento das plantas.

A ciência da conservação do solo e da água preconiza um conjunto de medidas, objetivando a manutenção ou recuperação das condições físicas, químicas e biológicas do solo, estabelecendo critérios para o uso e manejo das terras, de forma a não comprometer sua capacidade produtiva. Estas medidas visam proteger o solo, prevenindo-o dos efeitos danosos da erosão aumentando a disponibilidade de água, de nutrientes e da atividade biológica do solo, criando condições adequadas ao desenvolvimento das plantas (CTC, 2004; STORINO et al., 2008)

O planejamento conservacionista implica a compreensão dos efeitos da implantação da cana-de-açúcar nas diferentes condições de solo, considerando impactos decorrentes do uso de produtos químicos, do tráfego de máquinas, da extensão de áreas, da erosão e de muitos outros fatores que dificultam a manutenção da produtividade sem degradação ambiental. Trata-se de um trabalho que envolve grande quantidade de conhecimento especializado, muitas vezes adquiridos com anos de prática e interesse profissional (STORINO et al., 2008)

A cana-de-açúcar é geralmente conhecida como uma atividade agrícola conservacionista, em que as perdas de solo são pequenas em comparação com outras culturas anuais, porém o impacto da erosão no cultivo da cana-de-açúcar ocorre principalmente devido à extensão das áreas cultivadas e ao fato de o preparo do solo e o plantio ocorrerem durante a estação de chuvas intensas (ROSSETTO et al., 2014). Segundo de Maria e Martins (2015) várias práticas podem ser adotadas visando-se a conservação do solo, sendo dívidas em:

- ➔ Práticas vegetativas - manutenção de palhada, rotação de cultura, plantio de adubos verdes.
- ➔ Práticas edáficas - cultivo de acordo com a capacidade de uso da terra ou zona de manejo agrícola.
- ➔ Práticas mecânicas - preparo do solo e plantio em nível, distribuição adequada dos carregadores, que devem ser elevados e dotados de estruturas para contenção de enxurradas, terraceamento, subsolagem.

O sistema de produção da cana-de-açúcar abrange o conjunto das atividades e das operações realizadas desde a sistematização inicial do terreno até a última colheita que antecede a reforma. Quando feitas adequadamente, essas atividades e operações resultam em produtividades elevadas, compatíveis com o retorno econômico, com impactos ambientais minimizados, garantindo a sustentabilidade da produção. A busca de novas opções na elaboração de projetos realizados com critérios conservacionistas tem

como objetivo alcançar maior eficiência nas operações mecanizadas, buscando sulcos de maior comprimento, menor número de manobras, menor pisoteio das linhas e dos terraços e menor matação de linhas. Essas mudanças são importantes no sistema de manejo totalmente mecanizado da cana-de-açúcar, não apenas na questão do custo das operações, mas também para maior produtividade e longevidade do canavial (DE MARIA et al., 2016).

Por ocasião da reforma ou expansão de canavial, uma série de decisões são tomadas para o planejamento da implantação da cultura. É um momento de máxima relevância, pois se alguma prática for feita de forma inadequada, a cultura terá que conviver com o problema ao longo dos ciclos agrícolas consecutivos (DE MARIA et al., 2016). Neste sentido, o formato geométrico dos talhões deve promover as melhores condições de operação possíveis, uma vez que há custos associados às operações mecanizadas oriundos do tempo improdutivo gasto nas manobras quando o equipamento agrícola atinge os limites do talhão (SPEKKEN et al., 2015; STORINO et al., 2008).

Com a adoção da mecanização da colheita aumentou-se o tráfego de equipamentos pesados e grandes e a decisão do comprimento médio dos talhões é baseada atualmente em função da autonomia de carga dos equipamentos de transbordo, autonomia de plantadoras automáticas, carretas distribuidoras de toletes e também de sistemas de irrigação (STORINO et al., 2008). A cana-de-açúcar usa equipamentos de largura estreita, o que requer manobras demoradas, adicionando custos significativos, principalmente em linhas curtas (SPEKKEN et al., 2015).

As diferentes conformações do terreno influem na qualidade do trabalho e na capacidade operacional de equipamentos utilizados na condução dos canaviais. Além da declividade, a concavidade e a ondulação dos terrenos devem ser consideradas e, seus efeitos negativos aumentam demasiadamente os custos de produção, além de reduzir perdas de colheita e impurezas minerais (STORINO et al., 2008). São exemplos de diferentes conformações do terreno: sulcos e depressões no terreno - Figura 13 -, decorrentes do processo erosivo, que ao concentrarem enxurrada, provocam transtornos ao livre tráfego de máquinas na lavoura, promovem focos de infestação de plantas daninhas e constituem manchas de menor fertilidade de solo.

Entenda-se como sistematização adequada o melhor preparo do solo, com uniformização da profundidade, e pelo menos um razoável nivelamento da superfície do terreno, ambas as ações possibilitando uma sulcação uniforme e perfeito paralelismo. Também é fundamental a adoção de linhas de plantio bastante alongadas e com o menor

número possível de matações¹, reduzindo as manobras, o que é conseguido com o aumento do espaço horizontal entre os terraços ou com a eliminação destes (BENEDINI e CONDE, 2008).

O planejamento adequado da sistematização evita ou minimiza significativamente o pisoteio das linhas da cultura pelo sistema de colheita e transbordo mecanizados. Assim, mantêm-se as características físicas obtidas com o preparo do solo (aeração, permeabilidade e, quando úmido, a friabilidade elevada), permitindo um desenvolvimento adequado das raízes em, pelo menos, 50% do volume do solo (entorno da linha da cultura), espaço não sujeito ao pisoteio das esteiras da colhedora e dos rodados dos transbordos, que devem localizar-se estritamente no centro das entrelinhas. O pisoteio da linha da cultura canavieira promove danos físicos irreversíveis, pois o cultivo mecânico sobre a mesma promoveria seu arranquio (MAZZA, 2015).

Figura 13 - Necessidade de sistematização do terreno devido a problemas de conservação de solo



Fonte: Brenco (2009)

Pode-se dizer que uma sistematização sustentável reúne interesses entre o operacional (incremento de rendimentos do plantio e do sistema de corte e carregamento nos transbordos com significativa redução de custos), aspectos agrônômicos (eliminação do pisoteio da linha com a obtenção de maiores produtividades e, conseqüentemente, maior longevidade) e ambiental (a boa infiltração da água nas fileiras da cultura – não compactada – e a massa de palha na superfície do solo garantem a conservação do solo e

¹ Confronto de sulcos dentro de um talhão.

da água), resultando em maior lucratividade quando a sistematização para o plantio e a colheita da cultura forem realizadas com inteligência no planejamento (MAZZA, 2015)

3.7 Preparo de solo

O preparo do solo tem como objetivo principal criar condições adequadas nos diversos aspectos dos sistemas físico, químico e biológico do solo, para o desenvolvimento e estabelecimento das plantas, assim como realizar a sistematização do terreno e um adequado controle de pragas e plantas daninhas (ROSSETTO et al., 2014; DE MARIA et al., 2016). Dessa forma, as condições para o crescimento do sistema radicular tornam-se favoráveis, resultando em plantas saudáveis e produtivas (DE MARIA et al., 2016). Contudo, o preparo excessivo do solo pode agravar os problemas de infiltração devido a uma maior porcentagem de agregados finos (CHAMEN, 2011).

Os sistemas de preparo e manejo do solo determinam as condições físicas para o crescimento das plantas e produtividade das culturas. Nas regiões tropicais, sistemas de preparo com mínima perturbação do solo e que propiciem a manutenção de resíduos na superfície são necessários para o controle da erosão, redução da degradação do solo e do meio ambiente. O controle da erosão é fundamental para o reduzir o processo de degradação do solo e práticas eficientes exigem a manutenção da cobertura do solo (TORMENA et al, 2002).

As operações de aração e gradeação do solo envolvem oxigenação, o que estimula o desenvolvimento de comunidades microbianas e de pequenos animais; essas comunidades degradam a matéria orgânica do solo. Esses organismos utilizam a matéria orgânica como fonte de C e de outros nutrientes, decompondo-a e, como parte de seu mecanismo respiratório, eliminando o CO₂ para a atmosfera, que contribui para o aumento do efeito estufa (ROSSETTO et al., 2014).

Para atingir os objetivos da agricultura sustentável, a forma como os trabalhos de preparo do solo é realizada é de extrema importância, pois as alterações físicas e mecânicas induzidas afetam os processos físicos, químicos e biológicos do solo. É por isso que o conceito de “agricultura conservacionista” (AC) foi desenvolvido, como parte dos sistemas de agricultura sustentável, que se baseia no uso de recursos naturais renováveis, especialmente solo, e na regeneração do solo; a perturbação mínima do solo (por meio de trabalhos de preparo do solo reduzidos e plantio direto), a fim de preservar a estrutura do solo, fauna e matéria orgânica (TENU et al., 2012).

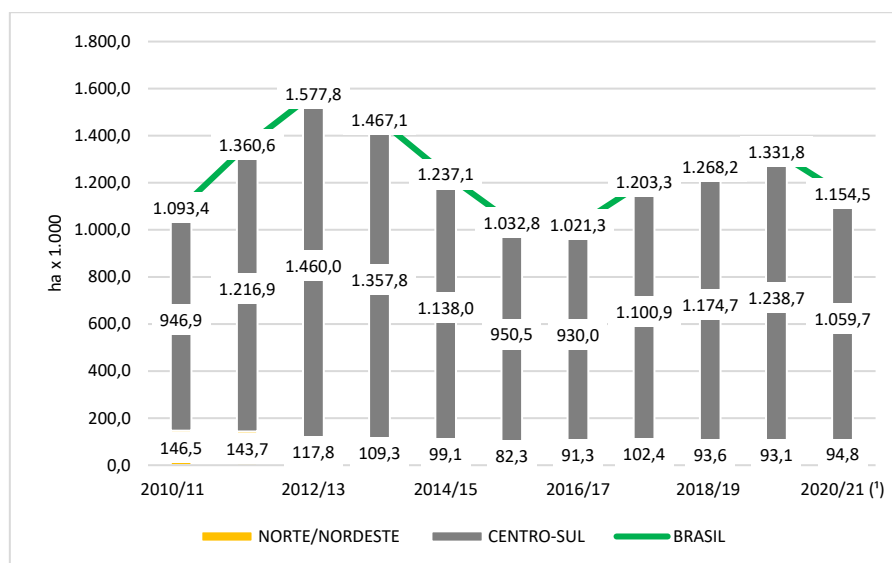
3.7.1 Preparo de solo na cultura de cana-de-açúcar

Considerando mecanização como um conjunto de atividades utilizando equipamentos agrícolas, que substitui ou auxilia o trabalho manual e animal, pode-se dizer que a mesma é necessária na maioria das fases do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com a finalidade de proporcionar condições competitivas e sustentáveis para o crescimento das plantas. erradicação de soqueira, condicionamento físico e químico do canteiro, controle da umidade do solo, plantio e aplicação de agroquímicos até a colheita e entrega da cana (BREUNBECK e MAGALHÃES, 2014).

Os sistemas de preparo de solos mais utilizados pelas usinas são executados através do uso de implementos como grade pesada, média e niveladora, subsoladores, arados de discos ou de aiveca, que mobilizam o solo, muitas vezes de maneira excessiva, para nivelar e controlar plantas daninhas. Este sistema de preparo de solo pode ser fator determinante no processo erosivo, pois quando todos os restos vegetais são enterrados através do preparo, as medidas de controle de erosão podem ser pouco eficazes (CTC, 2004).

Na cultura canavieira a compactação é praticamente inevitável, devido aos requisitos de mecanização intensiva e cultivo de longo prazo sem movimentação do solo. A manutenção do palhada no campo – função da colheita mecanizada - tornou a compactação drástica evitável, embora, mesmo neste caso, operações profundas de preparo do solo são frequentemente necessárias (ROSSETTO et al., 2014).

Segundo dados da CONAB (2020) o plantio de cana-de-açúcar na última década variou entre 1,02 a 1,57 milhões de hectares -Figura 14. Analisando os custos de produção de cana-de-açúcar o PECEGE (2020) aponta que o custo médio de formação de lavoura para amostra de 42 grupos econômicos, representando 80 unidades agroindustriais, distribuídas em 7 Estados do Centro-Sul brasileiro na safra 2019/2020 foi de R\$ 9.634/ha, sendo os custos de preparo de solo de R\$ 2.612 ha⁻¹. A associação destas informações nos permite estimar que o custo total de preparo de solo na safra 2019/2020 foi de aproximadamente R\$ 3,5 bilhões e o de formação de lavoura de R\$ 12,8 bilhões.

Figura 14 - Evolução do plantio de cana-de-açúcar no Brasil

Fonte: CONAB (2020)²

O preparo de solo para o plantio da cana-de-açúcar é realizado em intervalos de quatro a seis anos, ou até dez anos, dependendo de diversos fatores como tipo de solo, irrigação ou fertirrigação, condições climáticas e tipo de cultivo, ou técnicas de cultivo aplicadas nos anos anteriores. O preparo do solo pode seguir abordagens diferentes, muitas vezes inclui uma ou duas passagens pesadas da grade de disco para eliminar a soqueira anterior, ou pode ser feito quimicamente por pulverização de glifosato sobre a soca emergente. Devido ao intenso tráfego de máquinas durante o ciclo de colheita, são necessárias operações de subsolagem e também operação de gradagem ou aração adicional, seguida de operação de nivelamento de disco com o objetivo de reduzir o tamanho dos agregados do solo. Detectada a necessidade de aplicação de calcário para elevação de saturação de bases até 60%, esta deve ser feita, o mais uniformemente possível, no período entre o início do preparo do solo e antes da última gradagem (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2014).

A utilização constante do mesmo equipamento, como a grade pesada ou o arado de discos, trabalhando sempre numa mesma profundidade, provoca compactação logo abaixo da camada preparada. Uma das maneiras de reduzir a compactação é alternar anualmente a profundidade de preparo do solo. É importante também atentar para as condições de umidade do terreno por ocasião de seu preparo. O ponto de umidade ideal é aquele em que o trator opera com o mínimo esforço, produzindo os melhores resultados na execução do serviço. Com o solo muito úmido, aumentam os problemas de

² 2020/2021- projeção com base em agosto de 2020.

compactação. Há maior adesão da terra nos implementos, chegando a impedir a operação. Em solo muito seco, é preciso um número maior de passadas de grade para quebrar os torrões, exigindo maior consumo de combustível. Com isso, o custo de produção fica maior e o solo, pulverizado (CONDE, 2008).

O rompimento da camada compactada deve ser feito com implemento que alcance a profundidade imediatamente abaixo da zona compactada. Esta é a camada que normalmente permanece intacta com o preparo do solo. O afrouxamento desta camada é frequentemente considerado indesejável devido ao seu potencial de tornar o solo mais vulnerável a compactação. Em muitos casos, também seria antieconômico devido às altas forças e custos envolvidos (CHAMEN et al., 2015).

A partir da classificação ilustrada na Figura 15 são feitas as recomendações de preparo e manejo de solos para dois grandes grupos, o de solos argilosos e média 1 e o de arenosos e média 2. Enquadra-se neste segundo grupo os Argissolos por apresentarem perfil com mudança abrupta de areia e argila, com baixa taxa de infiltração ficando muito susceptível a erosão (CONDE, 2008).

Figura 15 – Susceptibilidade a erosão em Latossolos em função da textura do solo



Fonte: Conde (2008)

3.7.2 Definições de preparo de solo

Preparar o solo significa deixá-lo em condições de receber a muda, proporcionando uma boa germinação da cana-de-açúcar. O preparo do solo consiste em revolvê-lo em operações agrícolas dentro de uma sequência na qual uma complete a outra. É importante usar corretamente as técnicas de preparo do terreno, para evitar a progressiva degradação física, química e biológica do solo. Atualmente, deve ser visto

também como um sistema que deverá aumentar a infiltração de água, de modo a reduzir a enxurrada e a erosão a um mínimo tolerável. Basicamente ele é realizado em duas etapas, que são o preparo primário e o secundário (DE MARIA et al., 2016; DE OLIVEIRA, 2017; GONÇALVES, 2006; MARTINS FILHO et al., 2015).

O preparo primário consiste em uma operação mais grosseira, realizada com arados ou grades pesadas, que visa a incorporação de corretivos, fertilizantes, resíduos vegetais e plantas daninhas ou para descompactação. Na incorporação de insumos ou material vegetal, os equipamentos de discos são mais eficientes, pois os misturam melhor ao solo, porém têm a desvantagem de causar maior compactação do que o arado de aivecas ou o escarificador. O arado de aivecas é eficiente na descompactação e incorporação de resíduos vegetais; por outro lado, tem baixa eficiência na mistura de insumos e deixa o solo desprovido de cobertura morta. O arado escarificador faz a descompactação do solo, ao mesmo tempo em que mantém maior taxa de cobertura morta sobre o solo; por outro lado, tem baixa eficiência no controle de plantas daninhas e na incorporação e mistura de insumos ao solo. Na segunda etapa, preparo secundário, faz-se a operação de nivelamento da camada arada de solo, com gradagens de nivelamento do terreno. Como um dos objetivos do preparo do solo é também o controle de plantas invasoras, faz-se a última gradagem niveladora imediatamente antes do plantio.

Quando se substitui o trabalho de grades por dessecação química e em seguida procede-se a sulcação para plantio denomina-se plantio direto. Na atual cultura de cana-de-açúcar é uma prática bastante limitada em vista da grande probabilidade do solo estar compactado e/ou existir pragas de solos, que são entraves para plantio direto de cana e ainda a necessidade de nivelar a superfície da área. A dessecação precedida de subsolagem e sulcação é denominada preparo reduzido, e caso tenha erradicação com o eliminador mecânico de soqueiras denomina-se preparo semi-reduzido (DE MARIA et al., 2016).

Em relação aos sistemas de preparo do solo há necessidade de se levar em consideração a época de plantio da cana-de-açúcar, as culturas em rotação, como soja, amendoim, crotalárias, milheto, braquiária ou a própria soqueira da cana, e as operações mecânicas e químicas envolvidas (DE MARIA et al., 2016).

3.7.2.1 Preparo de solo convencional

Segundo Martins Filho et al. (2015) o preparo de solo convencional é o mais utilizado no setor produtivo de cana-de-açúcar, o qual envolve a utilização de operações sucessivas com grades pesadas, arados, subsoladores e grades niveladoras para a sistematização do terreno e distribuição de corretivos. Para de Maria et al. (2016) o sistema de preparo convencional - SPC - implica em grande número de operações, sendo iniciado pela dessecação da soqueira e posterior revolvimento do solo usando operações de aração, subsolagem, gradagem, mobilizando o solo em área total com o objetivo de eliminar ou atenuar problemas físicos, químicos e/ou biológicos. No preparo convencional, ao menos 80% da superfície é mobilizada por máquinas de preparo de solo e as bordas, locais onde a máquina realiza a manobra, tendem a sofrer maior adensamento devido às inúmeras passagens dos rodados no mesmo local (DE OLIVEIRA, 2017).

3.7.2.2 Preparo reduzido do solo ou cultivo mínimo

Martins Filho et al. (2015), citando Gonçalves, afirma que o sistema de preparo reduzido é caracterizado pela diminuição do revolvimento do solo e é composto pelas seguintes operações: sistematização de terreno; distribuição de corretivos na superfície; subsolagem e; destruição química de restos da cultura e plantas daninhas. Este método de preparo de solo tornou-se possível no cultivo de cana-de-açúcar, com o desenvolvimento e o uso de herbicidas sistêmicos, não seletivos, de absorção foliar e não residuais, que permitem eliminar plantas daninhas e a soqueira antiga.

3.7.2.3 Preparo de solo direcionado ou localizado

O termo “Canteirização” para cana-de-açúcar - Figura 16 -, tem por conceito agrônomo manter um canteiro sem impacto de tráfego e conseqüentemente, sem compactação, mantendo as características físicas do solo para que a cultura possa utilizar a maior quantidade de nutrientes possível, através de melhor enraizamento e infiltração de água (LANÇAS, 2015). A canteirização é consequência direta do STC.

Figura 16 - Representação esquemática do conceito de Canteirização



Fonte: adaptado de Melo e Rosa (2016).

Embora seja altamente desejado que as operações agrícolas promovam o mínimo movimento do solo, sabe-se que o preparo a profundidades entre 400 a 500 mm, pode ser muito vantajoso para a cultura de cana-de-açúcar, sendo considerado como uma opção de canteirização do canavial. Neste caso, o cultivo mínimo é realizado através do preparo de solo em canteiro, ou seja, passando a ser cultivado em faixas. Essa técnica consiste em preparar, corrigir e adubar o terreno somente nas linhas onde serão implantados os canaviais, mantendo as entrelinhas sem reforma, como um local para tráfego de máquinas, visando a não permitir a compactação na linha de cana-de-açúcar causada pela pressão exercida pelos rodados das colhedoras, de operações de tratos culturais e até mesmo pela presença dos trabalhadores de campo (ROSSETTO et al., 2014; LANÇAS, 2015).

Segundo de Maria et al. (2016) o preparo do solo direcionado ou localizado consiste em práticas que permitem realizar o preparo localizado na linha de plantio, ou seja, o preparo do solo em, praticamente, metade da área. Entre essas práticas tem-se o sistema de preparo com hastes subsoladoras para preparo do solo de até 0,50, com incorporação de corretivos e gesso, assim como de restos vegetais e de torta de filtro, numa única operação. Neste sistema é feita a dessecação química da soqueira e o controle de plantas daninhas em área total. O preparo do solo localizado pode ser realizado nos espaçamentos convencionais de 1,50 m ou de sulco duplo (0,90 m x 1,40 m). O uso de navegação por satélite é de fundamental importância para a execução dessa prática. Para melhorar o aprofundamento das raízes a aplicação de fósforo durante a operação de preparo localizado. A correção por cálcio, magnésio e enxofre também é mais acelerada

pela redução de densidade do solo, e desta forma ocorre arraste físico destes materiais durante a ocorrência de chuvas.

Outra vantagem tem sido a maior taxa de infiltração de água no solo, evitando escoamento de enxurrada durante precipitações pluviométricas. O preparo localizado permite ainda, melhor desenvolvimento do sistema radicular, resultando em menor suscetibilidade à falta de água em veranicos ou em estiagens fora de época (LANÇAS, 2015). Em estudo realizado por Carr et al. (2008) comparando o sistema convencional de preparo de solo e o sistema de preparo localizado associado ao tráfego controlado, concluíram que:

- ➔ este sistema de manejo tem possibilitado a substituição de fertilizantes como ureia e cloreto de potássio por nitrato de cálcio, nitrato de amônio, sulfato de amônio e sulfato de potássio, acreditando que estes últimos são menos prejudiciais ao solo. A Tabela 1 mostra as doses de nutrientes usadas no sistema tradicional e no sistema de preparo localizado associado a tráfego controlado;
- ➔ a produtividade da cana, que de 1997 a 2001 nunca ultrapassou 70 Mg ha⁻¹ no sistema convencional, a partir da adoção do conceito de cultivo mínimo foi superior a 80 Mg ha⁻¹, mesmo com doses reduzidas de nutrientes.

Tabela 1- Estratégias de manejo de nutrientes em nos sistemas de preparo convencional e localizado com parcelas na Austrália

Elemento	Cana planta		Soqueira	
	Convencional	Localizado	Convencional	Localizado
	kg ha ⁻¹			
Nitrogênio	105	42	171	94
Fósforo	30	-	-	-
Potássio	56	36	77	80
Enxofre	18	22	-	48

Fonte: Carr et al. (2008)

Rossetto et al (2014) apontam como principais vantagens ao preparo localizado são menos uso de máquina, redução dos custos operacionais de preparação do solo, manutenção de palha na superfície, diminuição ou eliminação de terraços sem ocasionar problemas de erosão, aumento da conservação do solo, diminuição da compactação do solo, aumento de produtividade operacional, possibilidade de plantio durante as estações chuvosas, aumento da produtividade da soca e longevidade; no médio e longo prazos, melhoria das condições físicas dos solos e aumento do teor de matéria orgânica e fertilidade do solo.

Segundo Ferreira e Ferreira (2015) a adoção de práticas voltadas a canteirização e tráfego controlado objetivando a redução de compactação somente em áreas controladas destinadas ao tráfego, permite que a cultura de cana-de-açúcar possa manter sua produtividade em patamares mais elevados e a longevidade do canavial acima da média de 5 anos. Os benefícios observados foram maior enraizamento, melhor infiltração de água nas áreas não compactadas, melhor absorção e aproveitamento de nutrientes pelas plantas. De acordo com Martins Filho et al. (2015) é possível inferir que os sistemas de preparo de solo reduzido e localizado, utilizados na época de renovação de canaviais, em áreas com colheita mecanizada de cana-de-açúcar, que permita a manutenção da palhada sobre a superfície do solo, reduzem significativamente as perdas de matéria-orgânica e nutrientes no sedimento erodido. Mazaron (2019) avaliando efeitos de efeitos do preparo do solo localizado na linha de plantio são equivalentes aos do preparo do solo em área total, no decorrer do tempo, possibilitando as mesmas condições físicas, promovendo, pois, produtividades semelhantes de cana-de-açúcar.

Após sua implantação, o preparo de solo direcionado terá como vantagem nas futuras renovações de canaviais a possibilidade da prática de plantio direto, caso não precise realizar mudanças no sentido da sulcação e que a colheita tenha sido feita com bom controle de tráfego.

3.7.3 Operações agrícolas de preparo de solo para cultura de cana-de-açúcar

3.7.3.1 Dessecação

Apesar de não ser uma operação onde há interação de elementos mecânico atuando diretamente no solo, a dessecação é uma boa estratégia para redução de custos no processo de preparo de solo. Segundo Oliveira e Karam (2011) a técnica de dessecação consiste na aplicação de herbicida não seletivo (dessecante), podendo ser utilizada de três maneiras em função do objetivo de uso. Primeiramente, a dessecação pós-colheita objetiva a eliminação das plantas daninhas da área na entressafra, visando à redução na produção de sementes, consequentemente, do banco de sementes. Outro objetivo seria a dessecação da cobertura vegetal a fim de produzir palha para o cultivo da cultura subsequente em sistema de plantio direto. Finalmente, a aplicação do dessecante sobre a cultura na fase de pré-colheita tem a finalidade de controlar as plantas daninhas emergidas no final do ciclo e provocar a desfolha da cultura, permitindo a antecipação da colheita.

No caso da cana-de-açúcar, essa técnica é conhecida como desinfestação do canavial. Assim, quando a cultura precisar ser renovada faz-se aplicação do herbicida glifosato sobre a lavoura de cana, algumas vezes em conjunto com produtos residuais. Ocorrerá erradicação da soqueira e controle das plantas daninhas por cerca de 60 dias.

3.7.3.2 Eliminação mecânica de soqueira

A operação de erradicação de soqueiras feita pelo eliminador mecânico revolve minimamente o solo e mantém sobre a superfície os restos da cultura, sendo assim considerada conservacionista, ajudando a reduzir riscos de erosão na área. Esta operação possibilita maior controle de pragas e erradicação eficiente de soqueira, alternativa para efetuar reforma e plantio de cana de inverno. Áreas que terão plantio de viveiros terão pureza varietal devido a eficiente eliminação do canavial anterior, não ficando soqueiras remanescentes que causam misturas varietais.

O implemento possui 2 discos de corte que atuam sobre a linha da soqueira; na sequência, duas relhas (levantadores com guias) arrancam as soqueiras levantando-as, as quais são apanhadas por um conjunto de facas montadas num sistema rotativo espiralado acionado pela TDP (tomada de potência) do trator através de cardam com redutor, onde são batidas e totalmente destruídas ficando em pequenos fragmentos que são atirados para trás ficando sobre o solo. A operação é eficiente no controle da praga denominada *Sphenophorus levis*, pois expõe as larvas da praga à luz solar que faz o seu controle, além do controle mecânico pela ação das facas do implemento e do controle por partes das aves que se alimentam das larvas expostas sobre o solo logo após a passagem do implemento

Após este implemento recomenda-se a passagem de uma grade intermediária para nivelar a superfície do solo e para que a subsolagem tenha melhor condição de operação. Quando utilizado o canteirizador, não se faz necessária a utilização da grade intermediária.

3.7.3.3 Gradagem

A gradagem pesada destina-se ao revolvimento em profundidades que podem ser superiores a 0,20 m em condições favoráveis. Apesar das profundidades atingidas serem inferiores às da aração, as grades pesadas têm maior poder de picagem dos restos

de cultura e pastagens, sendo muito utilizada na eliminação de soqueiras (ANDRÉ, 2009; STORINO et al., 2008).

As partes ativas desses equipamentos agrícolas são discos esféricos. No processo de preparo do solo, o disco é deslocado para frente, acompanhando a movimentação do equipamento; ao mesmo tempo, o disco está girando, devido ao contato com o solo. Sobre o efeito do peso, o disco penetra no solo e corta uma camada de solo, que é levantada sobre a superfície côncava interna do disco, é desintegrada, deslocada lateralmente e parcialmente tombada. A agressividade dos discos depende da sua forma, bem como do ângulo de corte (ângulo do disco), que pode ser ajustado entre 15 e 30 graus; a desintegração aumenta quando o ângulo de corte aumenta (TENU et al., 2012).

Ao realizar a operação, a ponta do disco corta alguns dos elementos estruturais do solo, sendo que quando os discos são recortados o número de elementos estruturais cortados é maior. A medida que a operação se desenvolve, a movimentação da camada de solo, vertical e horizontalmente, sua torção, bem como o atrito entre o solo e o disco, causam a destruição de alguns elementos estruturais, por deformação, rompimento, fragmentação. A proporção de elementos estruturais danificados aumenta com a velocidade (TENU et al., 2012).

As grades denominadas médias ou intermediárias são utilizadas para quebrar os torrões formados na ocasião da aração ou da gradagem pesada. Sua função, portanto, é complementar o preparo do solo em desagregar os torrões diminuindo os vazios entre eles, nivelar a superfície do solo para uma sulcação perfeita, destruir e incorporar remanescentes vegetais e destruir os sistemas de vasos capilares que se formam na camada superior do solo, reduzindo a evaporação de água das camadas mais profundas (ANDRÉ, 2009; STORINO et al., 2008).

A gradagem niveladora utiliza grades leves em velocidades altas o suficiente para espalhar a terra pulverizada, promovendo o nivelamento do solo (STORINO et al., 2008).

3.7.3.4 Subsolagem

Os subsoladores - Figura 17 - são implementos de trabalho em grande profundidade, cujo sistema de acoplamento das hastes permite a regulagem da distância entre elas, em função da profundidade em que está a camada a ser descompactada. A operação de subsolagem é realizada em solo praticamente seco, caso haja umidade, as

hastes do implemento, cortam o solo ao invés de estourá-lo. É uma das operações da prática mais conservacionista de preparo mínimo do solo. Por não inverter, nem revolver intensamente o solo, os resultados de incorporação de corretivos na subsolagem são inferiores ao da aração, porém proporciona maior infiltração de água no solo quando comparado com a operação de gradagem com aivecas (DA SILVA et al., 2015; STORINO et al., 2008).

Segundo Santos Filho e Garcia dos Santos (2001) a operação de subsolagem é utilizada quando:

- a) Há necessidade de romper camadas compactadas em profundidade devido ao tráfego repetido de máquinas, trabalhando a uma mesma profundidade, ou pela compactação devido ao tráfego de tratores.
- b) Há necessidade de melhor circulação de água necessário em terrenos que tendem a acumular água.

Figura 17 – Subsolador de 5 hastes utilizado para descompactação



Fonte: CTC (2004)

3.7.3.5 Canteirização

O canterizador, de maneira simplificada, trata-se de um implemento contendo um conjunto de hastes de subsoladores³ associado a enxada rotativa. Este implemento pode ter como acessórios depósito de sólidos - aplicação simultânea de corretivos ou fertilizantes – e depósito de calda – elaboração de barreira química para controle de pragas de solo Figura 18.

³ Para espaçamento duplo alternado (0,90 x 1,40 m), o implemento conta com uma haste. Para o espaçamento de 1,40 ou 1,50 m, o implemento conta com 2 hastes.

Figura 18 - Implemento canterizador para espaçamento 1,50 m entre linhas de cana-de-açúcar acoplado a um trator. 1 - Depósito para 2.000 kg de corretivos; 2 - Segas circulares; 3 - Haste subsoladora com duto para saída de corretivos; 4 – rodas para controle de profundidade para enxada rotativa; 5 – ancinho para colocar palha na direção da rotativa.



Durante a operação as enxadas rotativas, devido ao movimento de avanço do equipamento e ao movimento de rotação do rotor, as partes ativas penetram no solo e cortam fatias com uma forma particular. Sob a ação da força centrífuga, as fatias de solo são jogadas sobre a superfície interna da carcaça do implemento. Como resultado, consegue-se uma desagregação suplementar após a ação da enxada rotativa (TENU et al., 2012).

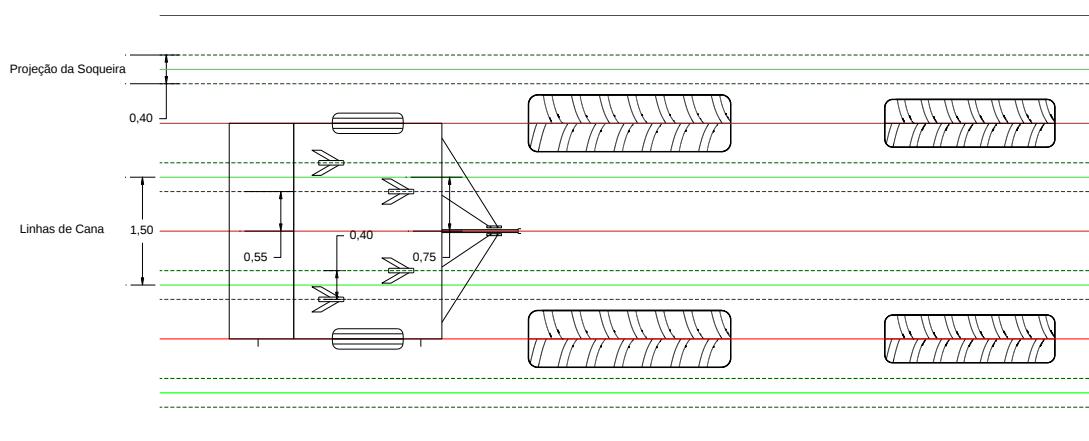
Uma alternativa à utilização do canterizador é a modificação de subsoladores de 5 hastes para 4 hastes, conforme Figura 19, sendo a principal diferença a não utilização de enxada rotativa neste implemento. Assim como o canterizador, é imprescindível a utilização de sistema de piloto automático. A esta operação tem-se associado ao nome de subsolagem em faixas ou localizada (DE MARIA et al., 2016; MAZARON, 2019).

Figura 19 – Subsolador para preparo localizado de 4 hastes



Para obter-se os canteiros adequados, é importante que as hastes -Figura 20 - estejam distribuídas da seguinte forma: hastes internas espaçadas a 550 mm do centro do implemento e 1.100 mm entre si; hastes externas espaçadas a 950 mm do centro do implemento e 1.900 mm entre si e; as sapatas dos subsoladores deveram ter de 300 mm a 400 mm.

Figura 20 – Disposição geométrica de subsolador de 4 hastes para preparo localizado



Nesta configuração os canteiros serão obtidos de modo a preservar entre as fileiras 700 mm, destinados ao tráfego e 800 mm para o desenvolvimento do sistema radicular.

As vantagens desta operação frente ao subsolador convencional estão em menor mobilização do solo -53% da área -, menor consumo de combustível em função de redução de uma haste -40 a 50 cv a menos de potência requerida. A velocidade

operacional recomendada é de 5,0 km h⁻¹, resultando em Capacidade operacional efetiva de 1,5 ha h⁻¹. Como desvantagens, pode haver necessidade de utilização de gradagem pesada ou erradicação mecânica de soqueira em situações onde o intervalo de tempo entre preparo e plantio não permita a dessecação. Em áreas onde há pragas de solos e faz-se necessário a eliminação mecânica da soqueira, não há necessidade de gradagem.

3.7.4 Recomendações de preparo em função da textura

O Centro de Tecnologia Canavieira – CTC – recomenda as informações contidas na Tabela 2 e Tabela 3 como referência para manejo e operações de solos agrícolas em função da textura do solo.

Tabela 2 - Recomendações de manejo sustentável para cultura de cana-de-açúcar em função da textura do solo

	Argilosos	Textura do solo		Arenosa
		Média 1	Média 2	
Época de plantio	Todo o ano	Evitar novembro a janeiro	Evitar novembro a janeiro	Não fazer no período de novembro a março
Cobertura vegetal	Opcional	Cana, crotalaria	Usar cobertura vegetal – plantio em outubro	Obrigatória – plantio em setembro – cana viva/dessecada
Sentido da sulcação	Permite sulcação “reta” em declives acentuados	Reta em relevo suave	Reta em relevo suave – outono/inverno	Obrigatória em nível
Terraceamento	DV maior dependendo da época / declive / tipo preparo	DV de 6m – pode ser maior em preparo reduzido	DV de 6 m	Não pode ficar sem terraços – mesmo em plantio de inverno Terraceamento com DV de 6m – terraceamento com DV 3m novembro a março
Tipo de preparo	Pode ser convencional – plantio direto ou reduzido é mais seguro	Reduzido	Reduzido	Reduzido - obrigatório

Fonte: adaptado de Conde (2008)

Tabela 3 – Operações de preparo de solo em função da classe textural

Tipo de preparo	Grupo Textural I - Argilosos e Média 1		Grupo Textural II - Arenosos e Média 2	
	Operação	Repetições	Operação	Repetições
Convencional	Dessecação da soqueira	1	Dessecação da soqueira	1
	Grade pesada	1	Grade pesada	1
	Grade intermediária	2	Grade intermediária	2

Tipo de preparo	Grupo Textural I - Argilosos e Média 1		Grupo Textural II - Arenosos e Média 2	
	Operação	Repetições	Operação	Repetições
Semi-reduzido	Aplicação de calcário	1	Aplicação de calcário	1
	Aplicação gesso	1	Aplicação gesso	1
	Subsolagem	1	Subsolagem	1
	Fosfatagem	1	Fosfatagem	1
	Grade niveladora	1	Plantio de torta e/ou composto**	1
			Plantio de cobertura vegetal (plantio direto da cana sobre a cobertura)	1
			Grade niveladora	1
	Eliminador mecânico de soqueira	1	Eliminador mecânico de soqueira	1
	Grade intermediária	1	Grade intermediária	1
	Aplicação de calcário	1	Aplicação de calcário	1
	Aplicação gesso	1	Aplicação gesso	1
	Subsolagem	1	Subsolagem	1
	Fosfatagem	1	Fosfatagem	1
			Plantio de torta e/ou composto**	1
Reduzido	Dessecação da soqueira	1	Dessecação da soqueira	1
	Aplicação de calcário e gesso	1	Aplicação de calcário e gesso	1
	Subsolagem	1	Subsolagem	1
	Fosfatagem	1	Fosfatagem	1
			Plantio de cobertura vegetal	1
			Plantio de torta e/ou composto**	1

** Plantio de torta e/ou composto é a aplicação através de equipamentos que sulcam, colocam estes resíduos e cobrem com terra. No período programado para plantio da cana o plantio é feito nas mesmas linhas que receberam estes adubos orgânicos. Esta prática é mais recomendada para os solos de menor fertilidade.

Fonte: adaptado de Conde (2008)

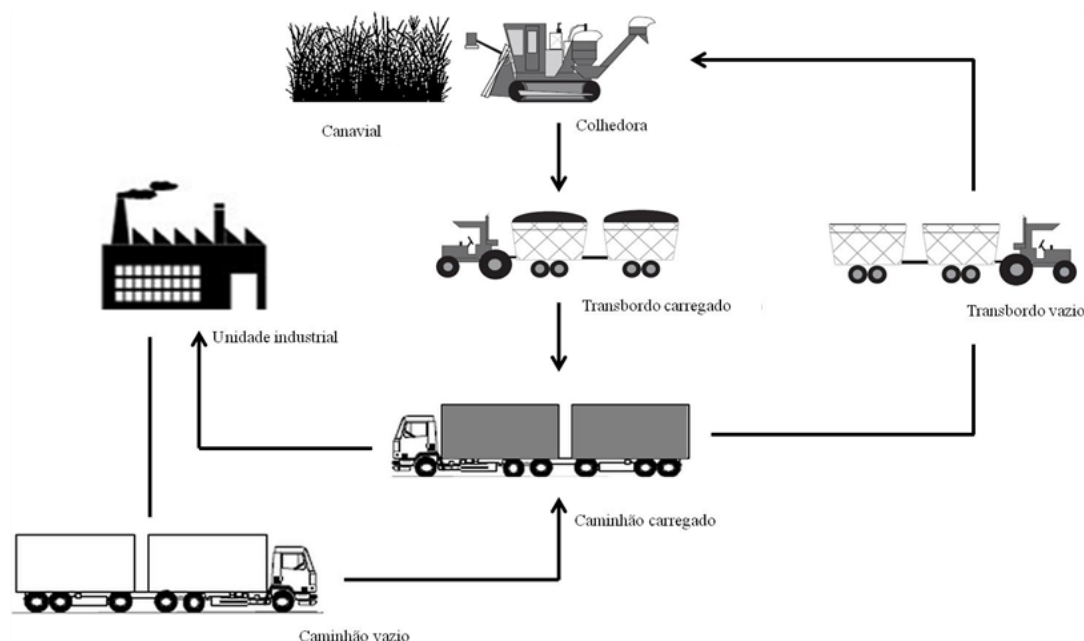
3.8 Sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar

A colheita é a última operação do ciclo da cultura e deve ser levado em consideração alguns aspectos inerentes à operação. Ocorre quando a cana-de-açúcar atinge o final do seu período de crescimento e inicia a maturação, alcançando o máximo de produtividade e acúmulo de açúcar total recuperável - ATR. Este processo foi o que mais sofreu mudanças devido às novas exigências socioambientais e à necessidade de redução de custos. O tipo de colheita da cana-de-açúcar pode influenciar a produção e longevidade da cultura, os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, o meio ambiente e a saúde pública. A colheita mecanizada é praticamente toda realizada sem

queima prévia, sendo as folhas, bainhas, ponteiros, além de quantidade variável de pedaços de colmo cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal denominada palha ou palhada, o transporte da cana-de-açúcar picada em pequenos toletes é realizado por carretas apropriadas para essa tarefa - Figura 21 (CONAB, 2020).

Para Braunbeck e Magalhães (2014) a mecanização é particularmente importante nas operações de colheita e transporte do campo para a indústria, devido à grande quantidade de biomassa que precisa ser manuseada.

Figura 21 - Esquema de um sistema de colheita, destacando-se os subsistemas de colheita, transbordo e transporte



Fonte: Milan e Rosa (2015).

As colhedoras são projetadas principalmente para colheita de uma única linha e passam duas vezes em cada entrelinha. A cana colhida é transportada para fora do campo por vagões puxados por tratores onde a capacidade de tração depende do próprio peso do trator e não da carga transportada. O trator agrícola e as colhedoras de cana-de-açúcar definem ou influenciam o espaçamento entre linhas, o layout geométrico da área, o padrão de tráfego no campo, bem como o tamanho e o design da maioria dos implementos (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2014).

O sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar, traz preocupação quanto a compactação do solo que ocorre em função da utilização de máquinas e implementos pesados ao longo das sucessivas operações agrícolas durante o ciclo de crescimento da cultura. Com a tecnologia disponível, há, invariavelmente, a compactação

das entrelinhas do canavial em aproximadamente 60% da superfície do solo, afetando a exploração do sistema radicular pelos recursos do solo, influenciando o desenvolvimento e a produtividade da cana-de-açúcar (MAGALHÃES et al., 2012). Os efeitos são ainda mais adversos se não houver ajuste nas bitolas das máquinas (distância entre eixos das máquinas igual ou múltiplo do espaçamento de plantio da lavoura) e controle de tráfego com uso de GPS e piloto automático (ROSSI NETO, 2015).

A Figura 22 e a Tabela 4, evidenciam o exposto por Rossi Neto (2015) e Magalhães et al. (2012), onde pode-se observar que há distância de 550 mm entre centro de rodado da colhedora e centro da linha de cana. Descontando a largura da soqueira (200 mm a partir do centro da linha até o limite externo de projeção do perfilho) e da sapata da colhedora (203 mm a partir do limite externo até o centro da sapata), há um pequeno espaço de 147 mm onde não há interferência máquina e material biológico. Duas considerações são dignas de nota: Altas massas dos equipamentos: colhedora 18.500 kg, o trator 13.000 kg, o conjunto de implementos 13.800 kg com capacidade de carga de 20.000 a 23.000 kg; A cana-de-açúcar pode ter acamamento ou tombamento dificultando a identificação da linha no momento de colheita.

Figura 22- Representação esquemática de colheita mecanizada de cana-de-açúcar em espaçamento entre linhas de 1,50 m

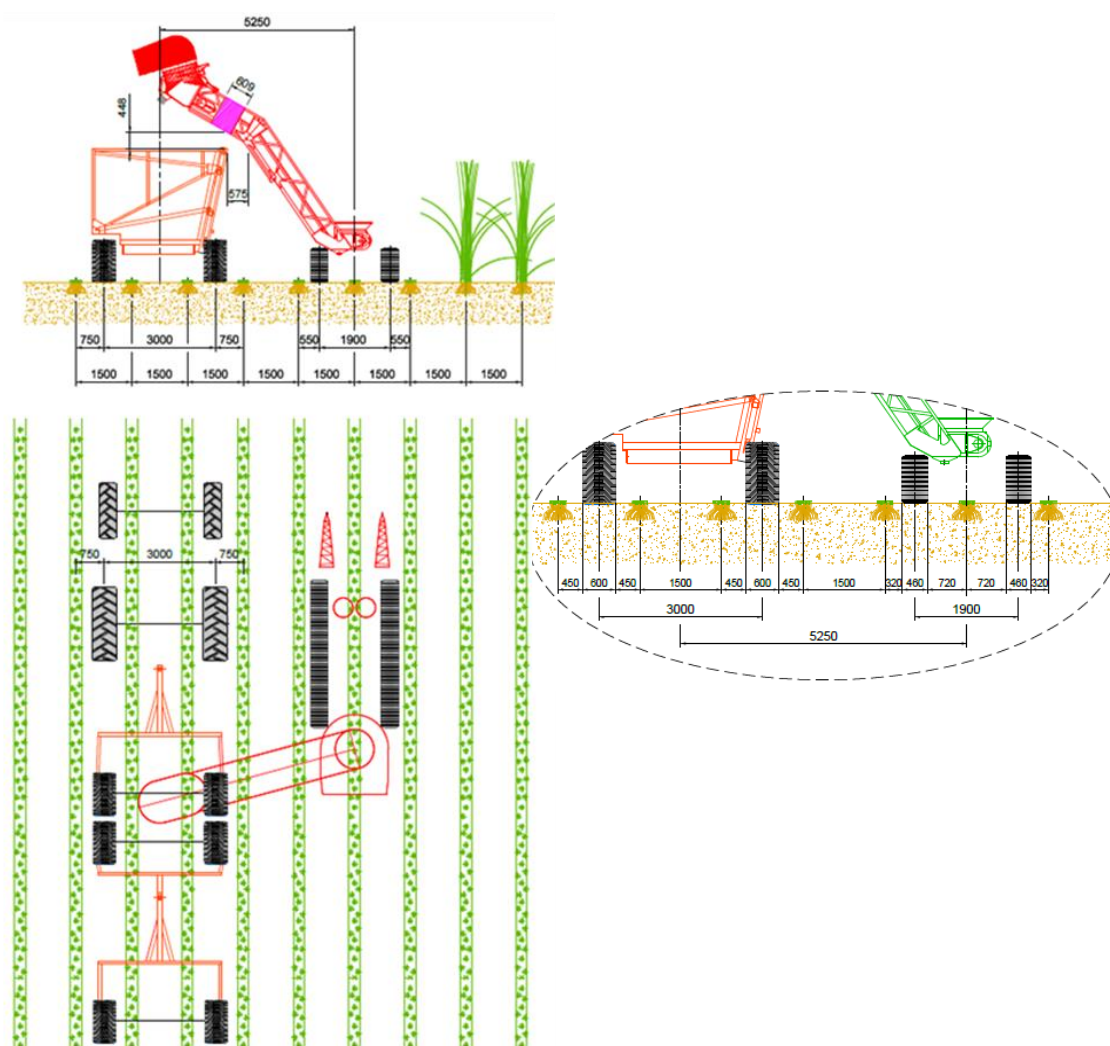


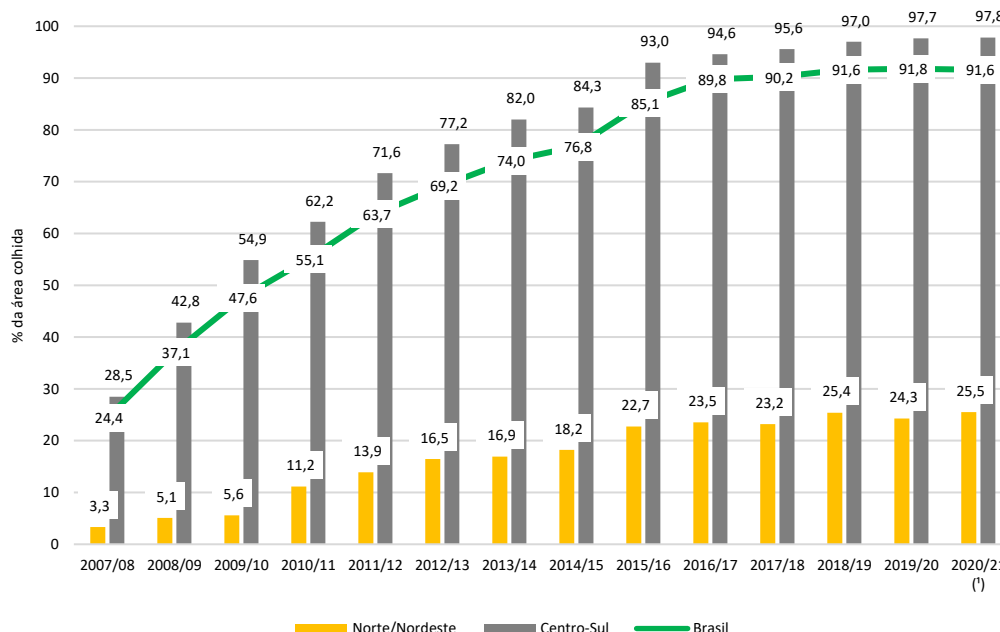
Tabela 4 – Características das principais colhedoras de cana-de-açúcar

Características	John Deere		CaseIH	
	CH570	CH670	A8810	A8810 Duplo alternado
Nº de fileiras que colhe	1	2	1	2
Potência (cv /kW)	342/255	342/283	358/267	358/267
Tanque combustível (l)	605	605	620	620
Óleo hidráulico (l)	405	405	480	480
Rolos transportadores/alimentadores	5 fixos inferiores	5 fixos inferiores	5 fixos inferiores	5 fixos inferiores
	5 flutuantes superiores	5 flutuantes superiores	5 flutuantes superiores	5 flutuantes superiores
	2 rolos com 8 facões	2 rolos com 8 facões	2 rolos com 8 facões	2 rolos com 8 facões
	lâminas 95 mm	lâminas 95 mm	lâminas 65 mm	lâminas 65 mm
Picador	4 hélices	4 hélices	4 hélices	4 hélices

Características	John Deere		CaseIH	
	CH570	CH670	A8810	A8810 Duplo alternado
Extrator secundário	3 hélices	3 hélices	3 hélices	3 hélices
Peso (kg)	19.050	19.300	18.500	19.000
Rodado	Esteira	Esteira	Esteira	Esteira
Nº de exaustores	2	2	2	2
Distância entre eixos (m)	2,97	2,97	2,96	2,96
Largura da esteira - sapata (mm)	457	457	406	406
Diâmetro dos discos de corte de base (m)	0,56	0,81	0,57	0,86
Distância entre eixos dos discos de corte base (m)	0,62	0,91	0,63	0,92
Altura (m)	6,23	6,23	6,3	6,3
Comprimento (m)	15,14	15,48	15,84	15,99

No Brasil, o sistema de colheita mecanizada tem avançado muito nos últimos anos -Figura 23. O percentual que era 37,1% na safra 2008/9, na atual safra está estimado em 91,6%. A região Centro-Sul, beneficiada por relevo que favorece a mecanização, já chega a 97,8% da colheita com o uso de máquinas (CONAB, 2020).

Figura 23 – Evolução da colheita mecanizada na cultura de cana-de-açúcar no Brasil



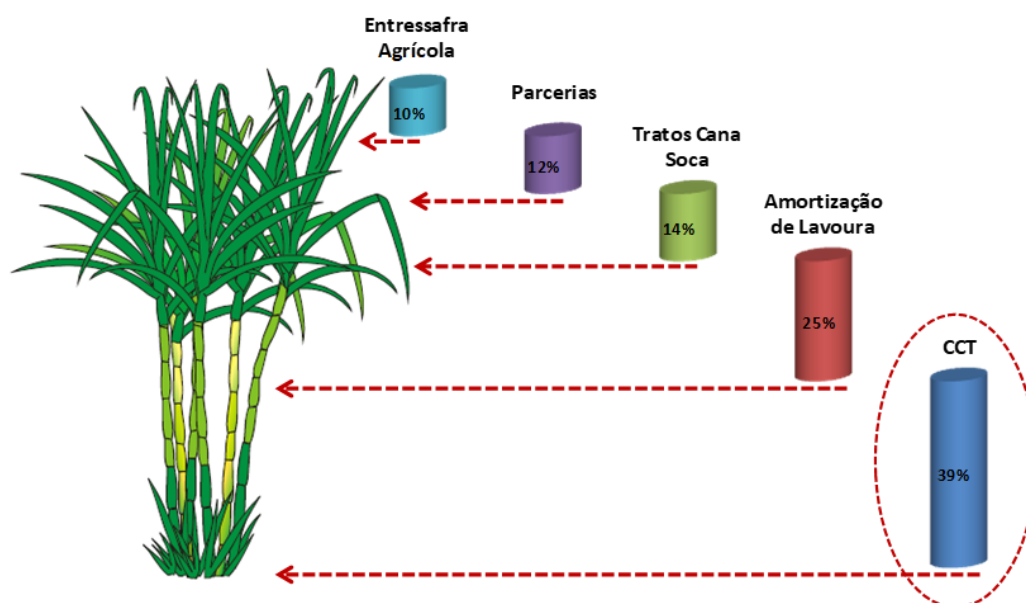
Fonte: CONAB (2020)

Em São Paulo, estado responsável por aproximadamente 50,3% da área colhida na safra atual, o índice de colheita mecanizada saiu de 47,6% na safra 2008/9 para

98,6% na safra 2020/21. A mecanização da colheita, sem queima prévia, evita a emissão de gases de efeito estufa e beneficia o solo, pois deixa sobre o solo a palha que antes era queimada, protegendo-o contra erosão e contribuindo para o aumento da sua fertilidade e teor de matéria-orgânica (CONAB, 2020).

De acordo com Dias Neto (2015) o processo de Corte, Transbordo e Transporte é responsável por cerca de 40% do custo de produção da cana-de-açúcar - Figura 24. Esta parcela na formação do custo da matéria-prima se dá pela grande necessidade de equipamentos e pessoas envolvidos nesta etapa da cadeia de produção. Portanto ter uma ferramenta que permita sensoriamento de componentes – temperatura, velocidade e pressão – posição geográfica de equipamentos em tempo real, visualização de trajeto da operação colheita, apontamentos automáticos e interface homem-máquina que permitam obter maior capacidade operacional de equipamentos é indispensável para estabelecimento de modelo de gerenciamento que objetive a redução de custos.

Figura 24- Custos da matéria-prima



Fonte: Dias Neto (2015)

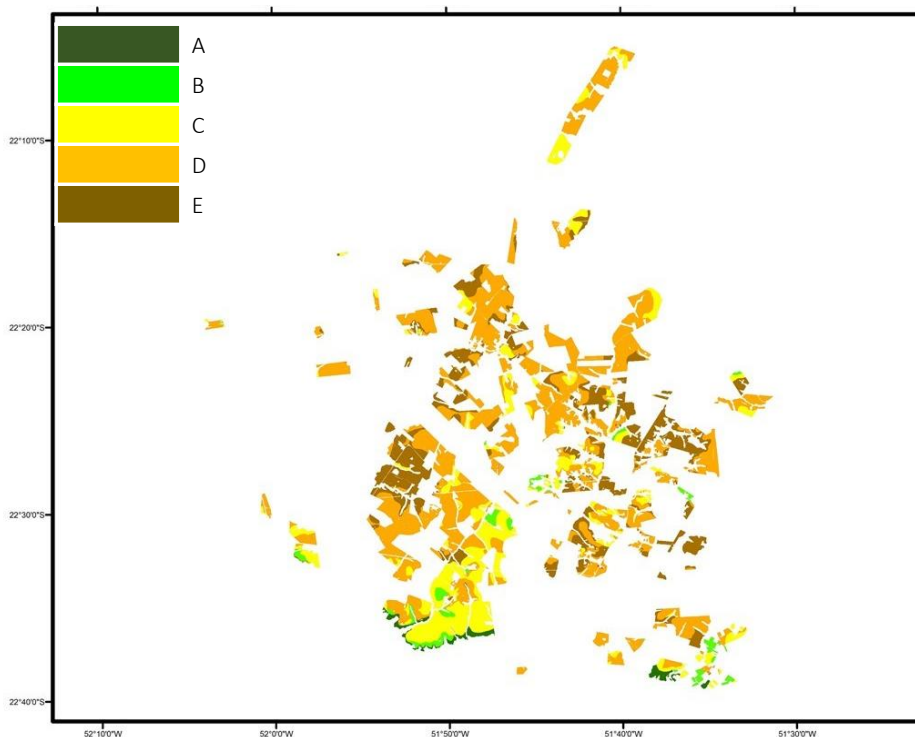
A colheita mecanizada da cultura canavieira potencializa a compactação em níveis muito elevados, para se obter produtividades e longevidades sustentáveis, torna-se fundamental o posicionamento dos rodados das máquinas no centro das entrelinhas, poupando a linha da cultura do tráfego, de forma a manter as condições adequadas ao desenvolvimento das raízes e à infiltração de água (MAZZA, 2015).

A partir da utilização do sistema de colheita mecanizada e, conseqüentemente, com o aumento da intensidade no tráfego de máquinas imposta por

este sistema sobre a área cultivada, tem sido observado por parte dos produtores que os canaviais têm perdido em longevidade e produtividade agrícola durante as safras, fruto do pisoteio das fileiras de cana-de-açúcar, principalmente em áreas onde a sistematização não foi realizada de maneira adequada às características das máquinas utilizadas (RAMOS, 2016).

O planejamento da utilização dos recursos utilizados no corte, carregamento e transporte (CCT), requer decisões que não se limitam apenas à sua quantificação. Aspectos ligados ao gerenciamento de localização das frentes de colheita e aspectos de manejo devem ser levados em consideração - Figura 25 - logo o planejamento das operações deve ocorrer de modo coordenado e numa visão sistêmica, uma vez que uma decisão sobre um quesito acarreta interferência direta em todo o sistema, dada a forte interação entre os recursos envolvidos (SILVA et al., 2011).

Figura 25 –Distribuição espacial de ambientes de produção em uma usina. Onde: A, B, C, D e E representam as zonas de manejo agrícola, sendo A zona de manejo com maior potencial de produção agrícola e E a de menor potencial.



De acordo com Silva et al. (2011) a alimentação constante das moendas durante o período de safra depende do bom gerenciamento das operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar das fazendas para as usinas. A entrega de cana-de-açúcar deve ser garantida para que o risco de parada da produção industrial de açúcar e etanol seja evitado. Esse esforço de planejamento é decisivo para a manutenção

da entrega de cana-de-açúcar para moagem, pois a fabricação de açúcar e etanol é contínua, 24 horas por dia. A cana-de-açúcar que chega à usina vem de pontos distintos, trabalhada por equipes autônomas, denominadas frentes de cortes que operam com equipamentos diferentes conforme o tipo de corte (manual/mecanizado). A quantidade de frentes de corte - Figura 26 - é estabelecida pela equipe gerencial das usinas e depende da moagem da usina, da entrega de cana de fornecedores, da quantidade de máquinas alocadas na frente, da distribuição geográfica do canavial e da dimensão das fazendas, o que irá requerer ou não a mudança frequente de área de colheita Figura 27.

Figura 26 – Distribuição de frentes de colheita em uma unidade de bioenergia dívida em 6 frentes de colheita, onde as frentes de 1 a 5 são frentes de colheita administradas pela unidade de bioenergia e a frente 6 refere-se a fornecedor de matéria-prima que administra a colheita mecanizada em sua área.

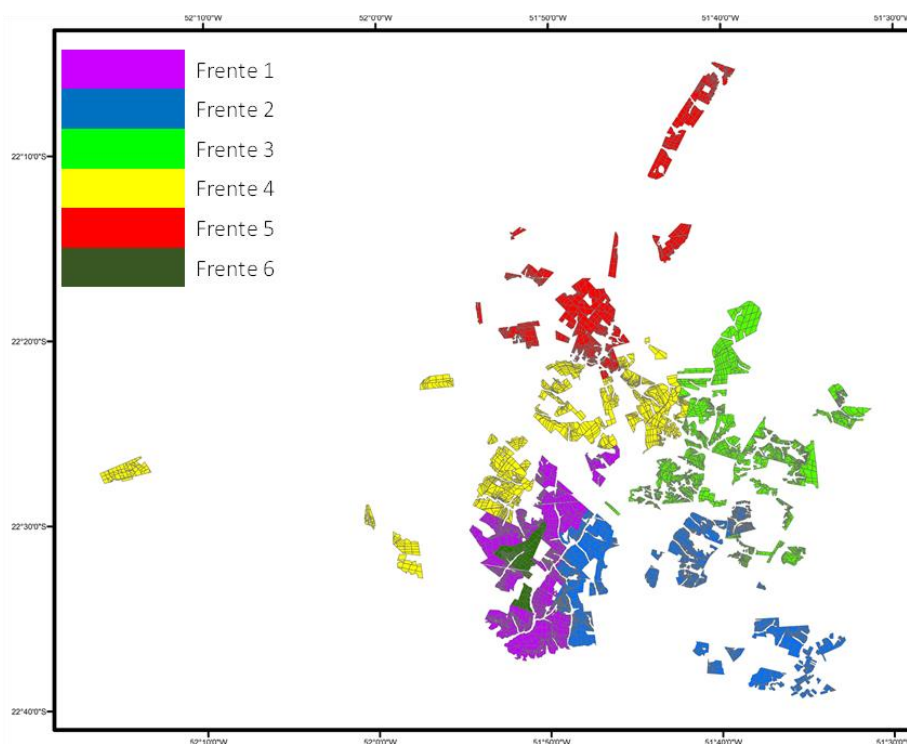
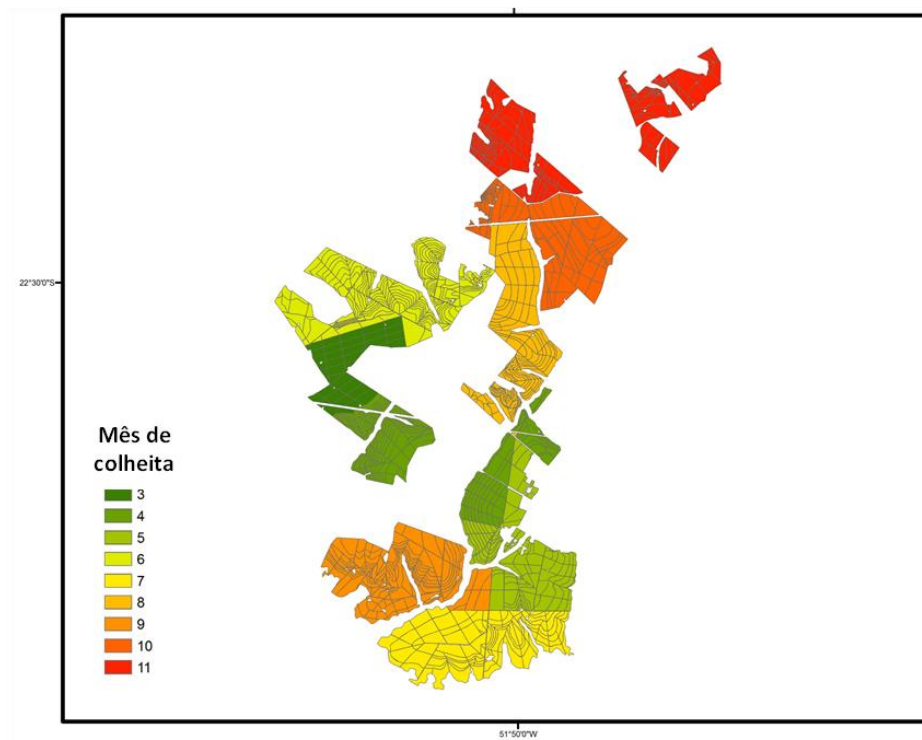


Figura 27 – Detalhe de sequência de colheita mensal da Frente 1, operando nos meses de março (3) a novembro (11)



3.8.1 Modelagem da etapa de colheita mecanizada

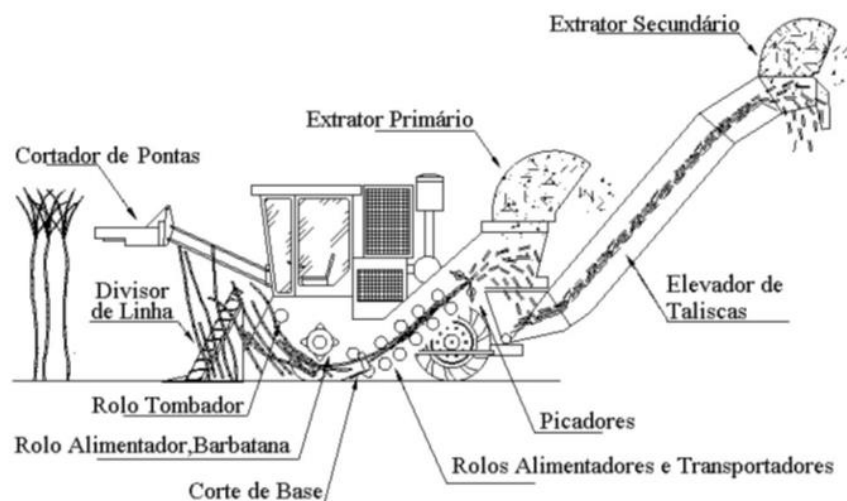
O processo de colheita de cana picada envolve 11 operações básicas realizadas pelas colhedoras auto propelidas: o corte dos ponteiros; o levantamento e alinhamento dos colmos; o tombamento dos colmos; o corte de base dos colmos; o levantamento da base dos colmos; o transporte dos colmos com separação de parte de terra captada no corte de base; a picagem dos colmos em rebolos; a ventilação e limpeza primária da palha; o transporte com elevação dos rebolos através do elevador para a descarga; a ventilação e limpeza secundária e; a descarga a granel dos rebolos nos veículos transbordos.

Essa combinação de operações permite que o sistema de cana picada efetue o despalhe parcial e tenha melhor habilidade para a colheita de canaviais com maior incidência de tombamento, características essas que fizeram esse sistema prevalecer sobre outros. Mesmo assim, esse processo apresenta restrições relacionadas com qualidade e perdas de matéria-prima, compactação do solo, estabilidade em terrenos declivosos e consumo elevado de combustível (BELARDO et al., 2015). Este cenário demonstra grande complexidade na operação colheita de cana-de-açúcar. Segundo Ramos (2016) a

identificação prévia do estado do canavial que será realizada a colheita, ou seja, a sua colheitabilidade, permite obter informações que sejam relevantes para a melhor utilização das configurações operacionais a serem utilizadas pelas colhedoras durante a colheita mecanizada da cana-de-açúcar para cada talhão, para que haja maior capacidade operacional e melhor qualidade da colheita, tendo como resultado o planejamento e gestão de frota necessária para atender a necessidade de abastecimento da unidade industrial.

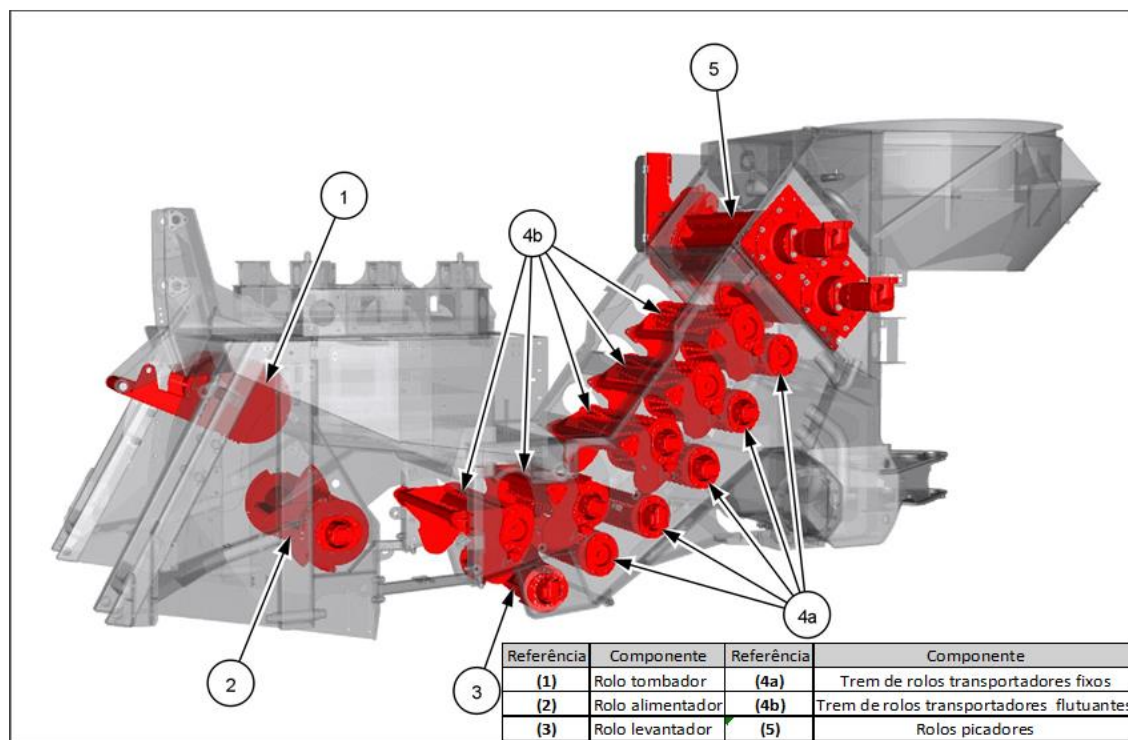
A capacidade nominal da colhedora de cana-de-açúcar -Figura 28- é função direta da capacidade de processamento da matéria-prima por seus dos órgãos ativos - Figura 29.

Figura 28- Esquema de uma colhedora de cana picada com destaque para os principais órgãos ativos



Fonte: Neves (2003)

Figura 29 – Órgãos ativos internos de colhedora de cana-de-açúcar



Fonte: Case IH

Segundo Voltarelli et al. (2015) o sistema de corte e alimentação possui a função de direcionar a matéria-prima a campo, para o interior da máquina, para assim processá-la. A sequência lógica deste sistema é inicialmente realizada pela ação dos divisores de linhas (ao trazer os colmos para a largura útil da plataforma, se necessário), rolo tombador primário e rolo tombador secundário (direcionam os colmos para a realização do corte de base), controlador automático da altura de corte, mecanismo de corte basal (realiza o corte dos colmos pelo impacto das facas de corte aos mesmos), rolos alimentadores (conduzem os colmos inteiros até o local onde são fracionados) e o conjunto picador (constituído pelos rolos ou facões picadores, para haver o fracionamento dos colmos).

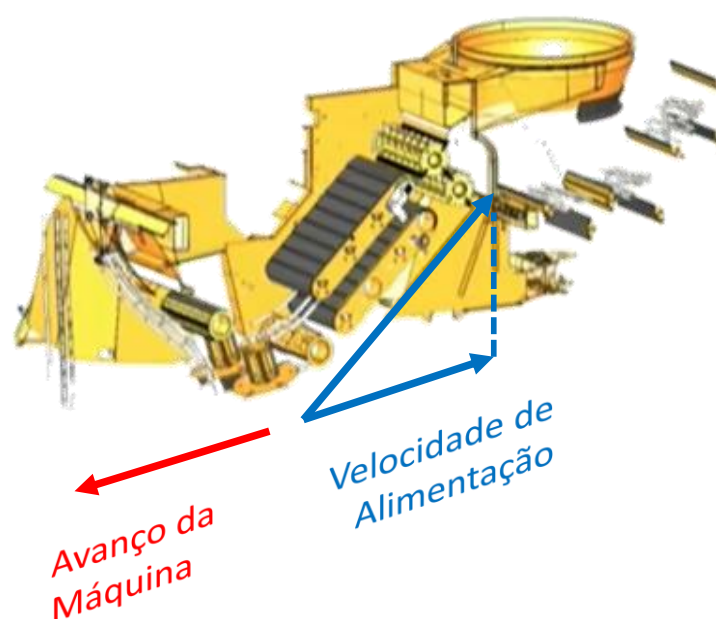
- ➔ Divisores de linha: a distância entre os divisores de linha é o primeiro obstáculo que a matéria-prima encontra no processo de colheita mecanizada. A distância inadequada destes componentes compromete o desempenho da máquina ao limitar o volume de cana-de-açúcar, podendo provocar embuchamentos e consequentemente haverá a necessidade de diminuir a velocidade de deslocamento da colhedora;
- ➔ Corte de base: a distância entre os eixos que acionam os discos de corte assim como a distância entre os divisores de linha, também impactam no volume de cana

a ser processado. A velocidade do sistema de corte de base também influencia na quantidade de matéria-prima;

- ➔ Rolo alimentador: direciona a cana-de-açúcar para o conjunto de rolos transportadores, podendo também ser limitante ao processamento de cana-de-açúcar no interior da colhedora.
- ➔ Rolo alimentador / transportador: transporta a cana pelo interior da colhedora até o conjunto de facões picadores. O sincronismo deste conjunto de rolos com a velocidade de avanço da colhedora, capacidade do sistema de corte basal e capacidade dos facões picadores é fundamental para a definição da capacidade de processamento de matéria-prima pelo sistema de colheita.
- ➔ Picadores: conjunto de facões que segmentam a cana em rebolos, tornando o sistema de limpeza realizado pelos extratores primário e secundários mais eficiente.
- ➔ Elevadores: Este componente tem a função de retirar a matéria-prima, já limpa, do cesto e transportá-la até a sua deposição no conjunto trator-transbordo. A velocidade de trabalho da esteira de taliscas bem como suas dimensões, tem influência na capacidade de processamento da colhedora.

Avaliando necessidades de melhorias operacionais em colhedoras de cana-de-açúcar, Neves (2017) cita a necessidade de sincronismo entre velocidade de avanço da colhedora e a velocidade de alimentação dos órgãos ativos - Figura 30.

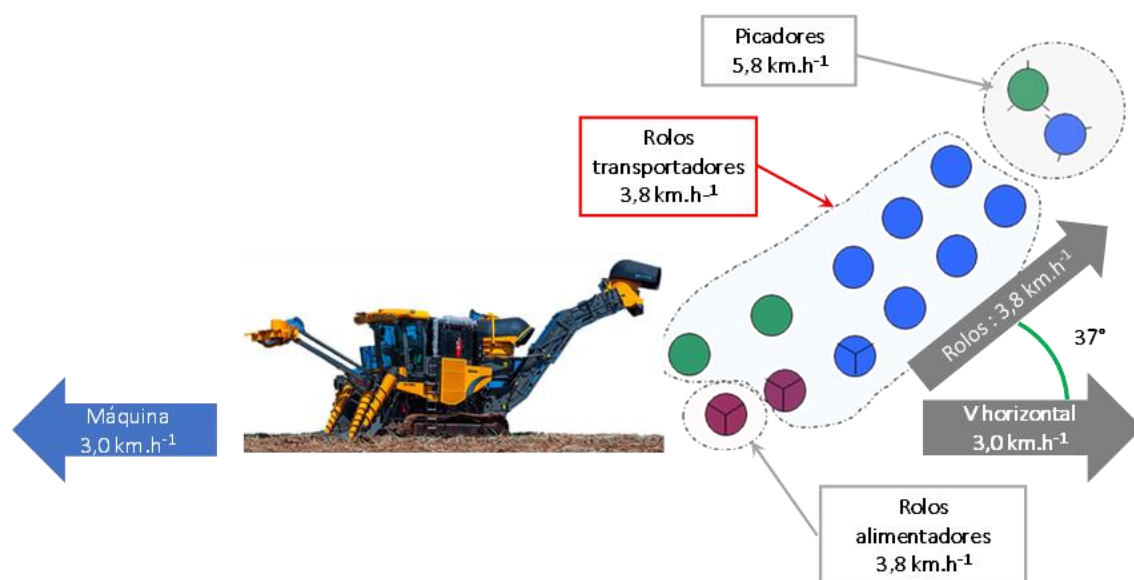
Figura 30 – Velocidade de avanço e velocidade de alimentação de colhedora



Fonte: Neves (2017)

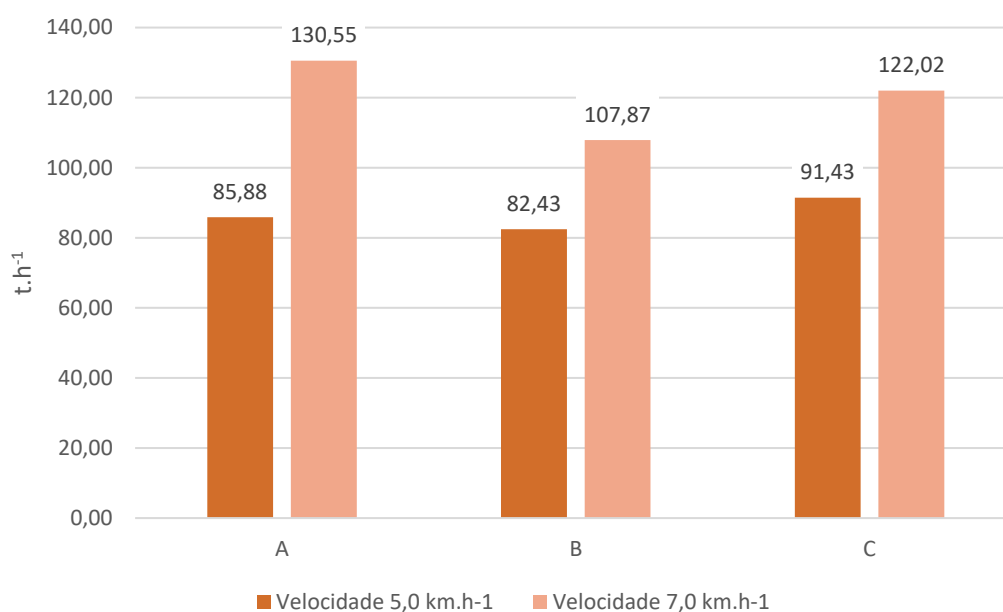
Pode-se notar na Figura 31, que a velocidade periférica de rolos alimentadores e rolos picadores não estão adequados a velocidade de avanço da colhedora, devido ao percurso percorrido pela cana-de-açúcar dentro da colhedora ser maior do que o percurso percorrido pela colhedora. O sincronismo de órgãos ativos de colhedoras a velocidade operacional é fator imprescindível para a operação de colheita, tanto em qualidade, quanto na determinação de RN.

Figura 31 – Avaliação de sincronismos de velocidade de avanço e velocidade periférica de rolos alimentadores, transportadores e picadores



Fonte: Neves (2017)

Belardo (2010) avaliando a capacidade operacional de três marcas de colhedoras de cana-de-açúcar, em duas velocidades de deslocamento pré-estabelecidas – 5,0 e 7,0 km h⁻¹ – com cinco repetições de 150 m de colheita para cada velocidade e delineamento experimental inteiramente casualizado com esquema fatorial 3x2, avaliando a quantidade de material descarregada em veículos transbordos, desprezando perdas e matéria estranha contida na carga; obteve os valores variando de 82,43 a 91,13 Mg h⁻¹ operando a velocidade de avanço da máquina 5,0 km h⁻¹ e de 107,87 a 130,55 Mg h⁻¹ operando a velocidade de avanço da máquina de 7,0 km h⁻¹ - Figura 32. O autor complementa, citando que, trabalhos conduzidos por outros pesquisadores obtiveram resultados próximos aos que encontrou.

Figura 32 – Capacidade operacional de 3 marcas de colhedora de cana-de-açúcar

Fonte: Belardo (2011)

3.9 Agricultura digital ou agricultura 4.0

Atualmente tecnologias digitais vêm sendo utilizadas nas mais diversas áreas, buscando abranger o máximo de sistemas e realidades possíveis, com um objetivo em comum de acelerar e otimizar o uso dos recursos utilizados para produzir mais com menos (ALBIERO et al., 2020; LIMA et al., 2020; MEGETO et al., 2020; SIMIONATO et al., 2020). Nesse ideal, surge a necessidade de criar soluções digitais para produção de alimentos, a qual é um dos grandes desafios do século XXI onde a população mundial cresce de forma exponencial, e a produtividade nos setores do agronegócio possuem a tarefa de acompanhar esse crescimento de forma sustentável. Por meio do desenvolvimento das tecnologias e necessidade de soluções foram criadas ferramentas com objetivo de enriquecer o uso das informações que ocorrem no campo e auxiliar produtores rurais a tomarem decisões por meio de análises de dados precisos (VILLAFUERTE et al., 2018).

A agricultura digital refere-se se à inserção de tecnologias de informação e aplicativos na agricultura, que em conjunto buscam agregar inteligência a dispositivos, sensores e equipamentos, automatizando operações agrícolas, racionalizando o uso de insumos e melhorando a gestão agrícola das fazendas, possibilitando atingir novos patamares de produtividade no campo (ALBIERO et al., 2020; VILLAFUERTE et al., 2018).

Para Lançoni et al. (2020) conectividade, monitoramento e automação são elementos essenciais para a gestão das atividades. Além disso, o uso de informações gerenciais, financeiras e contábeis corroboram na obtenção de resultados para tomada de decisão, melhoramento do retorno acionário e o controle dos recursos financeiros envolvidos na operação.

A agricultura 4.0 foi desenvolvida tendo como base os preceitos da agricultura de precisão, aos quais foram sendo agregadas novas tecnologias, tendo sempre como premissa principal possibilitar maior conectividade visando capturar dados do campo e gerar informação útil para o produtor, neste sentido, novas tecnologias computacionais como Internet of Things (IoT), Big Data, Cloud Computing, Machine Learning, área de estudo do campo da inteligência artificial, têm ampliado o leque de possibilidades no sentido de fazer uma agricultura inteligente e cada vez mais competitiva (ALBIERO et al., 2020; LIMA et al., 2020; MEGETO et al., 2020; SIMIONATO et al., 2020; VILLAFUERTE et al., 2018).

A internet das coisas é uma combinação de diversas tecnologias, complementares que viabilizam a integração de objetos do ambiente físico ao mundo virtual. Esta tecnologia que pode prover diversos serviços, como monitoramento de temperatura, coordenadas geográficas, agregação de dados, colaboração e inteligência; tornando possível gerenciar operações a centenas de quilômetros de distância, rastrear bens que cruzam o oceano ou detectar a ocorrência de pragas ou doenças na plantação. A IoT redefine o processo de compartilhamento de informação, enquanto antes as informações eram compartilhadas entre pessoas por meio de sistemas de informação, agora a informação é compartilhada entre as máquinas, que se conectam entre si e a partir dessa troca de informação executam ações inteligentes (VILLAFUERTE et al., 2018).

De acordo com Milanez et al. (2020) há quatro eixos principais de impacto do uso de aplicativos de IoT na atividade rural: (i) produtividade e eficiência; (ii) gestão de equipamentos; (iii) gestão de ativos/animais; e (iv) produtividade humana. No que se refere ao primeiro item, podem ser utilizados sensores e drones para monitoramento meteorológico e do solo, controlando umidade, temperatura ambiente, nutrientes e consumo de água. A área plantada poderá ser acompanhada para a identificação de pragas e fungos, garantindo sua rápida correção. O acompanhamento individual de cada talhão permite avaliar a aptidão do solo a cada cultura e a otimização do plantio.

Outra fonte relevante de utilização de aplicativos de IoT está na gestão dos equipamentos, na logística e armazenagem. No uso do maquinário conectado on-line, é

possível definir rotas de plantio e colheita que maximizem a produtividade física. Sensores embarcados coletam dados das máquinas, que são analisados e permitem manutenção preventiva e substituição de peças, evitando, assim, panes inesperadas. A gestão também melhora o consumo de combustível, reduzindo as emissões de gás carbônico (CO₂) e gerando benefícios ambientais. Ainda há ganhos decorrentes da movimentação da colheita entre o local da produção e os locais de destino, por meio da definição dos tempos, modais de transporte e uso dos armazéns de forma a reduzir as perdas de produção e minimizar os custos.

3.9.1 Automação agrícola

Reis et al (2020) relatam que o uso de tecnologias digitais, incluindo tecnologias de informação e comunicação na agricultura e pecuária tem um amplo espectro. Elas compreendem o uso generalizado de sensores para monitorar o solo, safra, clima, localização e estado de funcionamento de maquinário; transmissão de dados e tomada de decisão.

De acordo com Dias Neto (2015) automação agrícola trata-se da utilização de um conjunto de ferramentas que aceleram o aprendizado e é facilmente assimilada pelos colaboradores que atuam nos processos de produção. A automação agrícola, possibilita o acompanhamento em tempo real da operação, assegura de forma sustentável a máxima produtividade com o menor custo - Figura 33.

Figura 33- Captura de valores com automação agrícola

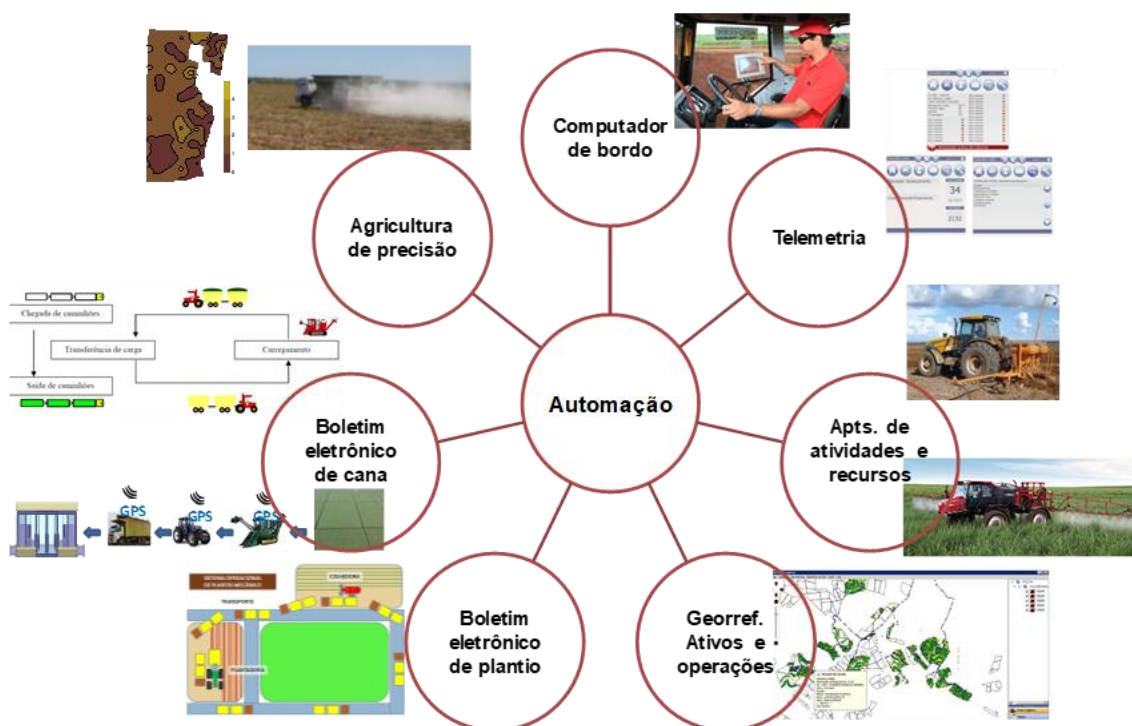
Segurança	• Maior segurança na operação pela redução de erros humanos • Menor impacto/risco ambiental
Aumento de eficiência	• Redução de processos manuais • Otimização dos ciclos de, preparo, plantio, tratos e Corte, Carregamento e Transporte (CCT)
Acurácia de informações	• Maior controle da produção, utilização de insumos e de informações para pagamento • Controle do processo de CCT mais detalhado atuando no consumo de recursos/insumos
Maximização da utilização de ativos	• Monitorar a operação e “saúde” dos equipamentos de produção e Aumento da disponibilidade e vida útil dos equipamentos de produção
Inteligência operacional	• Maior segurança e confiabilidade das informações • Alertas e indicadores para a tomada de decisões rápidas e otimizadas – nível operacional

Fonte: Dias Neto (2015)

Bérgamo (2020) afirma que o foco do monitoramento de ativos agrícolas é sempre buscar o aumento da eficiência operacional, por meio do entendimento de quais são os motivos de parada e a partir daí gerar planos de ação para minimizar esses eventos improdutivos e, consequentemente, reduzir custos.

A Figura 34 ilustra uma visão de negócios onde a automação agrícola deve atuar dentro dos processos de produção agrícolas.

Figura 34- Alcance da automação nos processos agrícolas



Fonte: Dias Neto (2015)

Manzoni (2015) afirma que a abordagem para solução automação e gestão consiste na instalação de computadores de bordo, contemplando telemetria, para gestão das máquinas envolvidas no processo de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar que, junto com o *back end* e Portal, fornecem um sistema de gestão de ativos móveis e de processos adequados à realidade operacional das unidades produtivas do setor sucroenergético.

Segundo Dias Neto (2015) para assegurar que os resultados esperados sejam obtidos, é importante que os equipamentos envolvidos automação agrícola a serem utilizados apresentem como características: confiabilidade e robustez, flexibilidade e extensibilidade, oferecer solução abrangente e configurável para tipos diferentes de equipamentos - colhedoras, caminhão, tratores, veículos leves, motobomba - integração com dispositivos de agricultura de precisão, identificação do estado conforme operação

em curso: produtivo, improdutivo, manobra e captura de dados de forma remota de produção e mapas de produtividade. A interface entre operador e equipamento de automação é fator crítico que deve ser considerado sendo os principais atributos permitir a consistência na entrada de dados, o monitoramento de desempenho do equipamento pelo operador, alarmes e indicações operacionais e gerar apontamentos georreferenciados. Outro aspecto a ser considerado refere-se à transmissão de dados capturados de sensores – telemetria.

Os dados capturados serão enviados pela infraestrutura de comunicação, segregados em 2 tipos: críticos (online), e não críticos. Dados críticos serão enviados pelo canal GPRS ou satelital, nesta ordem e dados não críticos, serão enviados pela rede Wi-Fi estabelecida entre os ativos de campo, e levada até a unidade de bioenergia por veículos auto propelidos que façam o ciclo logístico campo-usina com frequência não superior a 3 horas. Esta funcionalidade é importante para:

- ➔ Monitoramento da rota, posição e o estado dos ativos por frente;
- ➔ Posicionamento do ativo no campo: em intervalo definido e por evento – operações produtivas e improdutivas;
- ➔ Estado do equipamento: em intervalo definido e por evento (parada);
- ➔ Para o operador: real time - com alarme de violação de limites e registro automático de infrações;
- ➔ Validação de Ordem de serviço em uso – on-line;
- ➔ Maximizar a eficiência dos ativos;
- ➔ Indicação do motivo da parada e envio do estado ativo dos equipamentos - Produtivo/Improdutivo;
- ➔ Registro automático de quebras;
- ➔ Aumentar a confiabilidade dos apontamentos;
- ➔ Consistência das informações.

3.9.2 Tecnologia embarcada de computador de bordo

Um computador de bordo é um dispositivo embarcado, isto é, instalado no interior de um equipamento, que realiza dois tipos de função: registra sinais vitais do equipamento; e permite o registro de anotações pelo operador do equipamento. Na operação agrícola, o registro dos sinais vitais de forma remota é chamado de “telemetria”; o registro de anotações pelo operador chama-se “apontamento”. Assim, um computador

de bordo para a operação agrícola realiza duas funções básicas: telemetria e apontamento (MANZONI, 2015).

O computador de bordo é, basicamente, um microcomputador embarcado ligado ao equipamento. Seus programas e algoritmos processam dados colhidos por meio de sensores ligados a componentes das máquinas agrícolas que interpretam seus estados operacionais (trabalhando ou em estado de parada). Este equipamento tem a possibilidade de ser programado para receber apontamentos, que podem ser feitos pelos operadores das máquinas agrícolas (Anexo 1). Todos esses dados processados podem ser enviados em diferentes níveis de sinais como de **GPRS** (*General Packet Radio Services* ou Serviços Gerais de Pacote por Rádio) que é uma das tecnologias que possibilita a transmissão de dados. Há a possibilidade também da criação de sistemas de envios de dados autônomos disponibilizados por algumas empresas de tecnologia. Outro aspecto é que a localização do equipamento é reconhecida pela instalação da antena **GPS**. Toda essa tecnologia está incorporada ao computador de bordo, possibilitando a geração dos dados de toda a máquina na forma operacional e como sua localização em qualquer lugar no campo (BÉRGAMO, 2020). De acordo com Manzoni (2015) os computadores de bordo permitem a gestão direta da operação pelo próprio operador da máquina, tendo informações importantes da operação em memória local no computador da máquina, tais como: velocidade e RPM ideal pelo tipo de operação ou em função da produtividade ou TCH (Tonelada de Cana por Hectare) da área. Estas funcionalidades de gestão à vista do operador da máquina permite atingir economia real em campo de até 15% do consumo de diesel de colhedoras de cana.

A instalação de computadores de bordo nas máquinas agrícolas permitiu a obtenção de dados relacionados à telemetria (registros de sinais vitais do equipamento), principalmente com dados obtidos através da leitura por indução da Rede **CAN** (*Controller Area Network* ou Rede de Área de Controle) e aos apontamentos das operações pelo operador, gerando uma grande quantidade de dados das operações agrícolas, tudo isso em tempo real (BÉRGAMO, 2020).

Através de interface apropriada nos computadores de bordo, o operador, além de acompanhar seu desempenho pela gestão à vista, é capaz de realizar apontamentos para fechamento de custos operacional no final do turno de trabalho. Para máquinas que exigem gestão à vista pelos operadores e apontamentos operacionais, tendo custos elevados de manutenção e consumo de diesel, há necessidade de uma interface com *dash*

board rápidos e intuitivos para tomadas de decisão pelo próprio operador, tais como as interfaces dos computadores de bordo para colhedoras de cana-de-açúcar - Figura 35.

Figura 35 - Interface de gestão on-board por computador de bordo



Fonte: Manzoni (2015)

Equipamentos que não necessitam de uma gestão à vista detalhada, mas requer apontamentos operacionais, utiliza-se de uma interface sem a função de *dash board*, tais como computadores para tratores, pulverizadores autopropelidos e carretéis de fertirrigação. A Figura 36 ilustra tipos de interface de computadores de bordo para o processo de Corte, Transbordo e Transporte (MANZONI, 2015).

Figura 36 – Tipos de interface e utilização mais adequada para Corte, Transbordo e Transporte



Fonte: Manzoni (2015)

3.9.3 Comunicação e telemetria

A comunicação híbrida dos módulos de comunicação dos computadores de bordo permite a comutação entre canais de: satélite, GPRS/3G, rádio VHF, Wi-fi 802.11b ou ZigBee, com regra de negócio embarcada para utilização dos canais, em função do custo da banda por tecnologia utilizada e tipo de informação a ser trafegada. Os dados trafegados da componente telemetria utilizam, exclusivamente, os meios de comunicação

de longo alcance: satélite e GPRS/3G, e são dados de sensores de motor e situação de máquina, considerados críticos, enquanto os dados trafegados pelas redes de comunicação entre máquinas e de curto alcance: rádio VHF, Wi-fi e Zigbee são dados de boletins de apontamento mecanizados e boletins de entrada de cana (MANZONI, 2015).

Telemetria significa a arte de medir coisas. Dentro da indústria, o termo é utilizado como uma tecnologia que permite a medição remota e a comunicação de informações entre sistemas, através de dispositivos de comunicação sem fio, como ondas de rádio ou sinais de satélite. Manzoni (2015) afirma que, com a confiabilidade de comunicação e garantia da qualidade dos dados gerados via sensores e geoprocessamento embarcado, a substituição das tradicionais fichas de campo é real com uma automação agrícola adequada, permitindo integrações automáticas de boletins de apontamento mecanizados do CCT e do Certificado Eletrônico de Cana com ERP Agrícola.

Além da integração com ERP, a automação deve ser integrada a sistemas especialistas em tomada de decisão, tais como: módulos de controle e tomada de decisão para despacho de caminhões de transporte de cana às frentes e módulos de controle de manutenção de frota, dando maior assertividade a estas poderosas ferramentas para controle logístico e manutenção da frota, sendo estes a base para uma gestão de frota adequada e eficiente.

Com aumento de assertividade nos despachos de caminhões para as frentes por softwares especialistas, é possível executar e garantir precisão à micrologística das frentes de colheita, através da automação do despacho dos transbordos, em função da situação das máquinas e da disponibilidade de carga das frentes.

3.9.4 Gestão da informação na agricultura digital

Os dados obtidos a partir de tecnologia embarcada e transmitidos por meio de telemetria, são armazenados em plataformas de inteligências geográficas, nas quais são realizadas a análise de um grande volume de dados georreferenciados convertendo-os em indicadores de desempenho; e são capazes de organizá-los em painéis de suporte que auxiliam a tomada de decisão dos gestores envolvidos nos processos (VILLAFUERTE et al., 2018).

Uma das iniciativas voltadas ao emprego dos recursos da agricultura 4.0 é conduzida pela Usina São Martinho, em Pradópolis (SP). A rede, criada com o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD) de Campinas (SP), usa a

tecnologia de transmissão Long Term Evolution (LTE) otimizada para áreas remotas, que possibilita um sinal 4G em raios de até 30 quilômetros a partir de suas estações de rádio-base. Esta infraestrutura suporta a transmissão de dados gerados pelos mais de 700 veículos agrícolas empregados em seus 135 mil hectares de lavoura. Desde então, a frota passou a estar conectada, por meio de seis torres de transmissão, a um Centro de Operações Agrícolas, onde 50 pessoas monitoram os indicadores em tempo real. Os dados transmitidos ao Centro de Operações Agrícolas -Figura 37- são armazenados em uma estrutura de big data para processamento e integração com os demais sistemas da companhia, como softwares de gestão e mapas de produtividade, que identificam as características produtivas dos talhões (ZAPAROLLI, 2020).

Figura 37 – Centro operações agrícolas – Usina São Martinho.



Fonte: Zaparolli (2020)

3.10 Controle estatístico de processo

De acordo com Albiero et al (2012) conceitos de qualidade cada vez mais se tornam essenciais para a sobrevivência da empresa agrícola, pois a importância do aprimoramento das operações agrícolas se faz necessária para a obtenção de resultados viáveis economicamente, ambientalmente e socialmente. Uma das dimensões da qualidade é conseguir de conformidade, ou seja, a garantia de execução exata do que foi planejado para atender aos requisitos dos clientes em relação a um determinado produto ou serviço.

Voltarelli (2015) afirma que dentre as ferramentas do controle estatístico de processo, as que mais podem ser aplicadas nas operações agrícolas mecanizadas são as cartas de controle, como uma alternativa para aumentar o nível de qualidade de seus indicadores (variáveis), sendo uma análise de interpretação de dados, visando ao melhor

gerenciamento de determinada operação, como forma de diminuir o nível de variabilidade inerente à mesma. Neste contexto, a análise da qualidade da operação torna-se ainda mais eficaz quando as tomadas de decisões são realizadas por pessoas capacitadas e que entendam sobre o processo em questão, para implementar melhorias em seu ciclo, eliminando ou diminuindo as fontes externas de variação.

A carta de controle é composta por uma linha média e duas outras linhas (superior e inferior) que representam os limites de controle e os valores característicos do processo. Os limites de controle são aferidos pelo valor médio, somado ou subtraído a três vezes o desvio padrão. Quando todos os pontos do gráfico localizam-se entre os limites de controle, considera-se que o processo está sob controle; quando ao menos um ponto localiza-se fora desses limites, considera-se que o processo está fora de controle (TORRES, 2014; MISSIO, 2016).

Para a aplicação desta ferramenta em operações agrícolas mecanizadas, pouco se sabe qual o melhor modelo de carta de controle a ser utilizada ou, ainda, qual o múltiplo do desvio-padrão que melhor se ajusta para prever o comportamento de um determinado indicador de qualidade, tendo como intuito final realizar um monitoramento específico para cada variável (VOLTARELLI, 2015). Segundo Albiero et al. (2012) ao aplicar as cartas de controle da média móvel exponencialmente ponderada na distribuição longitudinal de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo, foi observada eficácia da mesma no monitoramento e na detecção da estabilidade ou instabilidade do processo, quando os dados possuem distribuição não normal. Logo é factível a aplicação deste racional para avaliação da qualidade das operações de preparo de solo, uma vez que não há distribuição normal nos dados amostrais devido à variabilidade espacial que o solo apresenta.

Pesquisas utilizando Controle Estatístico de Processo (CEP) já vem sendo realizadas com foco em operações agrícolas, como por exemplo:

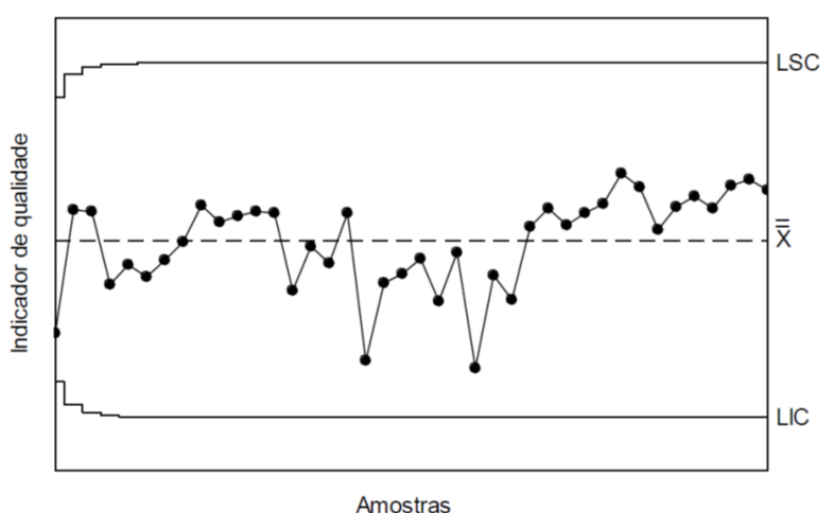
- ➔ Milan e Fernandes (2002) avaliando qualidade das operações de preparo de solo para cultura do milho;
- ➔ Albiero et al (2012) em avaliação distribuição de sementes para semeadora;
- ➔ Melo et al (2013) avaliando a qualidade de distribuição de sementes de milho em semeadoras;
- ➔ Torres (2014) e Voltarelli (2015) no monitoramento de perdas e qualidade de colheita mecanizada de cana-de-açúcar;

- ➔ Missio (2016) avaliando a qualidade do plantio mecanizada de cana-de-açúcar.

3.10.1 Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada

Amiri e Allahyri (2012), citados por Voltarelli (2015), apontam que os modelos de cartas de controle em que se utiliza a MMEP, também denominada de gráficos de controle avançados, são aprimoramentos dos gráficos de Shewhart desenvolvidos para situações específicas, na qual se deseja minimizar, simultaneamente, a ocorrência de pontos fora dos limites de controle (alarmes falsos) e alarmes não visíveis, em virtude de sua maior rigorosidade de análise em relação às cartas de valores individuais e da média móvel, sendo também capaz de determinar se um processo é ou não estável - Figura 38.

Figura 38 - Modelo de carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada. LSC: limite superior de controle; LIC: limite inferior de controle. $\bar{x}$: média estimada dos valores individuais



Fonte: Voltarelli (2015)

As cartas de controle da MMEP, possibilitam a avaliação das mínimas variações no decorrer do processo, podendo indicar também a instabilidade ou a estabilidade do mesmo (MONTGOMERY, 2009).

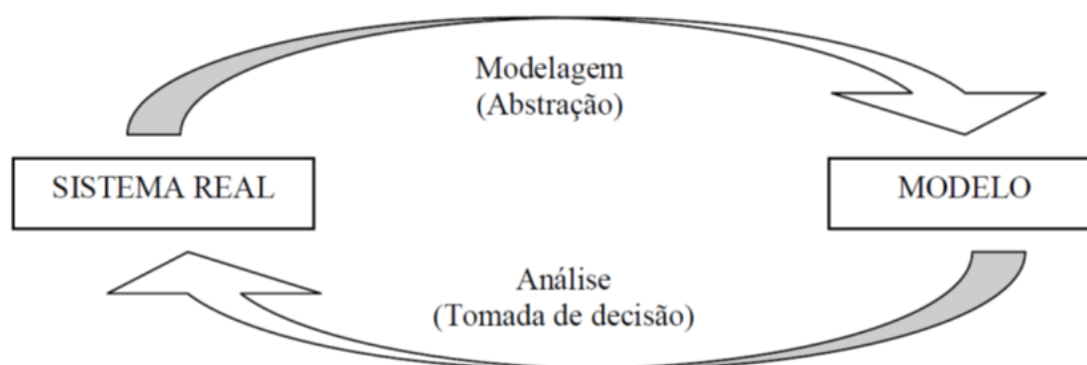
3.11 Modelagem em agricultura

Côrrea et al. (2011) abordando experimentação agrícola, relata que os resultados de pesquisas sejam confiáveis, existe a necessidade da realização de experimentos - que envolve custo de instalação, manutenção e obtenção dos dados - além do tempo necessário para a condução dos mesmos. Em muitos casos, não existe a

possibilidade de instalação de experimentos, exigindo-se que a tomada decisória seja rápida. Para contornar situações como estas, propõem-se a descrição de um sistema real, na escala do objetivo do estudo e com a interpretação dos fenômenos envolvidos correlacionada ao nível de exatidão obtida na sua descrição. Para que esta simplificação seja possível, exige-se que exista um elevado conhecimento dos conceitos básicos de funcionamento do sistema em questão. Conceitua-se como modelagem a ferramenta científica baseada na representação simplificada de um sistema que, na maioria dos casos, pode ser composta por um conjunto de símbolos e relações matemáticas logicamente ordenadas.

Modelos podem ser usados para investigar uma série de assuntos relacionados à produção vegetal, seja para facilitar o entendimento quanto ao comportamento da cultura dentro de seu contexto ambiental, explorar seu potencial produtivo sob certas condições, verificar hipóteses, melhorar o conhecimento de processos, estimular a integração interdisciplinar, prever o comportamento de um sistema ou ser utilizado como ferramenta de gestão para definição de estratégia a ser adotada (CORRÊA et al., 2011). Como vantagens, lhes são atribuídos o custo menos oneroso do que experimentos convencionais que, cada vez mais, possuem um elevado custo de instalação, manutenção e obtenção dos dados sem, no entanto ter a pretensão de substituí-los, a velocidade na obtenção de resultados, o uso em diferentes escalas e a criação de cenários alternativos (CORRÊA et al., 2011; SILVA, 2012). Banchi et al. (2019) afirmam que a modelagem matemática de parâmetros de colheita melhoram a uso de ferramentas de gestão.

O desenvolvimento e a aplicação da modelagem em agricultura são uma valiosa ferramenta que pode - e deve - servir para a orientação de pesquisas, gestão de tecnologia e até decisões políticas (CORRÊA et al., 2011). O processo de modelagem pode ser expresso pela Figura 39, no qual, a partir do sistema real, as operações envolvidas são abstraídas em nível adequado de detalhe, obtendo-se um modelo matemático, capaz de expressar as principais características do sistema real. Num segundo momento, mediante a experimentação com o modelo, são realizadas análises que subsidiam as tomadas de decisão que serão implementadas no sistema real (SILVA, 2012).

Figura 39- Esquema do processo de modelagem

Fonte: Silva (2012)

O desenvolvimento de um modelo computacional é realizado pela análise e entendimento das relações envolvidas de um problema, seguida da construção de um algoritmo, sequência lógica de instruções na qual os conceitos e relações do problema são ordenados. O algoritmo é transformado em um programa por meio da codificação das instruções, de acordo com as propriedades do programa/linguagem, permitindo ao computador interpretar a sequência de cálculos e decisões. O programa é verificado quanto a erros, durante e após sua construção, e validado. Uma das formas de validação é o comparativo, intermediário e/ou final, dos resultados do programa com os dados reais de uma determinada situação. Após a verificação e validação, o modelo é aplicado na análise do problema em questão e no desenvolvimento de cenários e simulações, que permitem avaliar o problema de diversos ângulos, dentro das limitações impostas pelo algoritmo (MILAN e ROSA, 2015).

Cavalett et. al (2016) relatam que devido à complexidade, especificidade, variabilidade, interação com o meio ambiente e outras características inerentes aos sistemas agrícolas, não há softwares prontamente disponíveis para a avaliação de sistemas de produção agrícola. Para superar esta lacuna, o CTBE desenvolveu o CanaSoft que é destinado à simulação e medição dos parâmetros agrícolas mais importantes de alternativas de sistemas de produção de biomassa. As equações que compõem o CanaSoft não apresentam como variáveis tempos operacionais – manobra, abastecimento, parada por refeição, entre outros – e nem condições técnicas operacionais – como comprimento de percurso e condições do canavial a ser colhido – havendo a necessidade de maior detalhamento para auxiliar a tomada de decisão quanto à gestão de ativos e/ou introdução de tecnologias que impactem nestas variáveis.

A informação sobre o custo de produção de uma cultura é uma das mais importantes ferramentas para qualquer atividade produtiva. Sua utilização na administração de empresas agrícolas tem assumido importância crescente, quer na análise da eficiência da produção de determinada atividade, quer no estudo de processos específicos de produção, os quais indicam o sucesso de determinada empresa no seu esforço de produzir. Ao mesmo tempo, à medida que a agricultura vem se tornando cada vez mais competitiva, o custo de produção transforma-se num importante instrumento do processo de decisão. Assim, se, por um lado, os custos de produção vêm aumentando a sua importância na administração rural, na determinação de eficiência de atividades produtivas e no planejamento de empresas, por outro, as dificuldades de estimá-los começaram a ser reduzidas, à medida que aumentou a adoção da informática na gestão das empresas agropecuárias, o que facilitou o registro de seus dados (IPEA, 2016).

A utilização dos dados registrados por meio de ERP (*Enterprise Resource Planning*, ou sistema de gestão integrado) agrícola associado à modelagem de sistemas e processos permitem a avaliação dos mesmos sob diversas abordagens: custos, eficiências operacionais e dimensionamento de recursos.

4 Materiais e Métodos

4.1 Avaliação de qualidade de operações de preparo de solo

Para a avaliação dos benefícios do preparo localizado foram separadas 4 áreas em SP, MS e GO - Figura 40 e Tabela 5 - onde foram avaliadas a compactação e a eficácia da operação e desenvolvimento do sistema radicular, conforme descrito em detalhes a seguir.

Figura 40 – Áreas onde foram realizadas as avaliações de preparo localizado com canteirizador

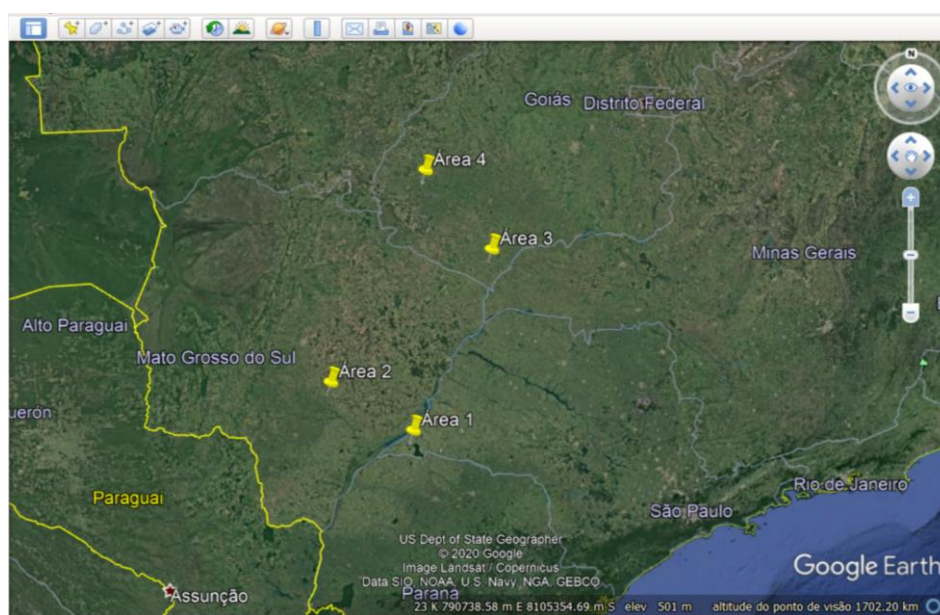


Tabela 5 – Caracterização das áreas de ensaios de preparo localizado

Local	Área ha	Coordenadas	Tipo de solo	Textura	Relevo
Área 1	60,2	UTM 349.204 E; 7.522.764 S; fuso 22K	LVdf – latossolo vermelho distrófico	Média	Suave ondulado
Área 2	84,09	UTM 795.761 E; 7.624.601 S, fuso 21K	LVAd – latossolo vermelho-amarelo distrófico	Média	Plano
Área 3	214,51	UTM 506.070 E; 7.906.875 S; fuso 22k	LVAa - latossolo vermelho-amarelo aluminico - associado a RQ - neossolo quartzarênico	Média/Arenosa	Suave ondulado
Área 4	190,22	UTM 364.277 E; 8.069.517 S; fuso 22k	LVd – latossolo vermelho distrófico	Média	Suave ondulado

Em todas as áreas o espaçamento foi de 1,50 m entre fileiras, o trator utilizado foi de 230 cv e o implemento canteirizador foi o PSPC1102, conforme descrição da

Tabela 75 e Tabela 76 do Anexo 3. No preparo localizado foi utilizado o sistema de piloto automático descrito na Tabela 77, Anexo 3.

Na área 1, a primeira avaliação foi em relação eficácia da canteirização por meio de densidade aparente. Após o preparo de solo, foram abertas 5 trincheiras contendo duas áreas destinadas para o plantio (canteiro) e duas áreas onde não houve a mobilização de solo (local para tráfego), em cada uma dessas áreas, a densidade aparente foi medida para as profundidades de 200, 400 e 600 mm, utilizando-se anel volumétrico que foi introduzido no solo através de uma sonda hidráulica, totalizando assim 60 amostras, ou seja 10 amostras por profundidade em área de plantio e em área de tráfego - Figura 41.

As amostras de solo foram levadas para a estufa onde permaneceram por 24 horas a 105° C. Em etapa seguinte, utilizando balança de precisão, foi feita a pesagem. Como toda a água foi retirada da amostra considerou-se o peso das partículas minerais e matéria orgânica dentro de um volume conhecido de 100 cm³. O produto do peso sobre o volume resultou na densidade em g.cm⁻³.

Figura 41 - Sonda hidráulica coletando amostra para análise de densidade



As densidades encontradas foram comparadas com a proposta apresentada pelo CTC na Tabela 6.

Tabela 6 – Limites de densidade aparente por grupamento de solo

Grupamento textural	Valor	Unidade
Latossolos argilosos (argila > 35%)	1,30	g.cm ⁻³
Latossolos médios (25 a 35% de argila)	1,50	g.cm ⁻³
Nitossolo e PVA* argissolos (B _t fortemente desenvolvido)	1,40	g.cm ⁻³
Neossolo Quartzarênico, latossolos arenosos e PVA arenoso/médio (argila no horizonte A)	1,60	g.cm ⁻³

* Argissolo vermelho amarelo

Fonte: CTC (2005)

Nesta mesma área (Área 1), foram realizadas medições de infiltração de água no solo comparando-se com área realizada por subsolador de 5 hastes. Para medir a infiltração de água no solo nos diferentes tratamentos, foi usado o sistema de duplo anel - Figura 42 - com 150 mm introduzido no solo e 150 mm de parte aérea. Através de uma régua graduada foi sendo avaliada a infiltração, marcando-se o tempo a cada vez que o compartimento central tinha adição de água até a sua borda. Ao todo foram realizadas 20 coletas, sendo 10 para a área destinada ao plantio e 10 para área destinada ao tráfego.

Figura 42 – Avaliação de taxa de infiltração



A Área 2 recebeu ensaio para avaliar as características geométricas das áreas destinadas ao plantio e ao tráfego, tendo como objetivo adequação ao STC, bem como o desenvolvimento do sistema radicular em plantio de inverno – julho e agosto.

Aos 120 DAP, foram abertas 5 trincheiras contendo duas áreas destinadas para o plantio (canteiro) e duas áreas onde não houve a mobilização de solo (local para tráfego) - Figura 43 - onde mediu-se a profundidade e largura tanto da área mobilizada quanto da área compactada, bem como o a profundidade de raízes.

Figura 43 – Trincheira para avaliação de características geométricas e desenvolvimento de sistema radicular em preparo localizado com canteirizador PSPC 1102



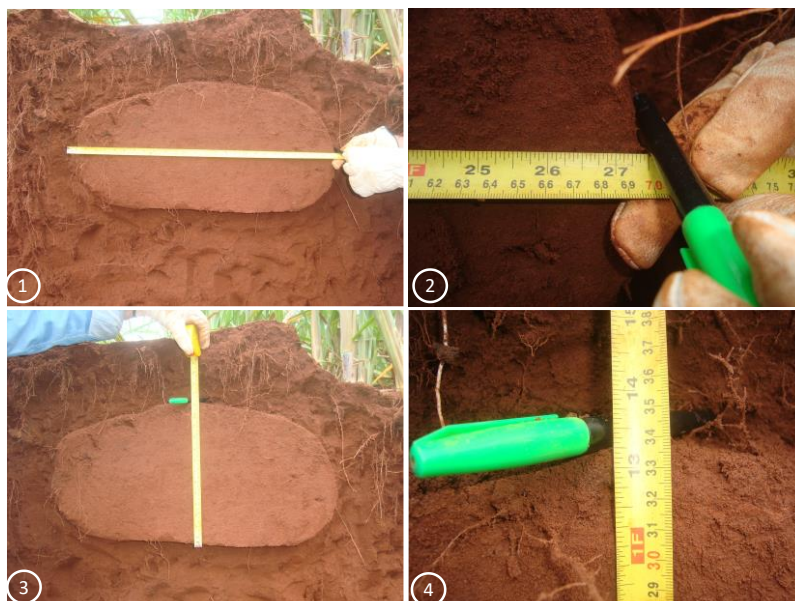
A Figura 44 ilustra como foram obtidas as dimensões de profundidade e largura obtidos no processo de canteirização. Neste caso, as medições apontaram em 500 mm de profundidade efetiva de trabalho das hastes do PSPC1102 e largura do canteiro de 510 mm.

Figura 44 – 1) Profundidade do canteiro; 2) Detalhe da medição profundidade do canteiro; 3) Largura do canteiro; 4) Detalhe da medição da largura do canteiro



A Figura 45 ilustra como foram realizadas as determinações das dimensões de largura e altura da área destinada ao tráfego controlado, sendo elas, neste caso, respectivamente de 700 mm e 340 mm.

Figura 45 - 1) Largura da área para tráfego controlado; 2) Detalhe da medição da largura da área destinada a tráfego controlado; 3) Altura da área de compactada para tráfego controlado; 4) Detalhe da medição da altura da área de compactada para tráfego controlado



A Figura 46 ilustra um exemplo de como as medições para avaliação da profundidade do sistema radicular foram realizadas.

Figura 46 – Profundidade do sistema radicular em preparo realizado com canteirizador



Focando em diferenças de qualidade operacional entre subsolagem e canteirização, foi realizada na Área 3, 61,02 ha de canteirização e 153,49 ha de subsolagem. Após 120 DAP, foi realizada a avaliação da profundidade de trabalho para a canteirização - Figura 47 - e para o preparo convencional utilizando-se o subsolador de

5 hastes - Figura 48. Para cada operação – canteirização e subsolagem – foram abertas 5 trincheiras sendo amostrados dois pontos por trincheira. Nas mesmas trincheiras, foram realizadas avaliações visuais de desenvolvimento de sistema radicular.

Figura 47 – Avaliação de qualidade operacional de preparo localizado 120 DAP. 1) região descompactada pelo canteirizador; 2) Compactação; 3) Região de solo sem compactação.

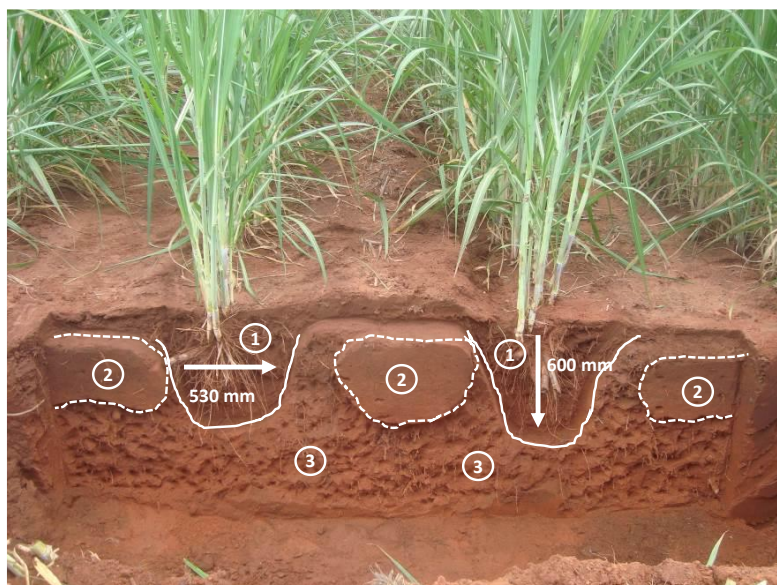


Figura 48 - Avaliação de qualidade operacional em área de preparo convencional utilizando subsolador de 5 hastes, espaçadas em 400 mm, a 120 DAP



Para consolidar o comparativo entre subsolagem e canteirização quanto a eficácia de romper camada compactada e consequentemente alcançar maior profundidade

de sistema radicular, a Área 4 recebeu preparo de solo usando canteirizador e subsolador de 5 hastes.

O plantio foi realizado em novembro e a 90 DAP, foi avaliado o desenvolvimento do sistema radicular. As amostras foram obtidas por meio de abertura de 5 trincheiras para cada operação, onde foram feitas 2 medições.

Em todas as análises utilizou-se para a avaliação de qualidade a Média Móvel Exponencialmente Ponderada – MMEP, conforme definido por Montgomery (2009) Equação 1.

$$z_i = \lambda * \sum_{j=1}^{i-1} (1 - \lambda)^j * x_{i-j} + (1 - \lambda)^i * z_0 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

z_i : valor estimado da MMEP;

z_0 : média alvo do processo;

x_i : valor da característica medida;

λ : é o peso considerado para a média, se refere à sensibilidade em captar pequenas mudanças na média.

Os limites de controle do gráfico MMEP são definidos pela Equação 2 e pela Equação 3.

$$LSC = \mu + L * \sigma * \sqrt{\frac{1}{(2 - \lambda)} * [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{Equação 2}$$

$$LIC = \mu - L * \sigma * \sqrt{\frac{1}{(2 - \lambda)} * [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

LSC: limite superior de controle;

LIC: limite inferior de controle;

μ : média geral;

L: largura da faixa entre a média e o limite;

σ : desvio padrão;

λ : fator de rigidez da análise;

i: 1, ..., i amostras.

A escolha dos parâmetros λ (fator de rigidez de análise) e L (múltiplo do desvio-padrão) para o procedimento de planejamento ótimo de um gráfico MMEP

consiste na seleção adequada desta combinação (λ , L) capaz de fornecer seu melhor desempenho (VOLTARELLI, 2015). Montgomery (2009) indica que na prática o intervalo de $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$ funcionam bem, sendo os valores de $\lambda=0,05$, $\lambda=0,10$, e $\lambda=0,20$ as escolhas mais populares; e $L=3$, ou seja, 3 vezes a variação do desvio padrão, funcionam bem. No entanto, quando λ pequeno, por exemplo, $\lambda = 0,1$, existe uma vantagem de reduzir a amplitude do limite de controle pela utilização de um L entre 2,6 e 2,8. O analista de processos deve ter em mente qual o menor valor de λ a se escolher para detectar pequenas variações ao longo do processo. Nas avaliações a opção foi utilizar $\lambda = 0,1$ e $L = 2,70$.

4.2 Modelagem de sistemas de preparo de solo

4.2.1 Modelagem de operações de preparo de solo

A modelagem operacional e econômica de sistemas de preparo de solo, terá como norte as operações descritas por Conde (2008) - Tabela 3 - realizando-se fusão entre o sistemas de preparo reduzido e semi-reduzido em função de necessidade de controle de pragas de solo, havendo necessidade de utilização de eliminador mecânico de soqueiras nos meses de junho a setembro - Tabela 73. A Figura 49, Figura 50, Figura 51 e Figura 52 ilustram o fluxograma das operações consideradas e permitem a observação que a aplicação de calcário e gesso são comuns em todos os sistemas, portanto não serão consideradas durante a análise.

Figura 49 – Sequência de operações no sistema de preparo convencional

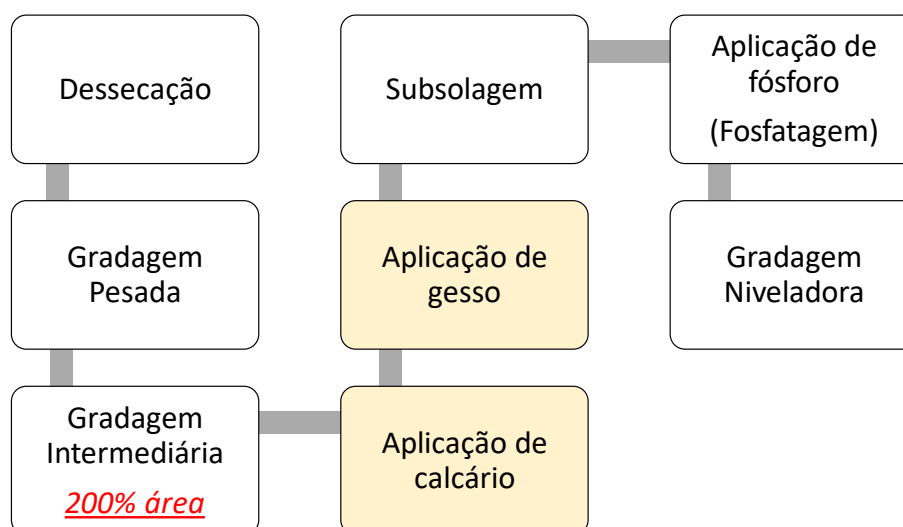
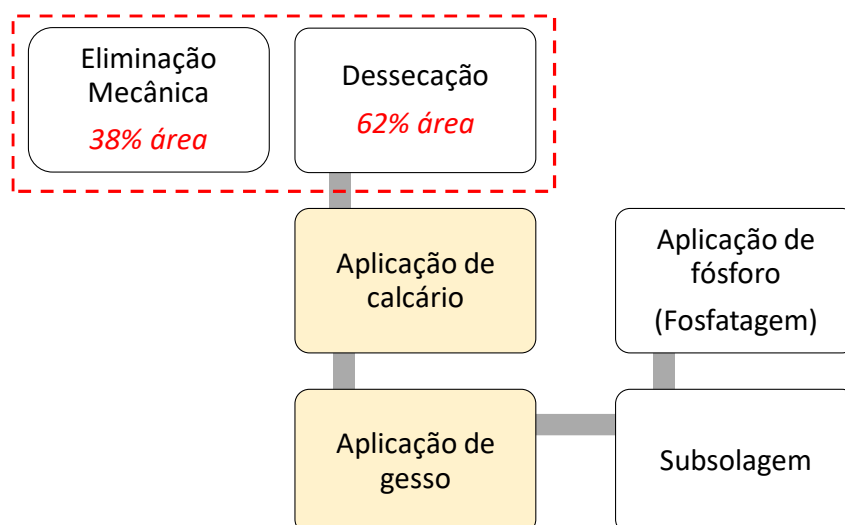


Figura 50 – Sequência de operações no sistema de preparo reduzido

Em linha com a abordagem da análise de STC, onde o objetivo é deixar linhas permanentes de tráfego, a utilização das operações de preparo localizado utilizando-se canteirizador ou subsolagem localizada será aplicada somente em substituição da subsolagem em preparo reduzido e semi-reduzido - Figura 51.

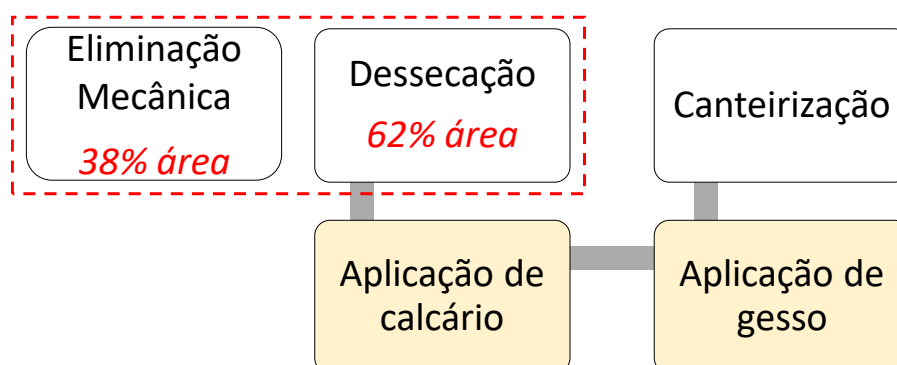
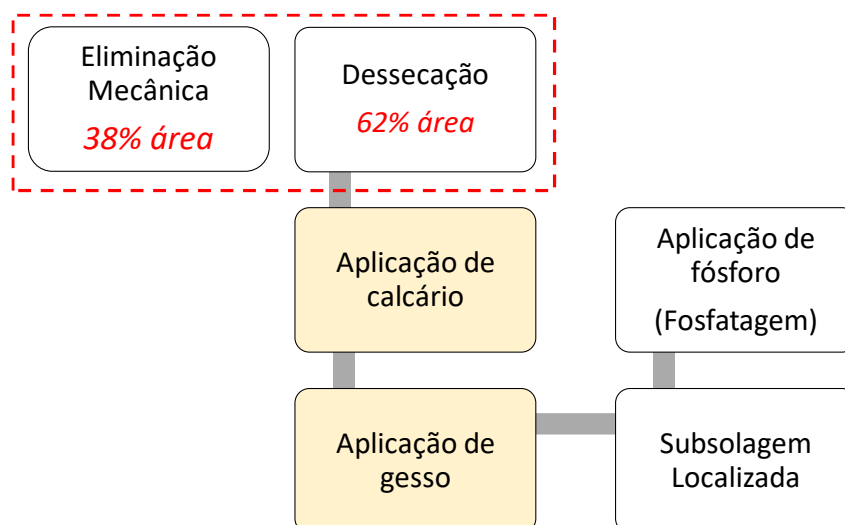
Figura 51 – Sequência de operações no sistema de preparo localizado associado ao canteirizador

Figura 52 – Sequência de operações no sistema de preparo localizado associado à subsolagem localizada



Para a modelagem operacional e econômica, considerou-se:

- ➔ Taxa de oportunidade de capital: 8,5% ao ano;
- ➔ Valor do combustível: 2,90 R\$ l⁻¹;
- ➔ Valor de lubrificante: 12,70 R\$ l⁻¹;
- ➔ Escala de trabalho: 5 x 1 em 2 turnos de 9:20 h;
- ➔ Absenteísmo: 1,5%
- ➔ Encargos sociais e demais benefícios que impactam em folha de pagamento: 80%;
- ➔ Valor do trator: 2.040 R\$.cv⁻¹.

Os parâmetros de definição de equipamentos, valores de aquisição, vida útil, valor residual e salário base são apresentados na Tabela 7.

As premissas operacionais estão na Tabela 8, referente a tempos logísticos na Tabela 9, de suprimentos de insumos na Tabela 10, relativas ao consumo operacional na Tabela 11 e suprimentos operacionais na Tabela 12.

Tabela 7 – Premissas financeira para modelagem de operações de preparo de solo

Operação	Descrição		Potência	Valor inicial (R\$)		Vida útil (anos)		Valor Residual (%V.I.)		Salário (R\$)
	Equipamento	Implemento	cv	Equipamento	Implemento	Equipamento	Implemento	Equipamento	Implemento	Operador
Dessecação	Automotriz		243	1.100.000	0	5	0	20%	0%	2.000
Gradagem pesada	Trator	Grade aradora 20 x 34"	220	448.800	56.000	10	10	20%	0%	1.700
Gradagem intermediária	Trator	Grade intermediária 30 x 28"	210	428.400	39.350	10	10	20%	0%	1.700
Gradagem niveladora	Trator	Grade niveladora 44 x 22"	220	448.800	30.500	10	10	20%	0%	1.700
Subsolagem	Trator	Subsolador de 5 hastes	250	510.000	42.000	10	10	20%	0%	1.700
Canteirização	Trator	Canteirizador	230	469.200	180.000	10	10	20%	0%	1.700
Subsolagem localizada	Trator	Subsolador 4 hastes	200	408.000	42.000	10	10	20%	0%	1.700
Aplicação de fósforo	Caminhão	Implemento aplicação	250	350.000	180.000	10	10	25%	0%	1.700
Erradicação mecânica	Trator	Erradicador mecânico	200	408.000	70.000	10	10	20%	0%	1.700

Tabela 8- Premissas operacionais para operações de preparo de solo

Operação	Velocidade km h ⁻¹	Largura de trabalho m	Comprimento de percurso m	Tempo de manobra s	Manobra Auxiliar min dia ⁻¹	Deslocamento abastecimento min dia ⁻¹
Dessecação	10,0	24,0	500,0	70,0	40,0	0,0
Gradagem pesada	4,0	3,2	500,0	60,0	60,0	0,0
Gradagem intermediária	6,0	3,9	500,0	60,0	60,0	0,0
Gradagem niveladora	8,0	4,3	500,0	60,0	60,0	0,0
Subsolagem	4,0	2,3	500,0	60,0	60,0	0,0
Canteirização	4,5	3,0	500,0	60,0	60,0	0,0
Subsolagem localizada	5,0	3,0	500,0	60,0	60,0	0,0
Aplicação de fósforo	10,0	10,0	500,0	60,0	60,0	0,0
Erradicação mecânica	3,5	3,0	500,0	60,0	60,0	0,0

Tabela 9 – Premissas de tempos logísticos para operações de preparo de solo (min dia⁻¹)

Operação	Refeição/café Higiene pessoal	Troca de Turno	Intervalo entre último e primeiro turno	Mudança de Área	Horas improdutivas
Dessecação	120,0	20,0	320,0	15,0	15,0
Gradagem pesada	120,0	20,0	320,0	30,0	15,0
Gradagem intermediária	120,0	20,0	320,0	30,0	15,0
Gradagem niveladora	120,0	20,0	320,0	30,0	15,0
Subsolagem	120,0	20,0	320,0	30,0	15,0
Canteirização	120,0	20,0	320,0	30,0	15,0
Subsolagem localizada	120,0	20,0	320,0	30,0	15,0
Aplicação de fósforo	120,0	20,0	320,0	20,0	15,0
Erradicação mecânica	120,0	20,0	320,0	30,0	15,0

Tabela 10 – Premissas para suprimento de insumos para operações de preparo de solo (min dia⁻¹)

Operação	Corretivos		Inseticida		Herbicida	
	Deslocamento	Abastecimento	Deslocamento	Abastecimento	Deslocamento	Abastecimento
Dessecação	0,0	0,0	0,0	0,0	105,0	28,0
Gradagem pesada	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gradagem intermediária	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gradagem niveladora	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subsolagem	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Canteirização	24,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subsolagem localizada	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aplicação de fósforo	185,0	80,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erradicação mecânica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 11 – Premissas consumo operacional para operações de preparo de solo

Operação	Combustível l h⁻¹	Lubrificante l h⁻¹	Manutenção equipamento %V.I.	Manutenção implemento %V.I.	Manutenção min dia⁻¹
Dessecação	12,00	0,10	12%	0%	360,0
Gradagem pesada	20,00	0,12	12%	18%	288,0
Gradagem intermediária	20,00	0,12	12%	18%	288,0
Gradagem niveladora	20,00	0,12	12%	18%	288,0
Subsolagem	20,00	0,12	12%	10%	288,0
Canteirização	20,00	0,12	12%	20%	288,0
Subsolagem localizada	20,00	0,12	12%	10%	288,0
Aplicação de fósforo	20,00	0,12	12%	10%	288,0
Erradicação mecânica	20,00	0,12	12%	20%	288,0

Tabela 12 – Premissas de suprimentos operacionais para operações de preparo de solo (min dia⁻¹)

Operação	Abastecimento	Aferição de dosagem	Limpeza	Lubrificação	Limpeza de bico	Checklist
Dessecação	20,0	20,0	20,0	10,0	20,0	15,0
Gradagem pesada	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	10,0
Gradagem intermediária	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	10,0
Gradagem niveladora	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	10,0
Subsolagem	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	10,0
Canteirização	20,0	5,0	20,0	20,0	0,0	10,0
Subsolagem localizada	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	10,0
Aplicação de fósforo	20,0	5,0	20,0	20,0	0,0	10,0
Erradicação mecânica	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	10,0

Importante mencionar a hipótese relacionada quanto a aplicação de fósforo como corretivo, também conhecida como fosfatagem. De acordo com Penatti (2013) os solos brasileiros são pobres em fósforo, havendo necessidade de aplicação de 150 kg de P_2O_5 ha^{-1} , utilizando-se MAP - fosfato monoamônico – como fonte de fósforo a dosagem recomenda é de 290 kg. ha^{-1} . Dada a baixa mobilidade do fósforo no solo associado a linha de tráfego permanente do STC, durante a operação de canteirização, a proposta é realizar concomitantemente a aplicação de MAP o qual será incorporado pela enxada rotativa a profundidade de 150 mm. Como o canteiro obtido é de 800 mm - 53% da área preparada -, a dosagem de MAP segue a mesma proporção, passando para 150 kg. ha^{-1} .

Os insumos e dosagens utilizados, são apresentados na Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15.

Tabela 13 – Insumos utilizados no sistema de preparo convencional

Operação	Insumos	Unidade	Dosagem unidade ha^{-1}	Valor R\$.unidade $^{-1}$
Dessecação	Glifosato	l	5,0	22,0
Aplicação de fósforo	MAP	t	0,29	1.850,0

Tabela 14 – Insumos utilizados no sistema de preparo reduzido e localizado associado a subsolagem localizada

Operação	Insumos	Unidade	Dosagem unidade ha^{-1}	Valor R\$.unidade $^{-1}$
Dessecação	Glifosato	l	5,0	22,0
Aplicação de fósforo	MAP	t	0,29	1.850,0

Tabela 15 – Insumos utilizados no sistema de preparo localizado com canteirizador

Operação	Insumos	Unidade	Dosagem unidade ha^{-1}	Valor R\$.unidade $^{-1}$
Dessecação	Glifosato	l	5,0	22,0
Canteirização	MAP	t	0,15	1.850,0

A Tabela 16 apresenta a lista de variáveis utilizadas para a modelagem operacional e econômica das operações de preparo de solo.

Tabela 16 – Variáveis definidas para as equações utilizadas na modelagem de operações de preparo de solo

Variável	Sigla	Unidade
Premissas financeiras		
Taxa de oportunidade	TO	% a.a.
Combustível	Vcomb	R\$ l ⁻¹
Lubrificantes	Vlub	R\$ l ⁻¹
Lubrificante implemento	LI	R\$ l ⁻¹
Valor inicial do equipamento	VIE	R\$
Vida útil equipamento	VUE	anos
Valor residual equipamento	VRE	%
Seguros e licenças equipamento	SLE	%
Folguistas	F	%
Absenteísmo	A	%
Encargos sociais	Enc	%
Salário	Sal	R\$ mês ⁻¹
Valor inicial do implemento	VII	R\$
Vida útil implemento	VUI	anos
Valor residual implemento	VRI	%
Consumo operacional		
Combustível	Comb	l h ⁻¹
Lubrificante	Lub	l h ⁻¹
Lubrificante implemento	Lubimp	l/h
Manutenção	Man	% VIE
Manutenção implemento	Manimp	% VII
Premissas operacionais		
Comprimento de percurso	CT	m
Largura de trabalho	L _{trabalho}	m
Velocidade operacional preparo	V _{op} _{prep}	km h ⁻¹
Dias uteis preparo	DU _{prep} ⁴	dias
Tempos logísticos		
Manobra fim de linha	TM	segundos.manobra ⁻¹
Manobra auxiliar	Maux	min dia ⁻¹
Deslocamento abastecimento	Dab	min dia ⁻¹
Turnos de trabalho	TT	turnos dia ⁻¹
Paradas para refeição	PR	min turno ⁻¹
Troca de turno preparo	TTTp	min dia ⁻¹
Intervalo entre turnos	I _{Turno}	min dia ⁻¹
Mudança de área	MA	min dia ⁻¹
Horas improdutivas preparo	Himp _{prep}	min dia ⁻¹
Deslocamento abastecimento corretivo	Dabc	min dia ⁻¹
Deslocamento abastecimento inseticida	Dabi	min dia ⁻¹
Deslocamento abastecimento herbicida	Dabh	min dia ⁻¹
Abastecimento de corretivo	Abc	min dia ⁻¹
Abastecimento de inseticida	Abi	min dia ⁻¹
Abastecimento de herbicida	Abh	min dia ⁻¹
Tempos de manutenção		
Manutenção	Man _{prep}	h
Tempos suprimentos operacionais		
Abastecimento combustível	Abas _{comb}	min dia ⁻¹
Aferição de dosagem	Afer _{dos}	min dia ⁻¹
Limpeza de equipamentos	Leq	min dia ⁻¹
Lubrificação	Lub	min dia ⁻¹
Desentupimento de bico	D _{bico}	min dia ⁻¹

⁴ Ver Tabela 73.

Variável	Sigla	Unidade
Checklist	Check	min dia ⁻¹

4.2.2 Modelagem de evolução de canavial para análise de sistemas de preparo de solo

Modelou-se 10 anos de evolução de canavial partindo-se da premissa que o efeito em aumento de TCH da implantação SPLC ou SPLS realizado no ano 1, será verificado na colheita do 1º corte no ano 2 e assim sucessivamente - Tabela 17.

Tabela 17 – Calendário de impacto da adoção de SPLC ou SPLS

	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Introdução	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5	Área 6	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
1º Corte		Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5	Área 6	Área 1	Área 2	Área 3
2º Corte			Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5	Área 6	Área 1	Área 2
3º Corte				Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5	Área 6	Área 1
4º Corte					Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5	Área 6
5º Corte						Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5

Para a elaboração do modelo de evolução do canavial foram realizadas as seguintes considerações: Processamento total: 2.715.525 Mg, sendo a participação de cana própria de 65,83%⁵;

- ➔ Produtividade base:
 - ➔ Produtividade de 1º Corte: 108,20 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 2º Corte: 102,85 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 3º Corte: 97,5 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 4º Corte: 91,28 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 5º Corte: 83,52 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de viveiros: 75,00 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Consumo de cana para plantio: 10,00 Mg ha⁻¹.
- ➔ Longevidade: 5 cortes - após o 5º Corte a área entra no processo de erradicação de canavial;
- ➔ Plantio: Ciclo de 18 meses - plantio realizado entre janeiro e maio e colhido a partir de abril do ano subsequente;
- ➔ Canavial estabilizado: necessidade de áreas estabilizada para atender a produção de matéria-prima.

⁵ Capacidade média de processamento de unidade de bioenergia localizada no Centro-sul PECEGE (2020). A participação em volume de cana própria segue o mesmo critério.

Tabela 18 – Variáveis definidas para as equações utilizadas na modelagem para evolução do canavial

Variável	Sigla	Unidade
Capacidade de processamento industrial	Moagem _{safr}	t.ano ⁻¹
Participação cana própria	Cana _{própria}	%
Produtividade 1ºCorte	TCH ₁	t ha ⁻¹
Produtividade 2ºCorte	TCH ₂	t ha ⁻¹
Produtividade 3ºCorte	TCH ₃	t ha ⁻¹
Produtividade 4ºCorte	TCH ₄	t ha ⁻¹
Produtividade 5ºCorte	TCH ₅	t ha ⁻¹
Produtividade de viveiros	TCH _v	t ha ⁻¹
Longevidade do canavial	Longevidade	ano
Consumo de cana para plantio	Consumo _{muda}	t ha ⁻¹

A modelagem da evolução do canavial possibilita a construção de cenários tendo a variação de áreas - Área_{total}, Área_{plantio} e Área_{tratos} – associadas a custos operacionais como resultado. Assim, Os custos de produção utilizados estão apresentados na Tabela 19, sendo que em formação de lavoura a base referência será o SPC e, para os demais custos de formação, serão descontadas as diferenças de custo observadas entre o SPC e sistema de preparo em análise.

Tabela 19 – Custos de produção de cana-de-açúcar (R\$ ha⁻¹) das usinas na região Centro-Sul, safra 2019/2020

Descrição	R\$ ha ⁻¹
Administrativo agrícola	262,90
Arrendamento	1.380,43
Tratos culturais de soqueira	2.229,84
Formação de lavoura	9.634,00
<i>Preparo de solo</i>	2.612,00
<i>Plantio</i>	5.055,00
<i>Tratos culturais de cana planta</i>	1.967,00

Fonte: PECEGE (2020)

Conhecendo-se as áreas e seus custos associados, é possível a construção de fluxo de caixa (FC) para cada um dos sistemas de preparo em análise – convencional, reduzido e localizado. Os fluxos de caixa são:

- ➔ Fluxo de caixa de arrendamento -FC_{Arrendameto};
- ➔ Fluxo de caixa de tratos culturais de soqueira -FC_{Tratos};
- ➔ Fluxo de caixa de formação de lavoura -FC_{Lavoura};
- ➔ O somatório dos fluxos de caixa acima resultará no fluxo de caixa para cada dos sistemas de preparo – FC_{SPC}, FC_{SPR}, FC_{SPLC} e FC_{SPLS};

- ➔ Ao final, utilizando o conceito de fluxo de caixa descontado, os valores totais são calculados pela metodologia de *Valor presente líquido* – VPL - Equação 4.

$$VPL = \sum_{n=1}^{10} \frac{FC}{(1 + TO)^n} \quad \text{Equação 4}$$

4.3 Modelagem do sistema de colheita mecanizada

A expansão das lavouras de cana-de-açúcar no Brasil favorece a utilização do sistema de colheita mecanizada, contudo as diferenças de relevo, solo e clima das regiões produtoras impactam na tomada de decisão pois afetam a capacidade operacional e econômico e qualidade da matéria-prima colhida (RAMOS, 2016).

Para auxiliar a tomada de decisão no planejamento das operações de CCT, uma das alternativas é utilizar a simulação computacional. As vantagens da simulação derivam do conhecimento prévio do desempenho dos sistemas e da possibilidade de manipular cenários para testar situações de interesse. Assim, uma vez que o modelo é validado, é possível submetê-lo a diversas condições operacionais e avaliar o resultado de diferentes cenários. A avaliação prévia de cenários, sem implementá-los, permite reduzir erros, compreender como os recursos interagem e explorar previamente as particularidades dos sistemas para auxiliar a decisão (SILVA et al., 2011).

A modelagem proposta neste trabalho tem como base conjunto de informações obtidas por de ferramentas da agricultura digital – computadores de bordo e telemetria -, do qual foram deduzidas fórmulas para análise operacional e econômica, utilizando-se o software Excel® para cálculo de seus resultados e análise de cenários.

4.3.1 Agricultura digital empregada

4.3.1.1 Computadores de bordo

Para o levantamento dos tempos e movimentos para avaliação de desempenho de colhedora de cana-de-açúcar, foram utilizados os computadores de bordo MAG 100R e MAG 300 da Solinftec®.

O MAG 100 e o MAG 300 são computadores de bordo que permitem integração com o sistema de telemetria Solinftec®, projetado com características mecânicas e eletrônicas que permitem a interação com o operador por meio de entrada de dados de operações/atividades, informações e alertas bem como o monitoramento do equipamento agrícola, oferecendo as seguintes funcionalidades:

- ➔ Rastreamento: rastro com relação de pontos, posição por direção (avenida, rua, cidade etc.), posição no mapa, posição por cerca virtual, criação de regras para eventos operacionais.
- ➔ Monitoramento e controle, por estado de automóveis, ônibus, caminhões, maquinários agrícolas, e outros veículos.
- ➔ Monitoramento das condições do veículo.

O MAG 300 permite:

- ➔ Medir eventos: pressão no corte de base; rpm do motor; sinal de motor ligado; sinal de esteira ligada; sinal de implementos ligados; sinal de manual/automático do sistema copiador de solo; sinal do nível do óleo hidráulico; horímetro; sinais do gps (velocidade, data, hora, longitude, latitude); sinal gprs para a transmissão de dados.
- ➔ Estados operacionais: operando; manobra e deslocamento.
- ➔ Digitação de dados: identificação do operador; apontamentos; identificação de parada; identificação de manobra; identificação de manutenção.

As principais operações que são apontadas utilizando o computador de bordo podem ser encontradas na Tabela 69 – Anexo 1. Para facilitar a análise as operações são agrupadas por grupo de operação, que pode ser exemplificado pelos relatórios apresentados no Anexo 2.

4.3.1.2 Sistema de gerenciamento de processos automatizados (SGPA)

O SGPA (Sistema de Gerenciamento de Processos Automatizados) é um sistema de gerenciamento das atividades e de comunicação direta com todos os equipamentos que possuem o computador de bordo da Solinftec®. Neste sistema é possível efetuar vários tipos de cadastros, bem como monitorar todos os processos em tempo real, além de realizar consultas de todas as ocorrências através de relatórios do sistema. No monitoramento, existem várias funções, como por exemplo, estatísticas das informações (técnicas e operacionais) dos equipamentos, alarmes informativos de problemas ou avisos definidos por regra; pode-se gerar rastros dos trajetos feitos pelos equipamentos, e até enviar mensagens e comandos online ao computador de bordo, a fim de que se possa enviar uma informação ao condutor e ter melhores resultados ao gerir o sistema de trabalho da empresa. O sistema tem a característica de ser web, ou seja, pode

ser acessado de qualquer terminal que possua uma comunicação com a internet, e por qualquer navegador de internet (BÉRGAMO, 2020).

4.3.2 Índice de colheitabilidade

O índice de colheitabilidade (IC), foi calculado levando em consideração as operações básicas realizadas pelas colhedoras autopropelidas – Capítulo 3.8.1 – e os parâmetros apresentados na Tabela 20.

Tabela 20- Índice de colheitabilidade

Parâmetro	Critério de avaliação
Produtividade agrícola	t ha ⁻¹
Comprimento de percurso	distância percorrida pela colhedora sem necessidade de manobra, expressa em metros lineares
Declividade do terreno	Expressa em percentual de declive
Ocorrência de pedras e tocos	Avaliação visual ou por meio de histórico da área
Ocorrência de erosão	Avaliação visual ou por meio de histórico da área
Ocorrência de ervas daninhas	Avaliação visual ou por meio de histórico da área
Nivelamento do terreno	Avaliação visual ou por meio de histórico da área
Tombamento da cana	Avaliação visual

A estimativa da produtividade foi calculada segundo Landell e Bressiani (2008) de acordo com a Equação 5.

$$TCH = \frac{d^2 * Colm * h * (0,007854)}{Esp} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

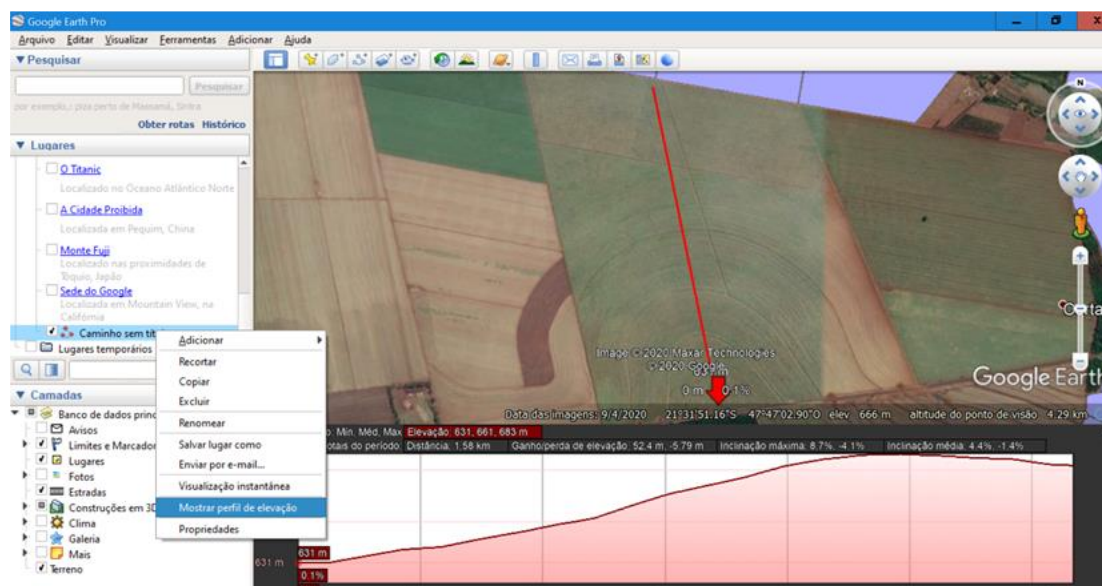
- ➔ TCH: produção de cana-de-açúcar (t ha⁻¹)
- ➔ h: altura do colmo (cm). Medido da base de inserção da folha +1 (determinada segundo critério de Kuijper), amostrando cinco colmos seguidos na linha;
- ➔ d: diâmetro do colmo (cm). Medidos nos cinco colmos utilizados para definir a altura, mensurado na altura dada por um terço de comprimento do colmo;
- ➔ Colm: número de colmos em um metro linear.
- ➔ Esp: espaçamento entre linhas (m)

O comprimento de percurso e declividade do terreno são obtidos na etapa de planejamento da base física. A declividade, por ser importante fator na definição do IC, pode ser obtida por meio do aplicativo O Google Earth ⁶. Para isto basta abrir o

⁶ Software desenvolvido e distribuído pela empresa estadunidense do Google cuja função é apresentar modelo tridimensional do globo terrestre, construído a partir de mosaico de imagens de satélite obtidas de fontes diversas, imagens aéreas (fotografadas de aeronaves) e GIS 3D. Desta

aplicativo, localizar a área em estudo, inserir um caminho e utilizar a ferramenta Mostrar Perfil de Elevação (Figura 53).

Figura 53- Utilização do aplicativo Google Earth para avaliação de declividade



A análise de ocorrência de erosão, ervas daninhas, nivelamento do terreno e tombamento da cana - Figura 54, Figura 55 e Figura 56 - são realizadas por meio de análise visual ou histórico da área.

Figura 54- 1) Canavial sem ocorrência de fatores que prejudicam a colheabilidade. 2) Canavial com alta ocorrência de plantas daninhas. 3) Impacto das plantas daninhas na colhedora

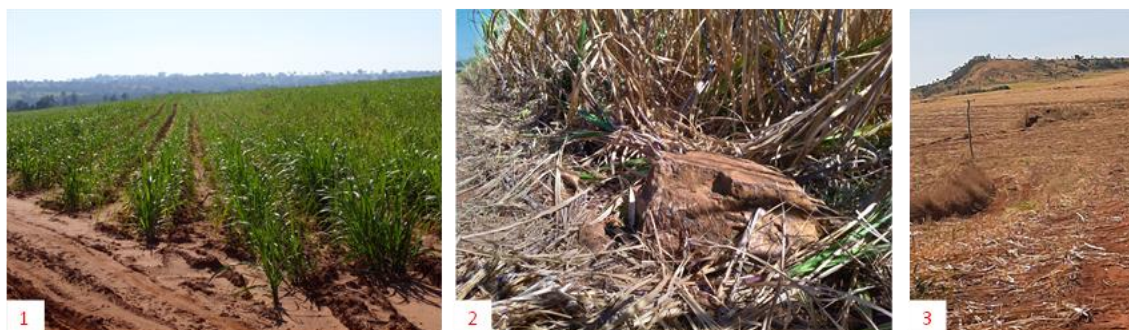


forma, o programa pode ser usado simplesmente como um gerador de mapas bidimensionais e imagens de satélite ou como um simulador das diversas paisagens presentes no Planeta Terra. Com isso, é possível identificar lugares, construções, cidades, paisagens, entre outros elementos (fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Google_Earth).

Figura 55 – 1) Canavial ereto e sem ocorrência de fatores que prejudicam a colheita mecanizada. 2) Canavial com maioria dos colmos tombados. 3) Canavial com todos os colmos tombados



Figura 56 – 1) Canavial nivelado e sistematizado. 2) Canavial com ocorrência de pedras. 3) Canavial em área com erosão



A avaliação do IC é realizado conforme descrito na Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 21- Parâmetros de definição de velocidade de colhedora

Parâmetro	Observação	Nota	Velocidade máxima km h ⁻¹
Declividade	Até 8%	1	6,0
	Até 12%	2	5,0
	Até 14%	3	3,0
	Acima 14%	4	2,5
Ocorrência de pedras e tocos	Sem ocorrência	1	6,0
	Alguma ocorrência	2	5,0
	Alta ocorrência	3	3,0
	Ocorrência severa	4	2,5
Ocorrência de erosão	Sem ocorrência	1	6,0
	Alguma ocorrência	2	5,0
	Alta ocorrência	3	3,0
	Ocorrência severa	4	2,5

Os valores apresentados na Tabela 21 estão ligados a segurança operacional, ou seja, estado em que o risco de lesões às pessoas ou de danos aos bens se reduz e se mantém em um nível aceitável, ou abaixo deste.

Tabela 22 - Parâmetros de avaliação de índice de colheabilidade

Parâmetro	Observação	Nota	Impacto na capacidade operacional
Ocorrência de ervas daninhas	Sem infestação	1	Não há impacto
	Alguma infestação	2	10,0 %
	Alta infestação	3	30,0%
	Infestação severa	4	50,0%
Nivelamento do terreno	Nivelado	1	Não há impacto
	Mediamente nivelado	2	2,5%
	Não nivelado	3	7,5%
Tombamento da cana	Ereto	1	Não há impacto
	Alguns colmos tombados	2	5,0%
	Maioria dos colmos tombados	3	50,0%
	Todos os colmos tombados	4	70,0%

O impacto na capacidade operacional (ICO) resultará no IC, à medida que para cada impacto observado o capacidade operacional nominal da colhedora (RN) sofrerá ajustes para adequar-se as condições operacionais vigentes.

A Tabela 21 e a Tabela 22 , apresentam sugestões de parâmetros para avaliação do IC, podendo os mesmos serem ajustados de acordo com a experiência de cada profissional responsável pela colheita em unidade agroindustrial. O objetivo é utilizar o conceito para definir a estratégia de colheita com a finalidade de abastecimento constante da planta industrial. Um exemplo de como pode ser realizado o cálculo do IC pode ser encontrado no Anexo 5.

4.3.3 Modelagem de operações do sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar

A abordagem proposta para definir ao desempenho da colhedora de cana-de-açúcar está baseada na capacidade de processamento dos órgãos ativos da colhedora em processar a matéria-prima associado a características de campo definidos pelo IC.

Como as operações do sistema de colheita mecanizada são interdependentes - Figura 21 -, também foi realizada a modelagem das operações de carregamento e transporte de cana-de-açúcar, sendo as variáveis apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Variáveis definidas para as equações utilizadas na modelagem de operações de corte, carregamento e transporte

Variável	Sigla	Unidade
Premissas gerais		
Dias de safra	DS	dia
Aproveitamento agroindustrial	AA	%
Moagem horária	M _{hora}	t h ⁻¹
Premissas financeiras		
Taxa de oportunidade	TO	% a.a.
Combustível	Vcomb	R\$ l ⁻¹
Lubrificantes	Vlub	R\$ l ⁻¹
Valor inicial do equipamento	VIE	R\$
Vida útil equipamento	VUE	Anos
Valor residual equipamento	VRE	%
Folguistas	F	%
Absenteísmo	A	%
Encargos sociais	Enc	%
Salário	Sal	R\$ mês ⁻¹
Valor inicial do implemento	VII	R\$
Vida útil implemento	VUI	Anos
Valor residual implemento	VRI	%
Consumo operacional		
Combustível	Comb	l h ⁻¹
Combustível caminhão	Comb _{cam}	km.l ⁻¹
Lubrificante	Lub	l h ⁻¹
Lubrificante implemento	Lub _{imp}	l/h
Manutenção	Man	% VIE
Manutenção implemento	Man _{imp}	% VII
Premissas operacionais		
Produtividade canavial	TCH	t ha ⁻¹
Comprimento de percurso	CT	M
Espaçamento entre fileiras	Esp	M
Linhas colhidas simultâneas	NL	quantidade
Índice colheita corrigido	ICC	%
Capacidade nominal	RN	t h ⁻¹
Velocidade máxima colhedora	Vmax	km h ⁻¹
Capacidade Transbordo	Ctrans	T
Número de frentes	Nfre	quantidade
Distância frentes	Raio	Km
Densidade de carga	D _{carga}	t.implemento ⁻¹
Composição	Semi	semireboque.caminhão ⁻¹
Distância bate/volta	Dist _{bv}	Km
Velocidade vazio	V _{vaz}	km h ⁻¹
Velocidade carregado	V _{car}	km h ⁻¹
Velocidade caminhão bate/volta carregado	Vbv _{car}	km h ⁻¹

Variável	Sigla	Unidade
Velocidade caminhão bate/volta vazio	Vb _{vaz}	km h ⁻¹
Tempos logísticos		
Manobra fim de linha	TM	segundos.manobra ⁻¹
Manobra auxiliar	Maux	min dia ⁻¹
Deslocamento abastecimento	Dab	min dia ⁻¹
Horas improdutivas	Himp	min dia ⁻¹
Turnos de trabalho	TT	turnos dia ⁻¹
Paradas para refeição	PR	min turno ⁻¹
Troca de turno	TTT	min turno ⁻¹
Mudança de área	MA	min dia ⁻¹
Deslocamento vazio	Dvaz	Min
Deslocamento carregado	D _{car}	Min
Transferência de carga	T _{carga}	Min
Engate/desengate – Usina	T _{usina}	Min
Engate/desengate - Campo	T _{campo}	Min
Estoque de cana	Estoq	H
Engate/desengate bate/volta	T _{edbv}	Min
Pesagem	T _{peso}	Min
Amostragem	T _{amostra}	Min
Descarregamento	T _{descarga}	Min
Tempos de manutenção		
Intervalo entre manutenções em campo	IMC	H
Duração manutenção em campo	DMC	Min
Intervalo manutenção na oficina	IMO	H
Duração manutenção em oficina	DMO	Min
Disponibilidade de caminhões	DISP _{CAM}	%
Tempos suprimentos operacionais		
Intervalo de abastecimento	IA	H
Duração abastecimento	Dab	Min
Intervalo entre lubrificação	Ilub	H
Duração lubrificação	Dlub	Min
Intervalo troca de facas	Ifaq	h dia ⁻¹
Duração troca facas	Dfaq	min.troca ⁻¹
Limpeza de equipamentos	Leq	min dia ⁻¹
Checklist	Check	min dia ⁻¹
Checklist pneu	Check _{pneu}	min dia ⁻¹
Abastecimento caminhão	T _{acam}	min dia ⁻¹
Lubrificação caminhão	T _{lcam}	min dia ⁻¹

Os dados de entrada utilizados no modelo obtido para as operações de corte, carregamento e transporte estão dispostos na Tabela 24, Tabela 25, Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30.

Tabela 24- Premissas gerais utilizadas no modelo de sistema de colheita mecanizada

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Dias de safra (DS)	dia		244	
Aproveitamento agroindustrial (AA)	%		82%	
Moagem horária (M_{hora})	t h ⁻¹		565	

Tabela 25 – Premissas financeiras utilizadas no modelo de sistema de colheita mecanizada

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Taxa de oportunidade (TO)	% a.a.		8,50%	
Valor do combustível (Vcomb)	R\$ l ⁻¹		2,90	
Valor lubrificantes (Vlub)	R\$ l ⁻¹		12,70	
Valor inicial do equipamento (VIE)	R\$	1.050.000	438.600	500.000
Vida útil equipamento (VUE)	anos	7	10	5
Valor residual equipamento (VRE)	%	25%	20%	20%
Folguistas (F)	%	16,7%	16,7%	16,7%
Absenteísmo (A)	%	1,5%	1,5%	1,5%
Encargos sociais (Enc)	%	70,0%	70,0%	70,0%
Salário (Sal)	R\$ mês ⁻¹	2.200,00	2.000,00	2.200,00
Valor inicial do implemento (VII)	R\$		220.000	240.000
Vida útil implemento (VUI)	anos		10	7
Valor residual implemento (VRI)	%		10%	10%

Tabela 26 – Consumo operacional de operações de sistema de colheita mecanizada

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Combustível (Comb)	l h ⁻¹	35,00	9,50	
Combustível caminhão (Comb _{cam})	km.l ⁻¹			1,10
Lubrificante (Lub)	l h ⁻¹	0,10	0,15	
Lubrificante implemento (Lub _{imp})	l h ⁻¹		0,05	
Manutenção (Man)	% VIE	30%	10%	15%
Manutenção implemento (Man _{imp})	% VII		10%	10%

Tabela 27 – Premissas operacionais para operações de sistema de colheita mecanizada

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Produtividade do canavial (TCH)	t ha ⁻¹		76,46 ⁷	
Comprimento de percurso (CT)	m		500,00	
Espaçamento entre fileiras (Esp)	m		1,50	
Linhas colhidas simultâneas (NL)	quantidade	1,00		
Índice colheita corrigido (ICC)	%	19%		

⁷ Indicador obtido pelo PECEGE (2020) que corresponde à média amostrada na safra 2019/2020 para o Centro-Sul.

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Capacidade nominal (RN)	t h ⁻¹	130,00		
Velocidade máxima colhedora (V _{max})	km h ⁻¹	6,00		
Capacidade Transbordo (C _{trans})	t		19,00	
Número de frentes (N _{fre})	quantidade			6
Distância frentes (Raio)	km			30,00
Densidade de carga (D _{carga})	t implemento ⁻¹			35,00
Composição (Semi)	semirreboque caminhão ⁻¹			2
Distância bate/volta (Dist _{bv})	km			0,4
Velocidade caminhão bate/volta vazio (V _{vaz})	km h ⁻¹			30,00
Velocidade carregado (V _{car})	km h ⁻¹			30,00
Velocidade caminhão bate/volta carregado (V _{bv_{car}})	km h ⁻¹			5,00
Velocidade caminhão bate/volta vazio (V _{bv_{vaz}})	km h ⁻¹			5,00

Tabela 28 – Tempos logísticos para operações de sistema de colheita mecanizada

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Manobra fim de linha (TM)	segundos.manobra ⁻¹	110		
Manobra auxiliar (Maux)	min dia ⁻¹	44,0		
Deslocamento abastecimento (Dab)	min dia ⁻¹	10,0		
Horas improdutivas (Himp)	min dia ⁻¹	110,0	15,0	
Turnos de trabalho (TT)	turnos dia ⁻¹	3	3	3
Turnos de trabalho (PR)	min turno ⁻¹	30,0	30,0	30,0
Troca de turno (TTT)	min turno ⁻¹	12,0	12,0	10,0
Mudança de área (MA)	min dia ⁻¹	35,0	34,0	
Deslocamento vazio (D _{vaz})	min		9,0	
Deslocamento carregado (D _{car})	min		8,0	
Transferência de carga (T _{carga})	min		5,0	
Engate/desengate – Usina (T _{usina})	min			25,0
Engate/desengate – Campo (T _{campo})	min			25,0
Estoque de cana (Estoq)	h			2,0
Engate/desengate bate/volta (T _{edbv})	min			1,0
Pesagem (T _{peso})	min			4,0
Amostragem (T _{amostra})	min			6,0
Descarregamento (T _{descarga})	min			9,0

Tabela 29 – Tempos de manutenção de operações de sistema de colheita mecanizada

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Intervalo entre manutenções em campo (IMC)	h	15,00	24,00	
Duração manutenção em campo (DMC)	min	110	100	
Intervalo manutenção na oficina (IMO)	h	900,0	230,00	

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Duração manutenção em oficina (DMO)	min	1.500	1.110	
Disponibilidade de caminhões (DISP _{CAM})	%			85,0%

Tabela 30 - Tempos de suprimentos operacionais para sistema de colheita mecanizada

Variável	Unidade	Corte	Carregamento	Transporte
Intervalo de abastecimento (IA)	h	24,00	24,00	
Deslocamento abastecimento (Dab)	min	24,00	20,00	
Intervalo entre lubrificação (Ilub)	h	24,00	24,00	
Duração lubrificação (Dlub)	min	10,00	30,00	
Intervalo troca de facas (Ifaq)	h dia ⁻¹	18,00		
Duração troca facas (Dfaq)	min.troca ⁻¹	30,00		
Limpeza de equipamentos (Leq)	min dia ⁻¹	60,00	15,00	30,00
Checklist (Check)	min dia ⁻¹	21,00	21,00	10,00
Check pneu (Check _{pneu})	min dia ⁻¹			10,00
Abastecimento caminhão (T _{acam})	min dia ⁻¹			30,00
Lubrificação caminhão (T _{lcam})	min dia ⁻¹			30,00

Neste trabalho os parâmetros utilizados foram obtidos ao longo da safra 2018/2019 e 2019/2020 apoiado pela utilização de tecnologia embarcada – capítulo 4.3.1.

Em função das particularidades de cada unidade de bioenergia, estes valores tendem a apresentar diferenças significativas, logo a recomendação é que seja utilizado um conjunto de dados obtidos para cada empresa de maneira que representem suas características operacionais.

4.3.4 Parâmetros operacionais de campo

A agricultura digital - capítulo 3.9 - por meio de tecnologia embarcada e telemetria -capítulos 3.9.2 e 3.9.3-, permite o monitoramento das operações agrícolas em tempo real e possibilitam a posterior análise da operação para entendimento de gargalos operacionais. Já a modelagem do sistema de colheita mecanizada permite a realização de diversas simulações e obtenção de dados importantes no processo de tomada de decisão. Para avaliar vantagens da modelagem, será tomado como base os valores calculados utilizando-se o conjunto de dados do capítulo 4.3.3 bem como os parâmetros de IC da

Tabela 31, que foram selecionados com a finalidade de não trazer impactos operacionais à análise.

Tabela 31 – Índice de colheitabilidade para análise exploratória de modelo de sistema de colheita mecanizada

Índice de colheitabilidade	Observação	Nota	Farol
TCH (t/ha)	76,5	1	●
Comprimento de tiro (m)	500,00	1	●
Declividade (%)	3%	1	●
Ocorrência de pedra e tocos	sem ocorrência	1	●
Ocorrência de erosão	sem ocorrência	1	●
Ocorrência de ervas daninhas	sem infestação	1	●
Nivelamento do terreno	Nivelado	1	●
Tombamento	Ereto	1	●
Nota		8	●

O modelo da operação de corte mecanizado, traz como proposta a capacidade operacional da colhedora, expressa neste trabalho por RN, como uma das principais variáveis que determinam ao desempenho operacional da colheita. De acordo com a Equação 51, o RN e o IC definem o capacidade operacional corrigida da colhedora -RCC-, que por sua vez determinará em conjunto com o TCH a velocidade operacional de colheita -Vop- por meio da Equação 71. Foi adotado $6,00 \text{ km h}^{-1}$, a velocidade máxima -Vmax- permitida para operação, em função da colhedora estar sujeitas a grandes esforços que podem danificar a médio prazo sua estrutura.⁸

4.3.5 Caracterização da área de teste de desempenho

O teste de desempenho de colhedoras com duração de 24 horas foi realizado em uma unidade agroindustrial localizada em Sandovalina – SP (Tabela 32 e Figura 57), tendo como objetivos a validação do modelo de colheita mecanizada (conforme descrito no capítulo 4.3).

Tabela 32 – Características da área do teste de desempenho de colhedoras

Item	Informação
Localização – UTM	414.637 E; 7.510.959 S; fuso 22K
Altitude (m)	371
Área total (ha)	199,20
Área colhida (ha)	92,21
Espaçamento	Duplo alternado – 0,90 m x 1,40 m
Variedade	CTC 15
Estágio de corte	3°C

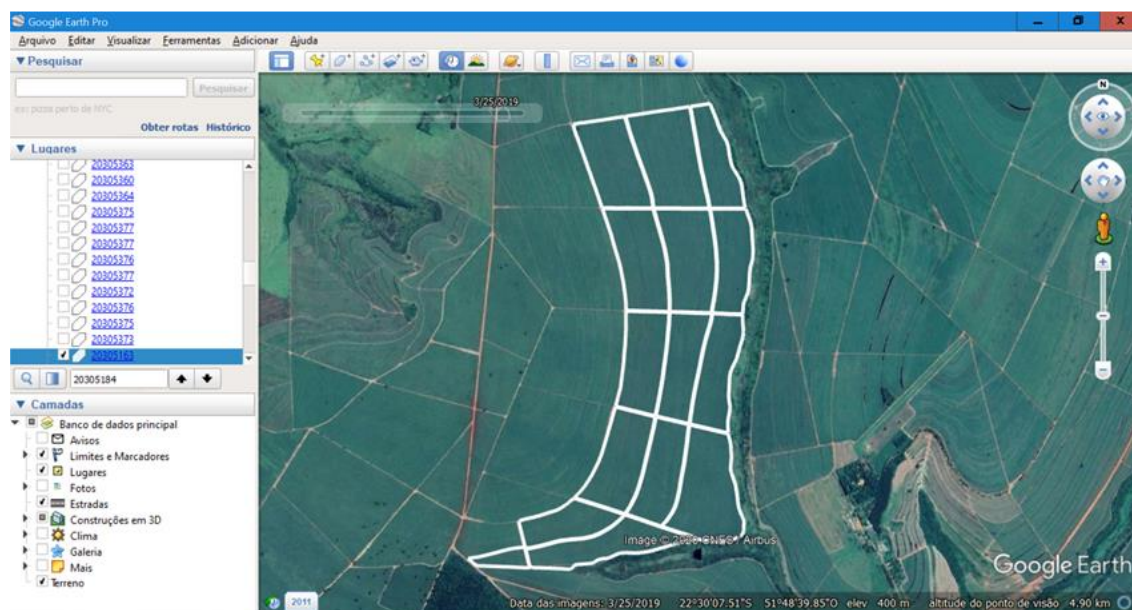
⁸ Exemplo da aplicação do IC em RCC pode ser encontrado no Anexo 5

Item	Informação
Produtividade (t ha ⁻¹)*	78,1
Comprimento de percurso (m)**	1.227
Volume de cana colhido (t)	7.202

* obtida após procedimento de fechamento de área no ERP agrícola

** obtido via monitoramento de “rastros” do piloto automático das colhedoras

Figura 57 – Área de realização de teste de desempenho de frente de colheita mecanizada



As colhedoras utilizadas no teste de desempenho estão descritas na Tabela 4 sendo os equipamentos 123043 e 123044 CH670 da marca John Deere e os equipamentos 623004 e 623005 A8810 Duplo alternado da marca CaseIH.

4.3.6 Teste de qui quadrado

O teste de qui quadrado, χ^2 , é um teste estatístico de hipóteses que se destina a encontrar um valor da dispersão para duas variáveis categóricas nominais e avaliar a associação existente entre variáveis qualitativas. Trata-se de um teste não paramétrico, ou seja, não depende de parâmetros populacionais (média e variância). O princípio básico deste teste é comparar proporções, ou seja, possíveis divergências entre as frequências observadas e esperadas para um certo evento. O teste é utilizado para verificar se a frequência com que um determinado acontecimento observado em uma amostra se desvia significativamente ou não da frequência com que ele é esperado.

Spiegel (1967) define que uma medida de discrepância existente entre as frequências observadas e esperadas é proporcionada pela estatística χ^2 , expressa pela Equação 6.

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(o_j - e_j)^2}{e_j}$$

Equação 6

Onde:

χ^2 : é o somatório dos desvios;

o: frequência observada para cada classe;

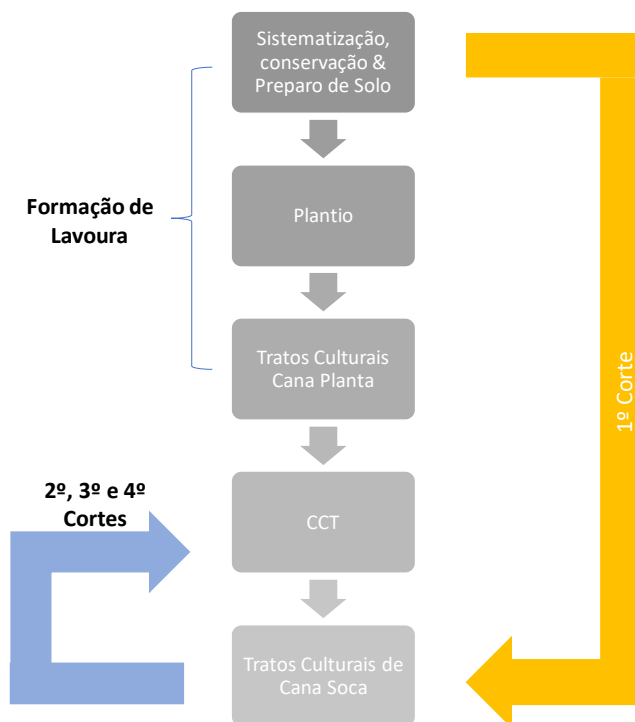
e: frequência esperada para cada classe.

O teste de qui quadrado foi aplicado para a validação do modelo de colheita mecanizada, para a avaliação da capacidade operacional, considerando os resultados do modelo como valores esperados e os valores obtidos durante de desempenho como observados.

4.4 Modelagem para determinação do custo da tonelada de cana-de-açúcar.

Para a modelagem do custo da tonelada de cana, seguiu-se o levantamento de custos em cada etapa, de acordo com o digrama dos processos listados na Figura 58.

Figura 58 – Processos agrícolas envolvidos na produção de cana-de-açúcar



De maneira análoga ao exposto no capítulo 4.2.2, o modelo proposto segue estrutura de fluxo de caixa descontado, sendo eles:

- ➔ Fluxo de caixa de formação de lavoura - $FC_{Lavoura}$;

- ➔ Fluxo de caixa de corte, carregamento e transporte - FC_{CCT} . Para a obtenção do custo de CCT, será utilizado o modelo proposto no capítulo 4.3;
- ➔ Fluxo de caixa de tratos culturais de soqueira - FC_{Tratos}
- ➔ Fluxo de caixa de arrendamento - $FC_{Arrendameto}$;
- ➔ Fluxo de caixa de custos administrativos - FC_{Adm} .

Os custos utilizados para os cálculos são provenientes da Tabela 19, acrescentando-se preço do ATR (CONSECANA -SP) de 0,6575 R\$.kg ATR⁻¹, valor obtido com base em PECEGE (2020). As premissas de produtividade são:

- ➔ Produtividade base:
 - ➔ Produtividade de 1ºCorte: 110,60 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 2ºCorte: 90,00 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 3ºCorte: 78,70 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 4ºCorte: 67,40 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de 5ºCorte: 60,60 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Produtividade de viveiros: 75,00 Mg ha⁻¹;
 - ➔ Consumo de cana para plantio: 7,50 ha ha⁻¹.
- ➔ Longevidade: 5 cortes - após o 5º Corte a área entra no processo de erradicação de canavial;
- ➔ Açúcares totais reduzidos (ATR⁹): 134,75 kg.t⁻¹.

A consolidação das premissas de produtividade e econômicas utilizadas encontram-se na Tabela 33.

⁹ Açúcares toais recuperáveis (ATR) constituem um dos parâmetros do sistema de pagamento de cana implantado no Estado de São Paulo, a partir da safra 1998/1999 pelo Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (CONSECANA – SP).

Tabela 33 – Premissas para estimativa do valor da tonelada de cana-de-açúcar

<u>Produtividade ($t\ ha^{-1}$)</u>		
Taxa _{multiplicação}	7,50	
TCH ₁	110,60	
TCH ₂	90,00	
TCH ₃	78,70	
TCH ₄	67,40	
TCH ₅	60,60	
TCHV	75,00	
Taxa de multiplicação	7,50	
<u>Raio médio (km)</u>	30,00	
<u>ATR ($kg.t^{-1}$)</u>	134,75	
<u>Custos ($R\\$ ha^{-1}$)</u>		
Taxa de oportunidade (a.a.)	8,50%	
Tratos de soqueira	2.229,84	
Arrendamento	1.380,43	
Administrativo agrícola	262,90	
Formação de lavoura	<u>Com fosfatagem</u>	<u>Sem fosfatagem</u>
SPC	9.634,00	9.051,36
SPR	9.252,30	8.669,66
SPLC	8.909,48	8.612,43
SPLS	9.153,21	8.570,57
Preço do ATR ($R\$.kg^{-1}$)	0,6575	

A estrutura do modelo é apresentada na Tabela 34 conforme proposto por Fernandes (2011).

Tabela 34 – Formação de custos de produção de uma tonelada de cana-de-açúcar

Evento	Data	TCH	Formação	CCT	Tratos	Arrendamento	Adm.	Cana
			$R\$ ha^{-1}$	$R\$ ha^{-1}$	$R\$ ha^{-1}$	$R\$ ha^{-1}$	$R\$ ha^{-1}$	$R\$ ha^{-1}$
Plantio	Ano 0		Formação			Custo _{Arrendamento}	Custo _{Adm}	Custo _{Cana0}
1° Corte	Ano 1	TCH ₁		Custo _{CCT1}	Custo _{Tratos}	Custo _{Arrendamento}	Custo _{Adm}	Custo _{Cana1}
2° Corte	Ano 2	TCH ₂		Custo _{CCT2}	Custo _{Tratos}	Custo _{Arrendamento}	Custo _{Adm}	Custo _{Cana2}
3° Corte	Ano 3	TCH ₃		Custo _{CCT3}	Custo _{Tratos}	Custo _{Arrendamento}	Custo _{Adm}	Custo _{Cana3}
4° Corte	Ano 4	TCH ₄		Custo _{CCT4}	Custo _{Tratos}	Custo _{Arrendamento}	Custo _{Adm}	Custo _{Cana4}
5° Corte	Ano 5	TCH ₅		Custo _{CCT5}		Custo _{Arrendamento}	Custo _{Adm}	Custo _{Cana5}
		VPL _{TCH}	VPL _{Formação}	VPL _{CCT}	VPL _{Tratos}	VPL _{Arrendamentos}	VPL _{Adm}	VPL _{Cana}

O custo da cana em $R\$ ha^{-1}$ é obtido pelo somatório de custos de Formação (Custo_{Formação}), CCT (Custo_{CCT}), Tratos culturais de soqueira (Custo_{Tratos}), Arrendamento (Custo_{Arrendamento}) e Administrativo (Custo_{Administrativo}).

O valor presente líquido para Produtividade (VPL_{TCH}), Formação (VPL_{Formação}), CCT (VPL_{CCT}), Tratos de soqueira (VPL_{Tratos}), Arrendamento (VPL_{Arrendamento}), Administrativo (VPL_{Administrativo}) e da Produção de cana-de-açúcar são obtidos empregando-se a Equação 4.

O custo da produção de cana-de-açúcar em R\$ t⁻¹, será obtido utilizando-se a Equação 7.

$$Custo_{tonelada\ de\ cana} = \frac{VPL_{cana}}{VPL_{TCH}} \quad \text{Equação 7}$$

Após a estimativa de custo da tonelada de cana-de-açúcar, calcula-se receita bruta, expressa em R\$ t⁻¹, utilizando-se a Equação 8.

$$Receita\ bruta = ATR * Preço\ do\ ATR \quad \text{Equação 8}$$

A receita operacional será resultado da Equação 9.

$$Receita\ operacional = Receita\ bruta - Custo_{tonelada\ de\ cana} \quad \text{Equação 9}$$

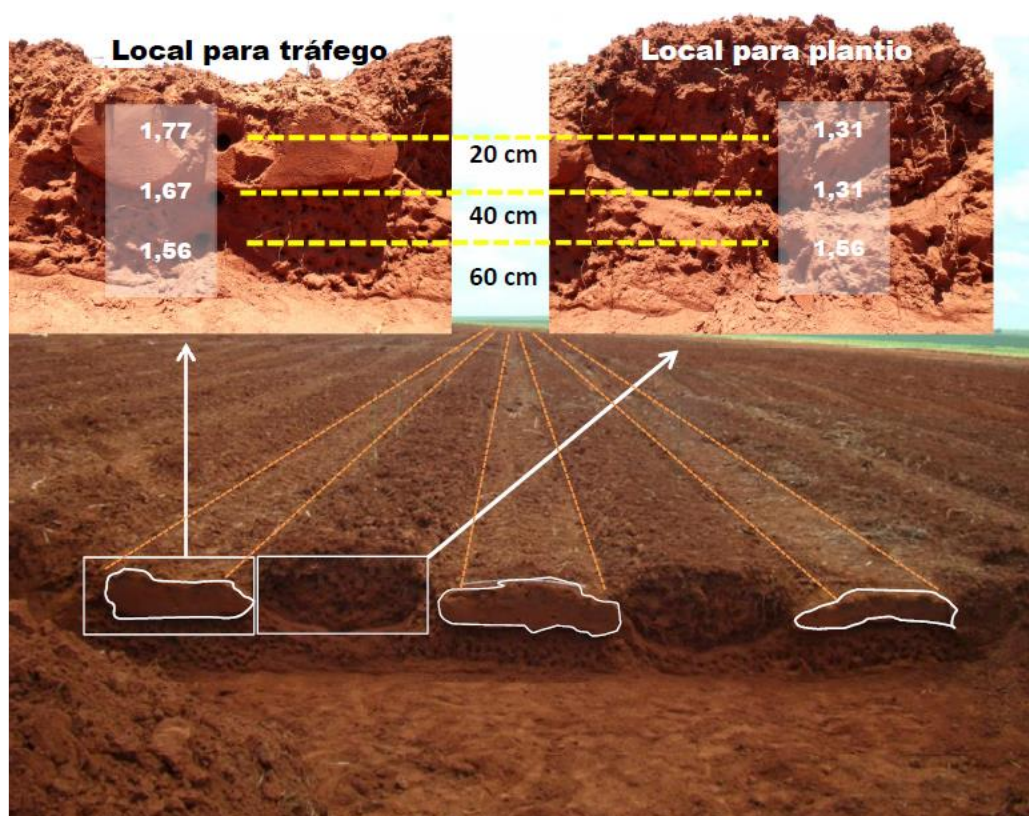
5 Resultados e discussão

5.1 Análise aplicada a preparo de solo

5.1.1 Resultados em campo do sistema de preparo localizado

A Figura 59 refere-se a uma das trincheiras abertas na Área 1 para avaliação da operação, onde pode-se observar que a região destinada ao tráfego, as densidades aparente a 200, 400 e 600 mm de profundidade foram respectivamente de 1,77; 1,67 e 1,56 g.cm⁻³; ao passo que na região destinada ao plantio, as densidades foram de 1,31; 1,31 e 1,56 g.cm⁻³.

Figura 59 – Avaliação de densidade aparente em área de preparo localizado em espaçamento de 1,5 m



Os resultados obtidos para z_i (valor estimado da média móvel exponencialmente variável), LSC (limite superior de controle) e LIC (limite inferior de controle) para a área de plantio estão apresentados nos gráficos da Figura 60, Figura 61 e Figura 62; para a área de tráfego estão apresentados nos gráficos da Figura 63, Figura 64 e Figura 65. Pode-se observar que em ambas as condições, os sistemas são estáveis pois estão dentro dos limites de controle.

Figura 60 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 200 mm em região destinada ao canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

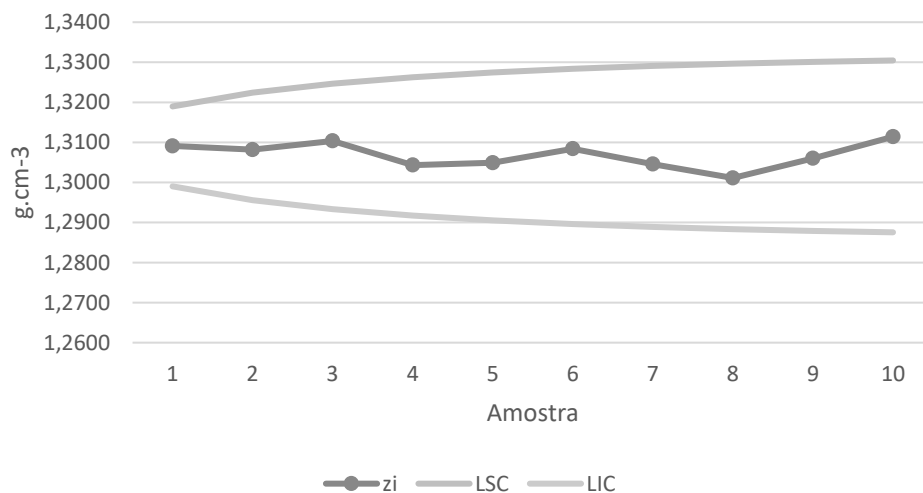


Figura 61 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 400 mm em região destinada ao canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

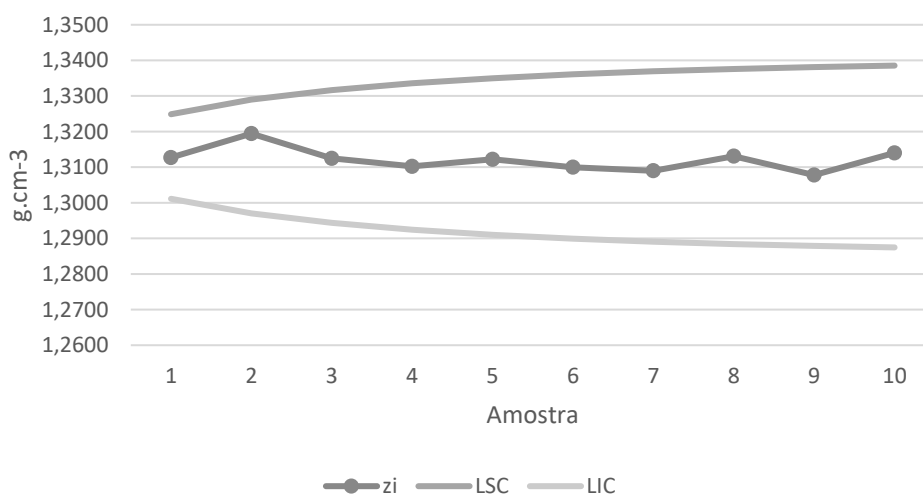


Figura 62 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 600 mm em região destinada ao canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

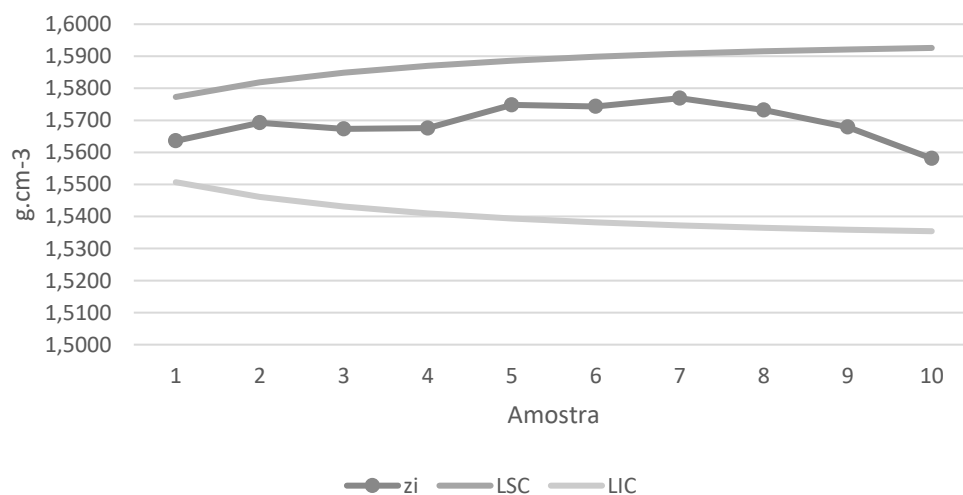


Figura 63 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 200 mm em região destinada ao tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

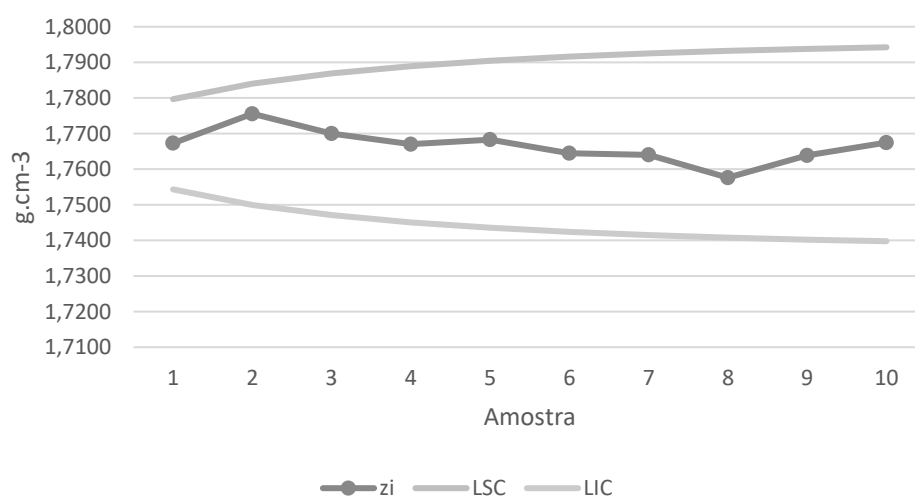


Figura 64 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 400 mm em região destinada ao tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

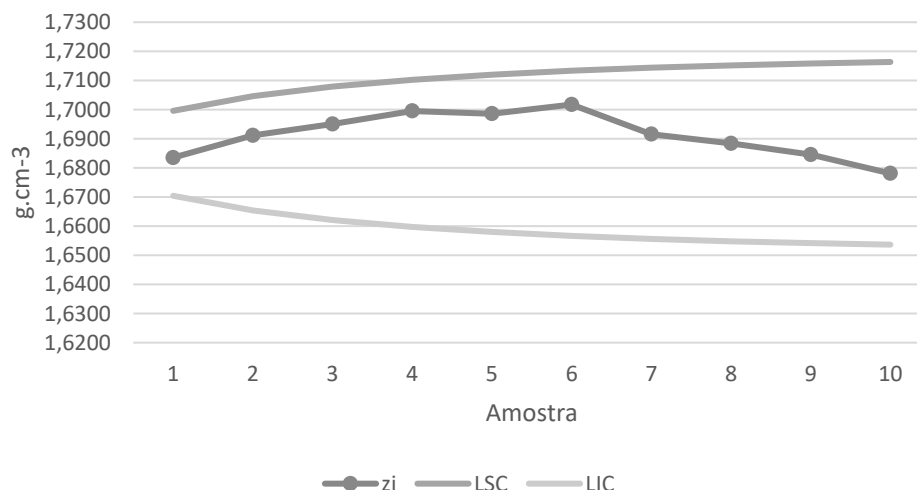
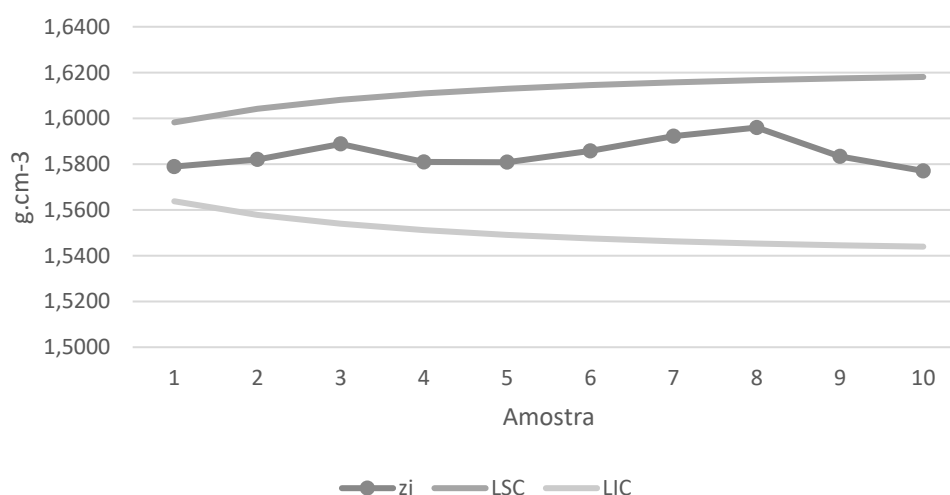


Figura 65 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para densidade aparente profundidade 600 mm em região destinada ao tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle



As densidades aparentes médias para área de canteiro foram $1,31 \text{ g cm}^{-3}$, $1,31 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,56 \text{ g cm}^{-3}$ para as profundidades de 200, 400 e 600 mm. Já para a área destinada ao tráfego, observou-se de maneira análoga, $1,77 \text{ g cm}^{-3}$, $1,69 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,58 \text{ g cm}^{-3}$. Analisando os valores obtidos com os apresentados na Tabela 6, o canteiro apresenta densidade aparente inferior aos limites apresentados como referência até a profundidade de 400 mm, indicando resposta à descompactação; já para a profundidade de 600 mm os

valores encontrados estão acima. Fazendo a mesma analogia para as áreas destinadas ao tráfego, nota-se que todas as áreas apresentam densidades superiores ao limite. Percebe-se também valores similares de densidade tanto para regiões destinadas ao canteiro quanto para o tráfego a 600 mm de profundidade, indicando que a esta profundidade, possivelmente o solo já estava próximo a sua condição natural de densidade aparente, indicando que a mobilização de solo a esta profundidade deve ser evitada para que não haja o ciclo vicioso de compactação e afrouxamento do solo, de acordo abordagem realizada por Braunbeck e Magalhães (2014).

A avaliação para taxa de infiltração é apresentada na Figura 66 e Figura 67, que seguindo os critérios de MMEP apresentam-se estáveis.

Figura 66 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para taxa de infiltração para área de canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

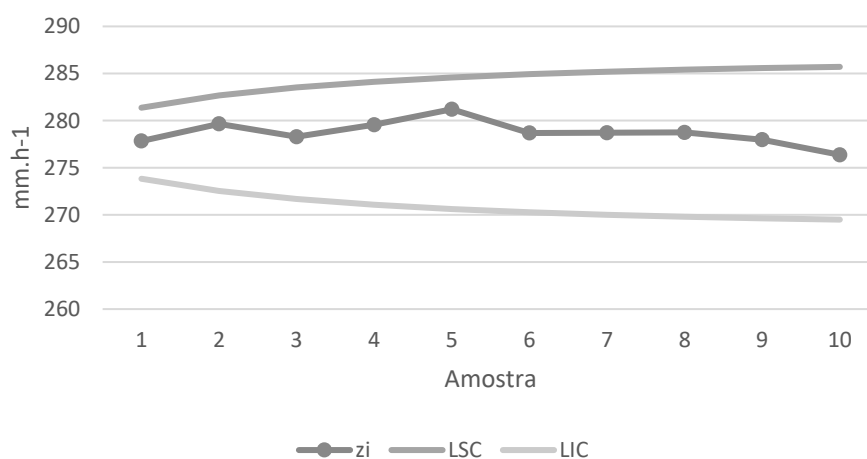
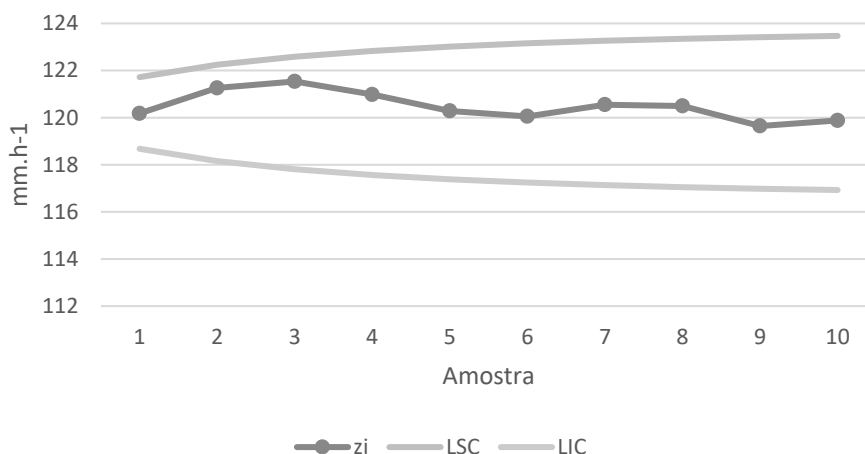


Figura 67 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para taxa de infiltração para área de tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle



Para a área destinado ao canteiro, a média de taxa de infiltração foi de 278 mm h⁻¹, e de 120 mm h⁻¹ em área destinada ao tráfego. O tratamento de preparo localizado utilizando-se o canteirizador, resultou em incremento significativo na taxa de infiltração de água, podendo contribuir para a redução de riscos de erosão em solos classificados como Latossolos. Importante salientar que na semana anterior à realização dos testes de infiltração, houve ocorrência de precipitação de cerca de 100 mm na área.

As cartas de controle de MMEP para a profundidade e largura de mobilização do solo para área de canteiro e para área de tráfego referentes a Área 2, encontram-se na Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71.

Figura 68 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de mobilização de solo para área de canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

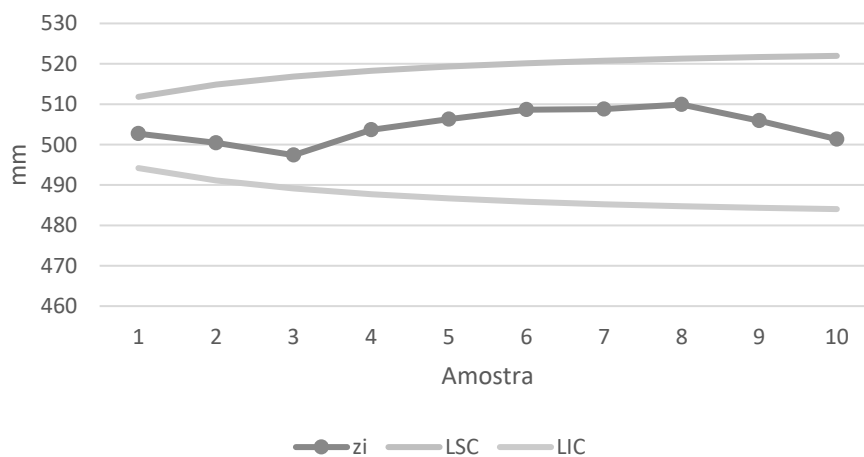


Figura 69 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para largura de mobilização de solo para área de canteiro. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

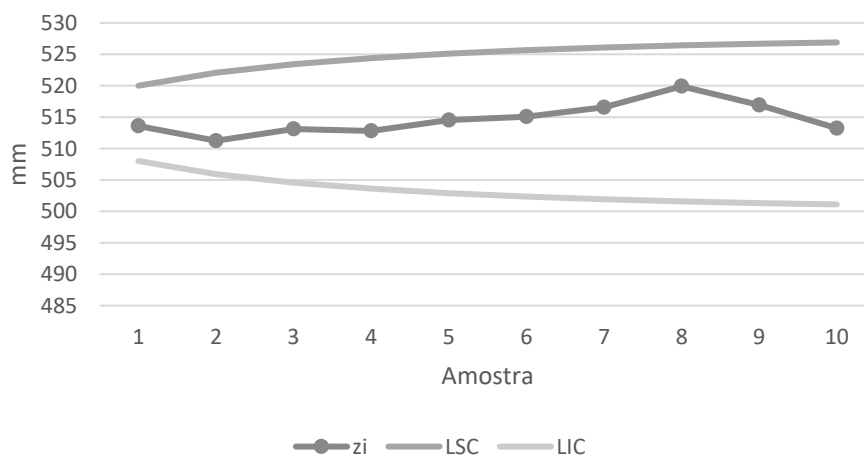


Figura 70 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de não mobilização de solo para área de tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

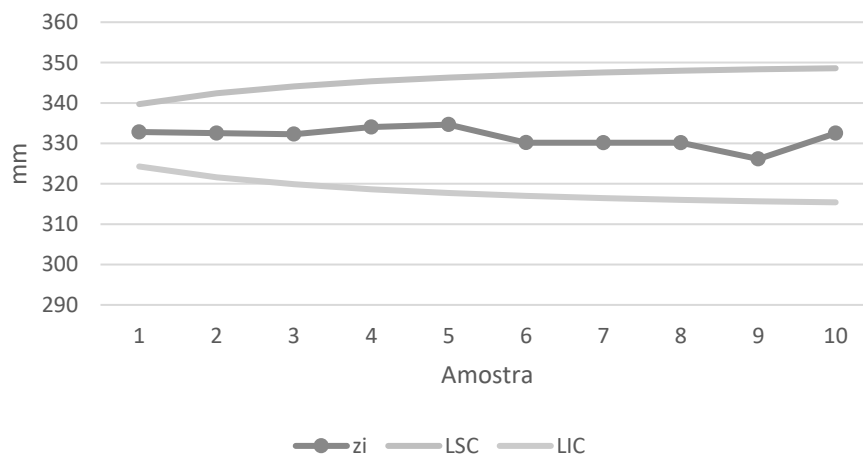
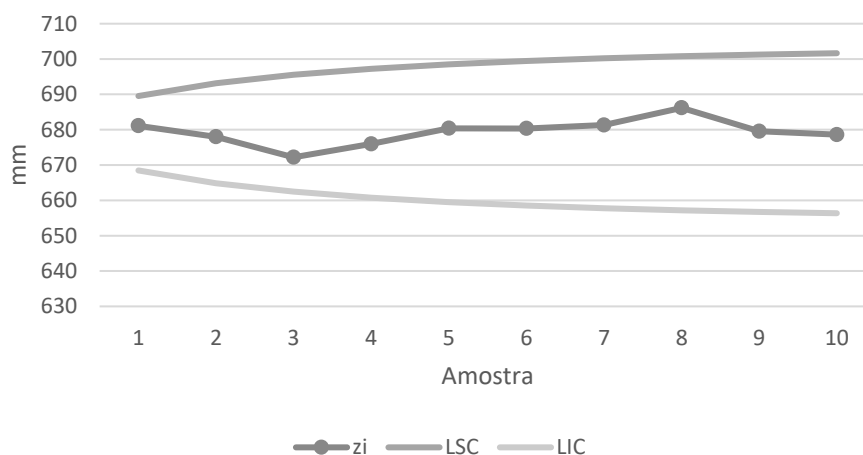


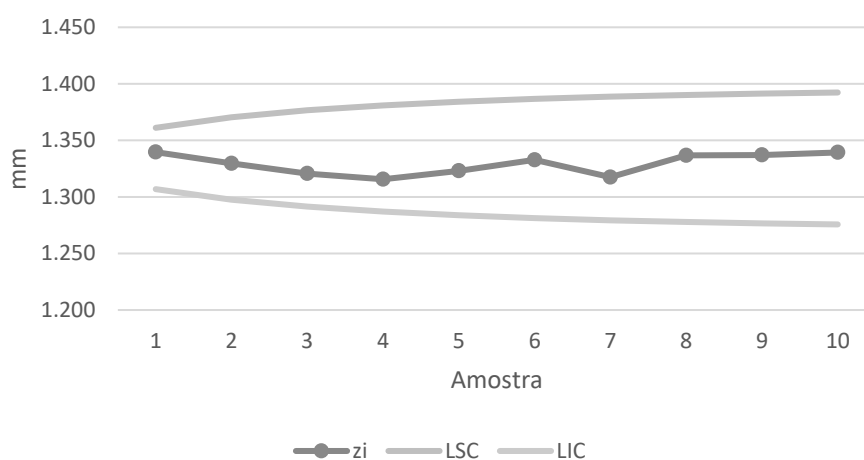
Figura 71 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para largura de não mobilização de solo para área de tráfego. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle.



Todas as cartas de controle apresentaram característica de estabilidade. Os aspectos mais importantes são profundidade de mobilização para a área destinada ao canteiro, onde observa-se que o preparo de solo com canteirizador foi efetivo, sendo o valor médio encontrado de 503 mm; e largura de área não mobilizada destinada ao tráfego, onde observou-se dentro do limite necessário – valores médios observados 679 mm - conforme ilustrado na Figura 16, assim como a largura da área mobilizada – 514 mm - permitindo portanto condições ideais para o STC.

A carta de controle MMEP para profundidade de raízes – Figura 72 – apresentou-se estável. As medições de profundidade de raiz apontam que as condições proporcionadas pelo SPL foram suficientes para o bom estabelecimento da planta, sendo o valor médio observado de 1.334 mm, e está em linha com o observado nos trabalhos realizados por Vasconcelos e Casagrande (2008).

Figura 72 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade do sistema radicular. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle



A avaliação comparativa entre canteirização e subsolagem realizadas na Área 3, são apresentadas nas cartas de controle MMEP da Figura 73 e Figura 74.

Figura 73 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de mobilização de solo com canteirização. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

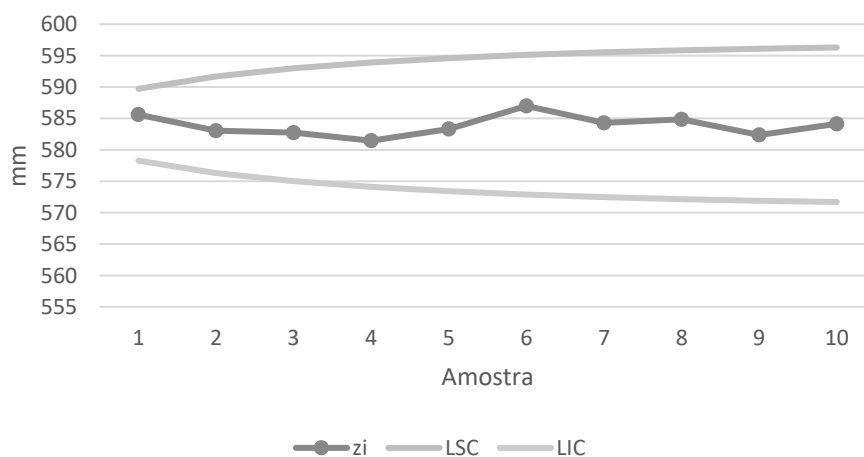
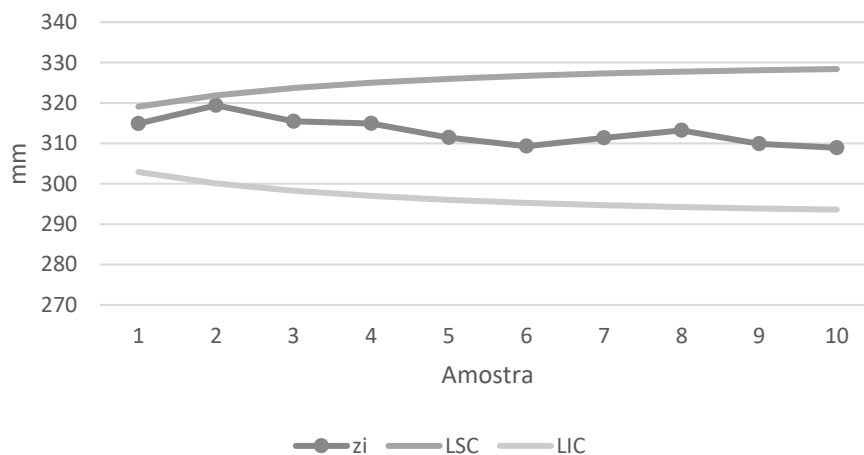


Figura 74 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade de mobilização de solo com subsolagem. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle



Nota-se que em ambas operações há estabilidade no processo que se por um lado comprova melhores resultados em profundidade de mobilização de solo para a canteirização – 584 mm -, por outro evidencia a deficiência na operação de subsolagem na descompactação de solo quando utiliza implementos de 5 hastes – 311 mm - sem o atendimento de potência necessária para a realização da operação exigida pelo o implemento.

As avaliações visuais das trincheiras, suportadas pela Figura 47 e pela Figura 48 são apresentadas na Tabela 35.

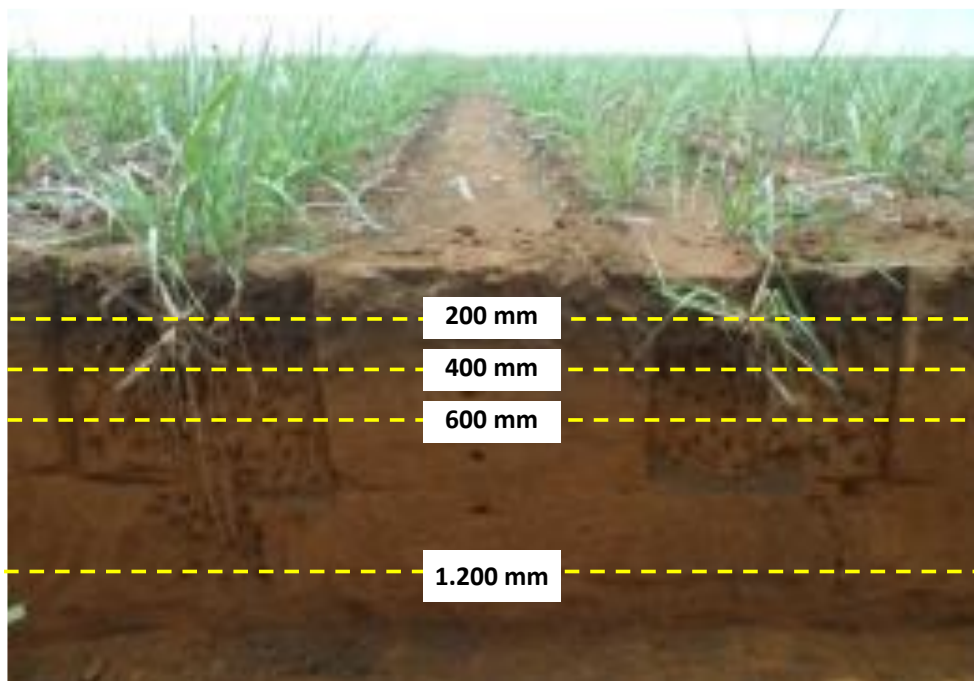
Tabela 35 – Avaliação visual de trincheiras para operações de canteirização e subsolagem

Operação	Desenvolvimento sistema radicular	Aspecto das raízes	Descompactação
Canteirização	Grande volume de raízes dentro e abaixo do sulco	Muitas radicelas	Eficiente
Subsolagem	Confinado a parte descompactada	Grossas e com poucas radicelas	Baixa eficiência

As análises estatísticas e visuais das operações canteirização e subsolagem permitem afirmar que a canteirização proporciona ao solo profundidade efetiva de mobilização que permitem o bom desenvolvimento da cana-de-açúcar, obtendo-se maior volume de solo explorado e rizoma com mais radicelas, característica necessária para melhor eficiência do sistema radicular.

Aos 90 DAP foi avaliado na Área 4 o desenvolvimento do sistema radicular como apresentado na Figura 75.

Figura 75 – Desenvolvimento de sistema radicular em área canteirizada (esquerda) e subsolada (direita), 90 DAP.



As cartas de controle MMEP estão contidas na Figura 76 e Figura 77.

Figura 76 – Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade sistema radicular 90 DAP em área canteirizada. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle

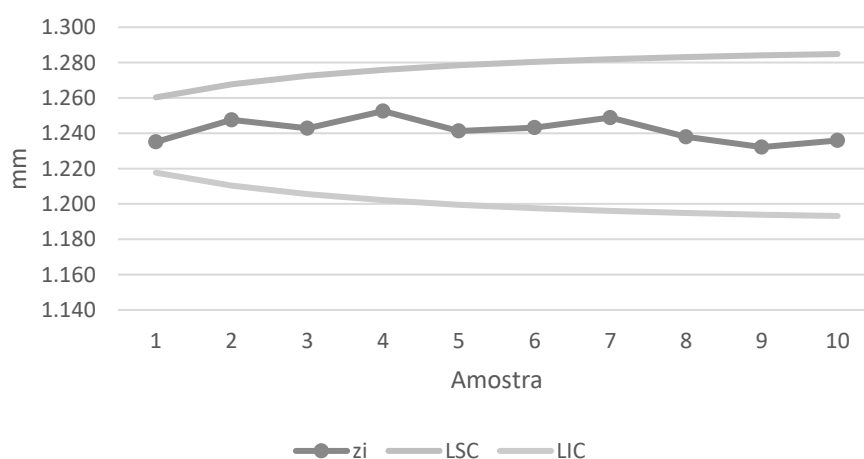
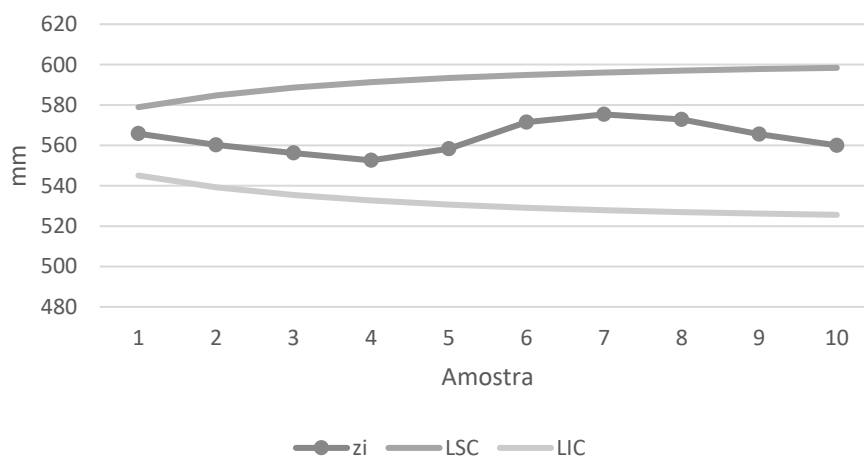


Figura 77 - Carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para profundidade sistema radicular 90 DAP em área subsolada. z_i : valor estimado da média móvel exponencialmente variável; LSC: limite superior de controle e LIC: limite inferior de controle



As amostras apresentam-se dentro do critério de estabilidade estabelecido pela MMEP. A profundidade atingida pelas raízes mais uma vez mostra-se em linha com o apresentado por Vasconcelos e Casagrande (2008) para o SPL – atingindo 1.239 mm a 90 DAP - e corrobora com a hipótese de que a subsolagem consome mais energia que o preparo localizado, havendo maior necessidade de potência para romper camada compactada, resultando em 562 mm de profundidade de raízes a 90 DAP. As observações vão de encontro também com o apresentado por Ferreira e Ferreira (2015), em relação a melhores condições de enraizamento em áreas de tráfego controlado.

Em todas as áreas onde foi realizada a canteirização foi observado melhor desempenho operacional no plantio mecanizado em relação às áreas onde foi realizada a subsolagem. Observou-se melhor condição de rolagem para as plantadoras e menor incidência de quebras dos sulcadores. Notou-se também menor tempo de retomada pós chuva para a operação de plantio mecanizado. Importante frisar que todas as observações e medições realizadas em campo para o sistema de preparo localizado estão em linha com as pesquisas de Chamen (2011), Kingwell e Fuchsbichler (2011), Souza (2012) e Antille et al. (2019), apresentadas no capítulo 3.5.

Com base nas áreas avaliadas, pode-se afirmar que o preparo canteirizado contribuiu com a qualidade de preparo de solo, principalmente na descompactação. Isto permite melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo, possibilitando maior

volume exploração e conseqüentemente melhor aproveitamento tanto de nutrientes quanto de água, que é essencial em regiões de baixa fertilidade e déficit hídrico.

5.1.2 Análises de desempenho de operações e sistemas de preparo de solo

Utilizando-se o conteúdo detalhado no capítulo 4.2.1, chegou-se a modelagem apresentada pelas equações da Tabela 36, da Tabela 37, da Tabela 38 e da Tabela 39.

Os resultados de desempenho operacional são apresentados na Tabela 36.

A Equação 10 indica a capacidade operacional nominal da operação, função da largura de trabalho (L_{trabalho}) definida pelo conjunto trator e implemento e velocidade operacional (V_{opprep}), função do implemento e da potência do trator.

Considerou-se como tempo logístico - Equação 13 – os intervalos de tempo utilizados para logística do preparo – paradas por refeição (PR), intervalo entre turnos (I_{turno}), tempo de deslocamento entre áreas (MA) e horas improdutivas (H_{impprep}) – conforme Equação 11; e os tempos utilizados para insumos dedicados a operação – deslocamento abastecimento de corretivo (D_{abc}), deslocamento abastecimento de inseticida (D_{abi}), abastecimento de corretivos (A_{bc}), abastecimento de inseticidas (A_{bi}) e abastecimento de herbicida (A_{bh}) – conforme Equação 12.

Definiu-se como tempo de suprimentos operacionais de uma operação de preparo de solo a expressão demonstrada na Equação 14, sendo esta reflexo do tempo gasto com abastecimento de combustível (A_{bascomb}), aferição de dosagem (A_{ferdos}), limpeza de equipamento (L_{eq}), desentupimento de bico (D_{bico}) e checklist.

As horas de motor em operação do equipamento que pode ser calculada utilizando a Equação 15, leva em consideração a Equação 11 e a Equação 14, os tempos para abastecimento de insumos (A_{bc} , A_{bi} e A_{bh}) e o tempo de manutenção no preparo de solos (M_{anprep}). A constante 1440 indica o tempo em minutos dentro de 24 horas.

O cálculo das horas efetivamente gastas no preparo de solo pode ser obtida aplicando-se a Equação 16, que consiste da Equação 15 subtraindo o somatório de tempos com manobra auxiliar (M_{aux}), deslocamento para abastecimento de combustível (D_{ab}), D_{abc} , D_{abi} e D_{abh} .

O tempo utilizado para a operação e manobra do equipamento ao final de cada linha trabalhada é expresso pela Equação 17. Nota-se que é função de CT, $V_{op_{prep}}$ e tempo gasto para realizar a manobra ao final da linha (TM).

A quantidade de manobras efetuadas - Equação 18 – é razão da Equação 16 pela Equação 17.

A utilização em $h.ano^{-1}$ de um trator em uma determinada operação de preparo de solo pode ser encontrada pela Equação 19, fator da Equação 15 e dias uteis para preparo de solo (DU_{prep}), calculado conforme apresentado no Anexo 4. A Equação 20, a Equação 21 e a Equação 22 são utilizadas para a determinação da capacidade operacional em $ha\ dia^{-1}$, $ha\ h^{-1}$ e $ha.ano^{-1}$, respectivamente. Além de serem ferramentas para gestão operacional estas equações são utilizadas para o cálculo dos custos operacionais.

Tabela 36 – Equações para modelagem de operações de preparo de solo

Variável	Sigla	Unidade	Equação	
Capacidade operacional nominal preparo	$R_{nominal}$	ha h ⁻¹	$R_{nominal} = L_{trabalho} * \frac{Vop_{prep}}{10}$	Equação 10
Tempo logístico preparo	T_{LP}	min dia ⁻¹	$T_{LP} = PR + I_{turno} + MA + Himp_{prep}$	Equação 11
Logística insumos preparo	LI_{prep}	min dia ⁻¹	$LI_{prep} = Dabc + Dabi + Abc + Abi + Abh$	Equação 12
Tempo logístico total preparo	TLT_{prep}	min dia ⁻¹	$TLT_{prep} = T_{LP} + LI_{prep}$	Equação 13
Tempo suprimentos operacionais preparo	TSO_{prep}	min dia ⁻¹	$TSO_{prep} = Abas_{comb} + Afer_{dos} + Leq + D_{bico} + Check$	Equação 14
Horas motor preparo	HM_{prep}	min dia ⁻¹	$HM_{prep} = 1440 - (T_{LP} + Abc + Abi + Abh + Man_{prep} + TSO_{prep})$	Equação 15
Horas efetivas preparo	HE_{prep}	min dia ⁻¹	$HE_{prep} = HM_{prep} - (Maux + Dab + Dabc + Dabi + Dabh)$	Equação 16
Tempo comprimento tiro + Manobra preparo	$TCTM_{prep}$	min dia ⁻¹	$TCTM_{prep} = \frac{CT}{1000} * \frac{60}{Vop_{prep}} + \frac{TM}{60}$	Equação 17
Quantidade manobras	QM_{prep}	manobra dia ⁻¹	$QM_{prep} = \frac{HE_{prep}}{TCTM_{prep}}$	Equação 18
Utilização preparo	Ut_{prep}	horas ano ⁻¹	$Ut_{prep} = \frac{HM_{prep} * DU_{prep}}{60}$	Equação 19
Produtividade efetiva dia	Ped_{prep}	ha dia ⁻¹	$Ped_{prep} = \frac{QM_{prep} * L_{trabalho} * CT}{1000}$	Equação 20
Produtividade efetiva hora	Peh_{prep}	ha h ⁻¹	$Peh_{prep} = \frac{Ped_{prep} * 60}{HM_{prep}}$	Equação 21
Produtividade efetiva ano	Pea_{prep}	ha.ano ⁻¹	$Pea_{prep} = Peh_{prep} * Ut_{prep}$	Equação 22

Encontra-se na Tabela 37 as equações que compõem os custos variáveis das operações de preparo de solo. Estão nesta categoria de custos combustíveis - Equação 23 e Equação 24 -, lubrificantes - Equação 25 e Equação 26- e Manutenção - Equação 27 e Equação 28 - em R\$ h⁻¹ e R\$ ha⁻¹.

Tabela 37 – Equações para cálculo dos custos variáveis em operações de preparo de solo

Variável	Sigla	Unidade	Equação	
Custo Combustível	$Custcomb_{prep}$	R\$ h ⁻¹	$Custcomb_{prep} = Vcomb * Comb$	Equação 23
Custo Combustível por hectare	$Custcomb_{prepha}$	R\$ ha ⁻¹	$Custcomb_{prepha} = \frac{Custcomb_{prep}}{Peh_{prep}}$	Equação 24
Custo Lubrificante	$Custlub_{prep}$	R\$ h ⁻¹	$Custlub_{prep} = Vlub * Lub$	Equação 25
Custo Lubrificante por hectare	$Custlub_{prepha}$	R\$ ha ⁻¹	$Custlub_{prepha} = \frac{Custlub_{prep}}{Peh_{prep}}$	Equação 26
Custo Manutenção	$Custman_{prep}$	R\$ h ⁻¹	$Custman_{prep} = \frac{(VIE * Man + VII * Manimp)}{Ut_{prep}}$	Equação 27
Custo Manutenção por hectare	$Custman_{prepha}$	R\$ ha ⁻¹	$Custman_{prepha} = \frac{Custman_{prep}}{Peh_{prep}}$	Equação 28

Os custos fixos que compõem as operações de preparo de solo são apresentados na Tabela 38, as equações apresentam os custos com operadores - Equação 29 e Equação 30 - e depreciação - Equação 31 e Equação 32 – em R\$ h⁻¹ e R\$ ha⁻¹.

Tabela 38 – Equações para cálculo dos custos fixos em operações de preparo de solo

Variável	Sigla	Unidade	Equação	
Custo operadores preparo	$Custoper_{prep}$	R\$ h ⁻¹	$Custoper_{prep} = \frac{[Sal + (1 + Enc) * 13 * TT * (1 + A) *]}{Ut_{prep} * (1 + F)}$	Equação 29
Custo operadores preparo por hectare	$Custoper_{prepha}$	R\$ ha ⁻¹	$Custoper_{prepha} = \frac{Custoper_{prep}}{Peh_{prep}}$	Equação 30
Depreciação preparo	$Depre_{prep}$	R\$ h ⁻¹	$Depre_{prep}$	Equação 31

Variável	Sigla	Unidade	Equação	
			$\left\{ \left[VIE - \frac{VIE * VRE}{(1 + TO)^{VUE}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUE} * TO}{(1 + TO)^{VUE} - 1} \right] \right\} +$ $+ \left\{ \left[VII - \frac{VII * VRI}{(1 + TO)^{VUI}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUI} * TO}{(1 + TO)^{VUI} - 1} \right] \right\}$ $= \frac{Ut_{prep}}{Depre_{prepha} = \frac{Depre_{prep}}{Peh_{prep}}}$	Equação 32
Depreciação preparo por hectare	Depre _{prepha}	R\$ ha ⁻¹		

Finalmente, a Tabela 39 consolida os resultados de custos fixos e variáveis, onde a Equação 33 apresenta o custo expresso em R\$ h⁻¹ e a Equação 34 em R\$ ha⁻¹.

Tabela 39 – Equações para cálculo do custo total em operações de preparo de solo

Variável	Sigla	Unidade	Equação	
Custo preparo	Custo _{prep}	R\$ h ⁻¹	$Custo_{prep} = Custcomb_{prep} + Custlub_{prep} + Custman_{prep} +$ $+ Custoper_{prep} + Depre_{prep}$	Equação 33
Custo preparo por hectare	Custo _{prepha}	R\$ ha ⁻¹	$Custo_{prepha} = \frac{Custo_{prep}}{Peh_{prep}}$	Equação 34

De posse das equações estabelecidas, as mesmas foram inseridas no Excel® que permitiu a elaboração da Tabela 40 que apresenta os resultados operacionais e custos para cada operação de preparo de solo que será abordada nos sistemas de preparo de solo a serem analisados:

- ➔ Sistema de preparo de solo convencional – SPC;
- ➔ Sistema de preparo de solo reduzido – SPR;
- ➔ Sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador – SPLC;
- ➔ Sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada – SPLS.

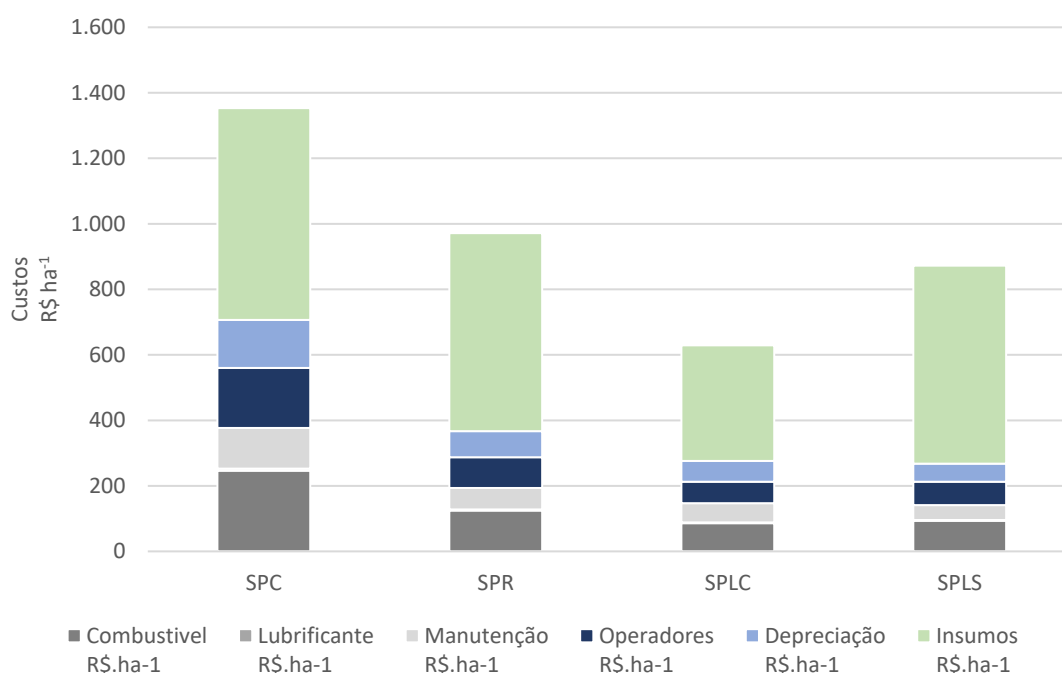
Tabela 40 – Resultados operacionais e custos para operações de preparo de solo

Variável	Unidade	Custos operacionais				Custos de aplicação			Subsolagem localizada	Erradicação mecânica
		Dessecação	Gradagem pesada	Gradagem intermediária	Gradagem niveladora	Aplicação de fósforo	Subsolagem	Canteirização		
Operacionais										
R _{nominal}	ha h ⁻¹	24,0	1,3	2,4	3,4	10,0	0,9	1,4	1,5	1,1
T _{LP}	min dia ⁻¹	490	505	505	505	495	505	505	505	505
LI _{prep}	min dia ⁻¹	133	0	0	0	265	0	34	0	0
TLT _{prep}	min dia ⁻¹	623	505	505	505	760	505	539	505	505
TSO _{prep}	min dia ⁻¹	105	70	70	70	75	70	75	70	70
HM _{prep}	min dia ⁻¹	457	577	577	577	502	577	562	577	577
HE _{prep}	min dia ⁻¹	312	517	517	517	257	517	478	517	517
TCTM _{prep}	min dia ⁻¹	4,17	8,50	6,00	4,75	4,00	8,50	7,67	7,00	9,57
QM _{prep}	manobra dia ⁻¹	74,88	60,82	86,17	108,84	64,25	60,82	62,35	73,86	54,01
U _{tprep}	horas ano ⁻¹	1.772,78	2.238,28	2.238,28	2.238,28	1.947,34	2.238,28	2.180,09	2.238,28	2.238,28
Ped _{prep}	ha dia ⁻¹	89,86	9,82	16,91	23,40	32,13	6,84	9,35	11,08	8,10
Peh _{prep}	ha h ⁻¹	11,80	1,02	1,76	2,43	3,84	0,71	1,00	1,15	0,84
Pea _{prep}	ha.ano ⁻¹	20.913,98	2.286,30	3.935,85	5.446,60	7.477,09	1.592,63	2.176,72	2.578,54	1.885,80
Custos variáveis										
Custcomb _{prep}	R\$ h ⁻¹	34,80	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00
Custcomb _{prepha}	R\$ ha ⁻¹	2,95	56,78	32,98	23,84	15,11	81,51	58,09	50,35	68,84
Custlub _{prep}	R\$ h ⁻¹	1,27	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Custlub _{prepha}	R\$ ha ⁻¹	0,11	1,49	0,87	0,63	0,40	2,14	1,53	1,32	1,81
Custman _{prep}	R\$ h ⁻¹	74,46	28,56	26,13	26,51	30,81	29,22	42,34	23,75	28,13
Custman _{prepha}	R\$ ha ⁻¹	6,31	27,96	14,86	10,90	8,02	41,06	42,41	20,62	33,39
Custos fixos										

Variável	Unidade	Dessecação	Gradagem pesada	Gradagem intermediária	Gradagem niveladora	Aplicação de fósforo	Subsolagem	Canteirização	Subsolagem localizada	Erradicação mecânica
Custoper _{prep}	R\$ h ⁻¹	62,52	42,09	42,09	42,09	48,38	42,09	43,21	42,09	42,09
Custoper _{prepha}	R\$ ha ⁻¹	5,30	41,21	23,94	17,30	12,60	59,16	43,28	36,54	49,96
Depre _{prep}	R\$ h ⁻¹	136,52	31,67	29,27	29,93	38,45	34,51	42,48	28,18	30,09
Depre _{prepha}	R\$ ha ⁻¹	11,57	31,00	16,65	12,30	10,01	48,51	42,55	24,46	35,71
<i>Custos operação</i>										
Custo _{prep}	R\$ h ⁻¹	309,57	161,85	157,02	158,06	177,17	165,35	187,56	153,55	159,83
Custo _{prepha}	R\$ ha ⁻¹	26,24	158,45	89,29	64,96	46,14	232,38	187,85	133,29	189,71
<i>Insumos</i>										
Custo _{insumo}	R\$ ha ⁻¹	110,00				536,50		284,35		
Custo total	R\$ ha⁻¹	136,24	158,45	89,29	64,96	582,64	232,38	472,20	133,29	189,71

Os resultados de custos agrupados por sistema de preparo solo podem ser verificados na Figura 78. Nota-se que tendo como base o SPC há redução de custos de 381,7 R\$ ha⁻¹ (28,2%), 724,52 R\$ ha⁻¹ (53,5%) e de 480,79 R\$ ha⁻¹ (35,5%) quando se compara com o SPR, SPLC e SPLS respectivamente.

Figura 78 – Custos de sistema de preparo de solo agrupados por custos fixos, variáveis e insumos. SPC: sistema de preparo de solo convencional; SPR: sistema de preparo de solo reduzido; SPLC: sistema de preparo de solo associado a canteirizador e SPLS: sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada

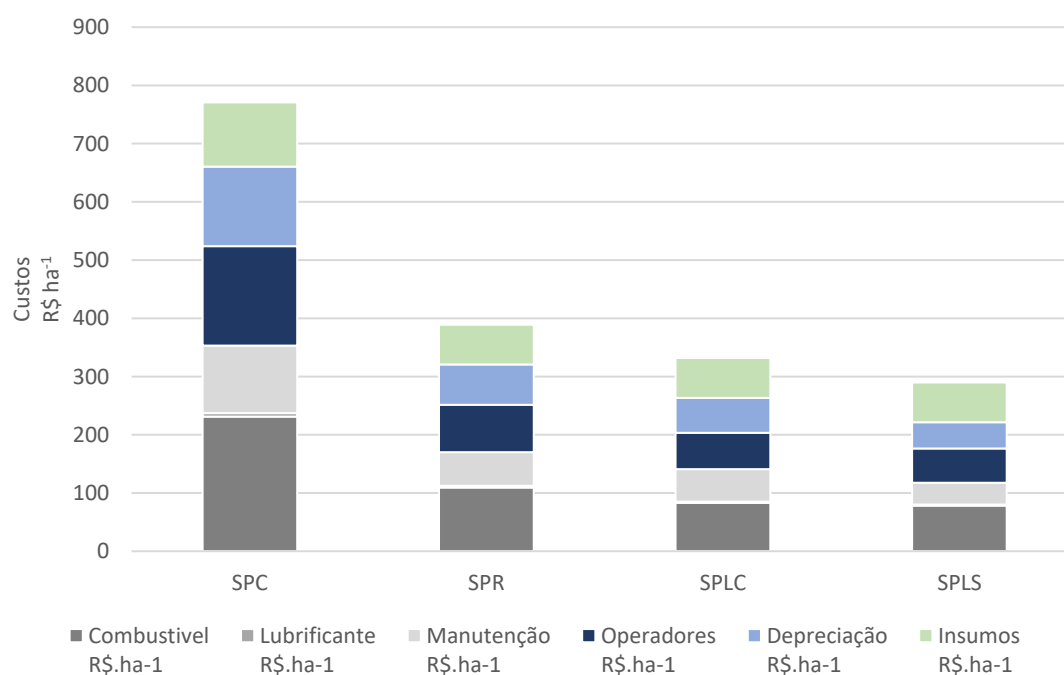


Os principais impactos estão relacionados à combustível e insumos. A análise de insumos indica menor consumo de glifosato nos demais sistemas de preparo de solo em relação ao SPC, uma vez que a hipótese utilizada foi dessecação em toda a área e é substituída pela operação de erradicação mecânica de soqueira em 38% nos demais sistemas. O MAP é o insumo que mais impacta devido a dosagem no SPLC ser 47% (252,2 R\$ ha⁻¹) menor que nos outros sistemas de preparo de solo.

Os resultados encontrados para combustíveis são explicados em razão do menor número de operações envolvidas, mas também por possibilitar maior capacidade operacional com menos demanda de potência conforme observado na Tabela 40 para a variável $P_{eh_{prep}}$. Esta última afirmação está em linha com Chamen (2011), que observou redução de consumo de diesel na ordem de 60% em STC em relação aos sistemas convencionais.

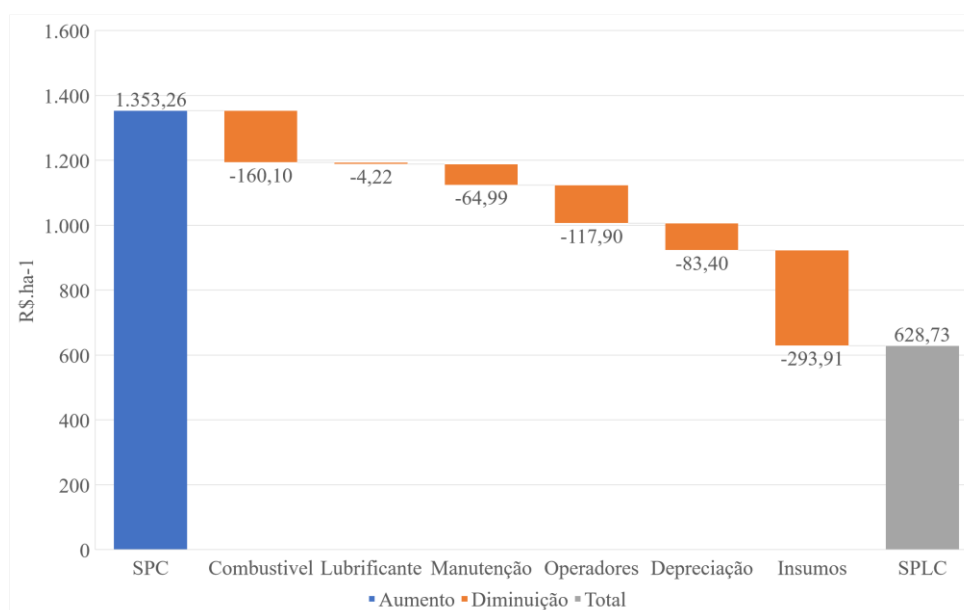
A Figura 78 permite concluir que o SPLC e o SPLS, são os que apresentam menores custos. Um ponto que pode ser desfavorável ao SPLC está relacionado a hipótese de utilização de 53% da dosagem de fósforo requerida nos demais sistemas. Para eliminar este efeito, optou-se por excluir tanto a operação Aplicação de fósforo quanto o insumo MAP dos sistemas em análise, conforme apresentado na Figura 79, concluindo que os custos calculados são de 770,62 R\$ ha⁻¹, 388,92 R\$ ha⁻¹, 331,69 R\$ ha⁻¹ e 289,82 R\$ ha⁻¹ para SPC, SPR, SPLC, SPLS, respectivamente, concluindo-se que o SPLC e o SPLS ainda tem os menores custos.

Figura 79 - Custos de sistema de preparo de solo agrupados por custos fixos, variáveis e insumos sem aplicação de fósforo. SPC: sistema de preparo de solo convencional; SPR: sistema de preparo de solo reduzido; SPLC: sistema de preparo de solo associado a canteirizador e SPLS: sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada



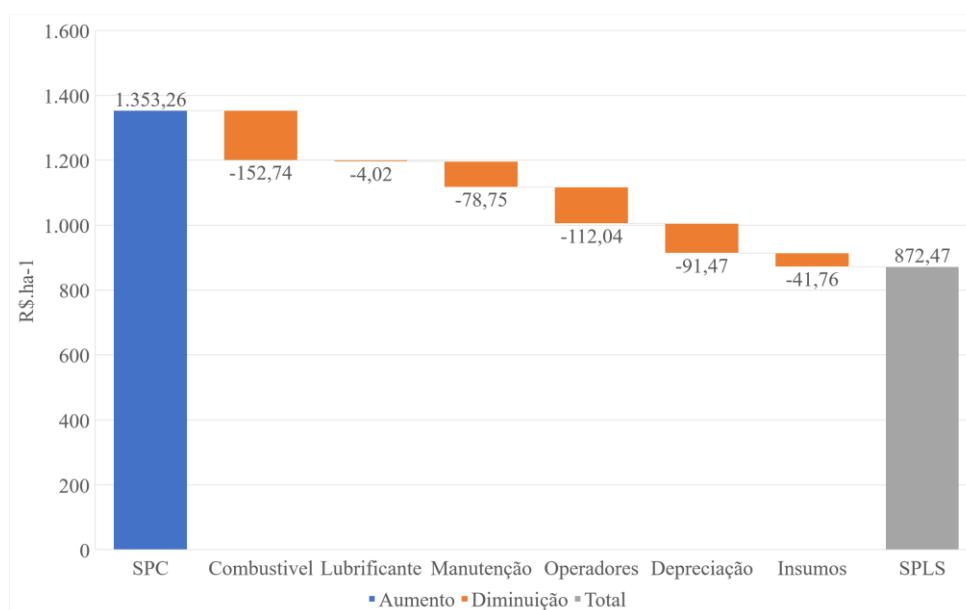
Para o melhor entendimento dos de custos entre sistemas de preparo de solo, optou-se pela análise de gráficos de cascata. Esta análise seguiu duas vertentes principais, a primeira assumindo como parâmetro base o SPC e a segunda assumindo o SPR, sempre buscando a comparação com o SPLC e SPLS por se tratar de sistemas ligados ao tráfego controlado. Ao final foi realizado o comparativo entre SPLC e SPLS nas opções com e sem aplicação de P₂O₅.

Figura 80 – Comparativo de custos entre SPC (sistema de preparo de solo convencional) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador)



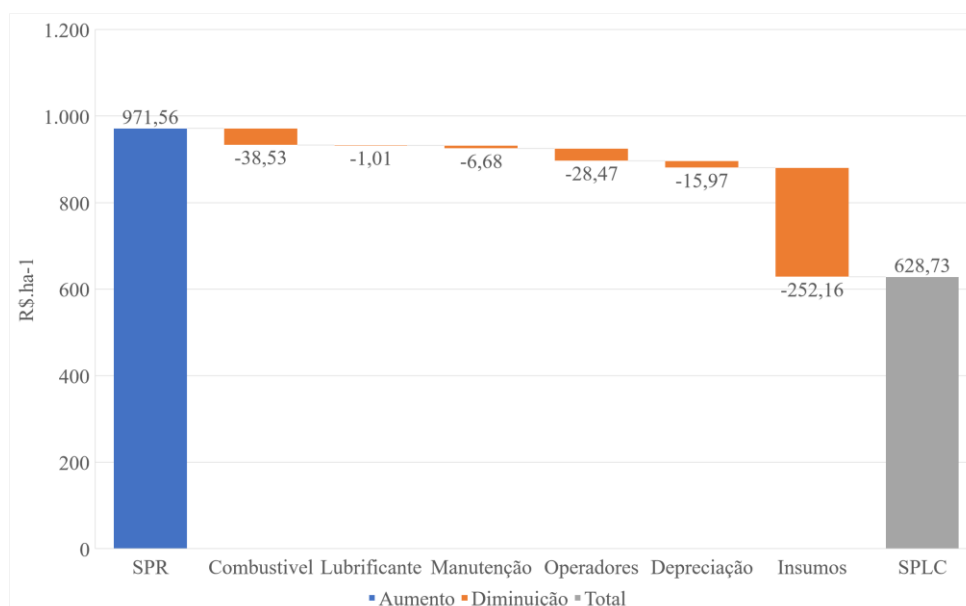
O comparativo entre SPC e SPLC -Figura 80- indica diminuições significativas em redução de volume de combustíveis e lubrificantes na ordem de 65% e de 45,5% de volume de insumos. Em custos totais as reduções de custos em combustíveis e lubrificantes apresentou redução de 22,7%, manutenção 9,0%, operadores em 16,3%, depreciação em 11,5% e insumos impactam em 40,6%. A redução na dosagem de P_2O_5 tem impacto relevante na redução de custos, porém o impacto de combustíveis também deve ter especial atenção, ao demonstrar grande potencial de consumo contribuindo para redução de gases de efeito estufa, em linha com Galambošová et al. (2014) e Antille (2019).

Figura 81 - Comparativo de custos entre SPC (sistema de preparo de solo convencional) e SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada)



Pode-se verificar na Figura 81 que mesmo mantendo a dosagem de P_2O_5 , o impacto em custos do SPLS frente ao SPC é significativo (35,5%). A redução em volume de combustíveis e lubrificantes é de aproximadamente 62%, novamente demonstrando vantagens em relação a aspectos ambientais ao reduzir a necessidade de combustíveis fósseis. Na dimensão custos, observa-se as seguintes reduções: combustíveis e lubrificantes 32,6%, manutenção 16,4%, operadores 23,3%, depreciação em 19,0%. O impacto em custo está diretamente relacionado a menor quantidade de operações envolvidas.

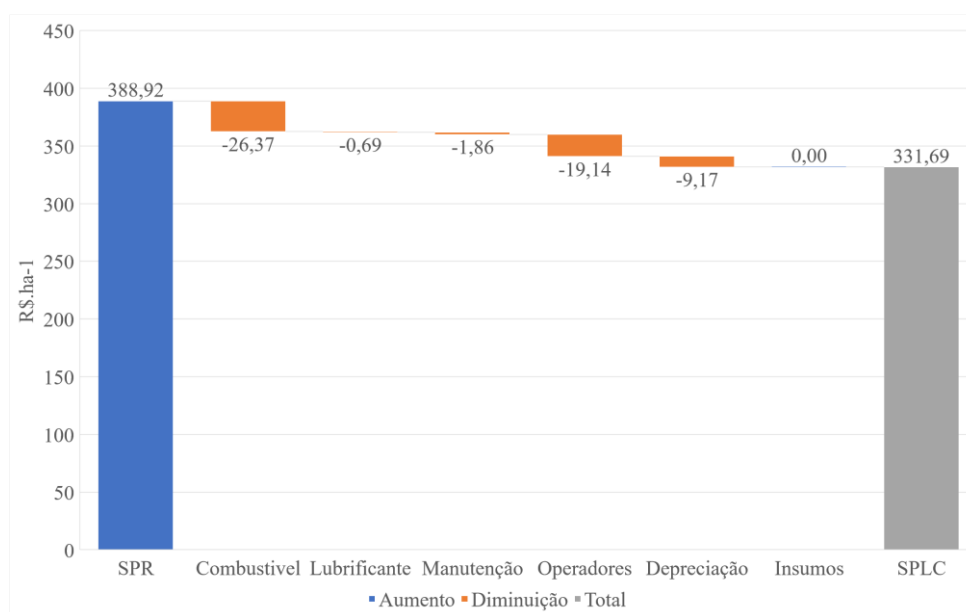
Figura 82 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador)



Na Figura 82, observa-se redução de 342,83 R\$ ha⁻¹ (35,3%) no SPLC frente ao SPR, sendo a redução da dose de P₂O₅ responsável por 73,6%. Porém é importante destacar que o consumo de combustível e lubrificante foi reduzido em cerca de 31% base volume, resultado importante ao considerar benefícios ambientais pela redução de emissão de GEE.

Ao se desconsiderar a aplicação de fósforo tanto no SPR quanto no SPLC, observa-se pela análise da Figura 83, redução de 57,23 R\$ ha⁻¹ (14,7%), principalmente em combustíveis e lubrificantes que representam 47,3% deste montante. Em volume, combustíveis e lubrificantes apresentam redução de cerca de 24% no SPLC em relação ao SPR, podendo ser explicado pela $P_{eh_{prep}}$ (Tabela 40), ou seja, melhor desempenho do conjunto trator implemento na operação de canteirização frente a operação de subsolagem. Nestas condições o efeito de redução de consumo de diesel equivale a 9,09 l ha⁻¹.

Figura 83 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado ao canteirizador) sem aplicação de P_2O_5



Serão utilizadas a Figura 84 e Figura 85 para a análise entre SPR e SPLS com e sem aplicação de P_2O_5 respectivamente. Em ambos os cenários a diferença é de 99,09 R\$ ha⁻¹, seguindo a mesma lógica para os demais componentes de custo. Em termos relativos, nota-se diferença dado que em ambos sistemas os custos envolvidos entre aplicação e insumo relativos ao P_2O_5 , MAP quando utilizado corresponde a 582,64 R\$ ha⁻¹, ou seja, 60,0% para o SPR e 66,88% para o SPLS.

Figura 84 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada)

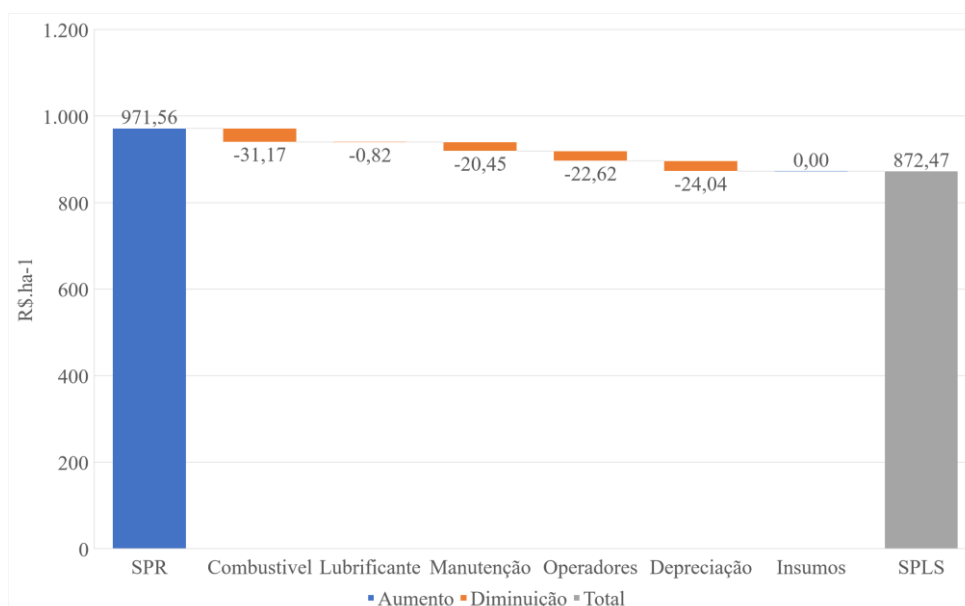
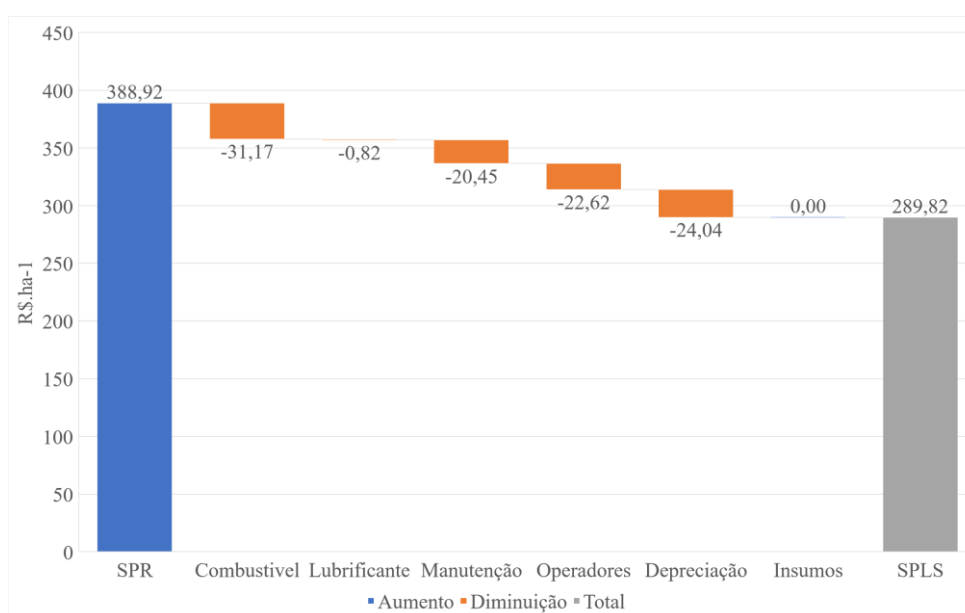


Figura 85 - Comparativo de custos entre SPR (sistema de preparo de solo reduzido) e SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada) sem aplicação de P_2O_5



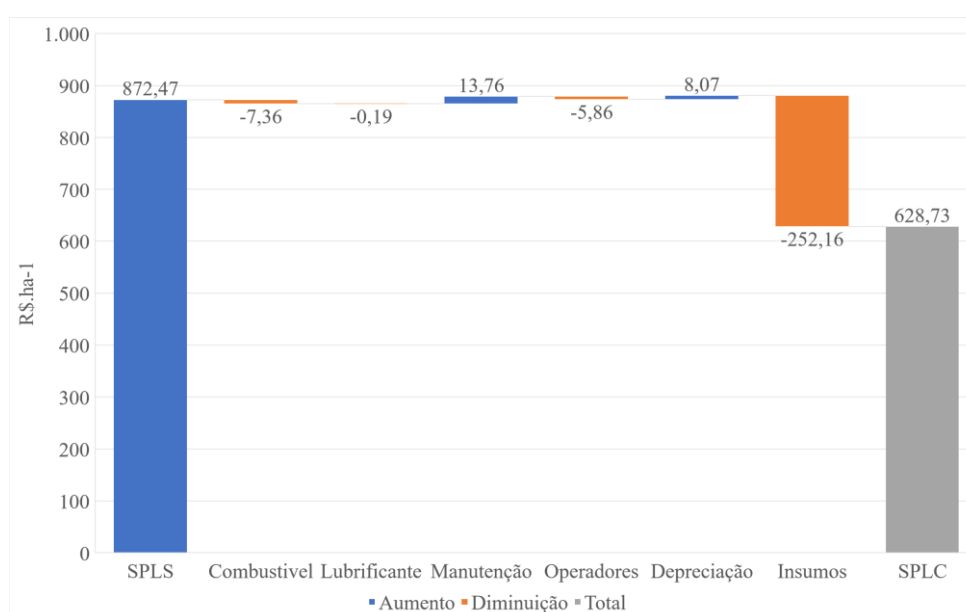
Ainda em relação a Figura 84 e a Figura 85, observa-se como diferencial a redução de $10,75 \text{ l ha}^{-1}$ em consumo de diesel em SPLS, reforçando assim a vantagem do STC quando analisa-se sistemas de preparo de solo quanto a contribuição de redução de emissão de GEE.

O setor sucroalcooleiro é marcado por períodos de crises conforme abordado pelo IPEA (2016). Nestes momentos, uma das ações das unidades de bioenergia é a

redução de insumos, entre eles a prática da fosfatagem. Neste contexto, será realizada a análise do SPLC e SPLS com e sem a aplicação de P_2O_5 .

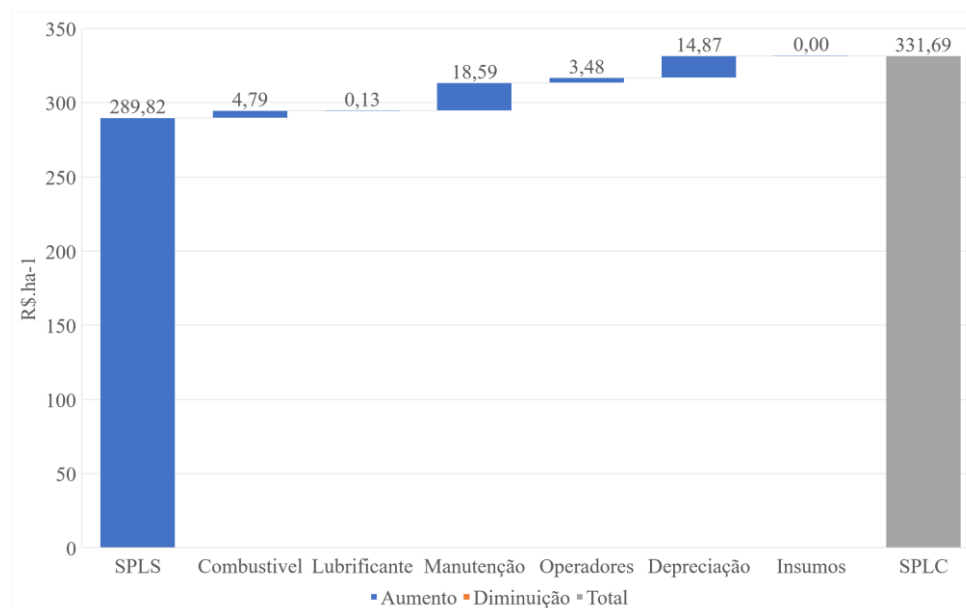
A análise da Figura 86 indica redução de custos no SPLC frente ao SPLS de 243,73 R\$ ha⁻¹ (27,9%), sendo o principal ofensor ao SPLS os custos referentes a insumo P_2O_5 , que corresponde a 252,16 R\$ ha⁻¹. Importante também observa que o VI inicial do trator e do implemento canteirizador resulta em maiores gastos em manutenção e depreciação.

Figura 86 - Comparativo de custos entre SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador)



Lançando-se mão da utilização de P_2O_5 - Figura 87 - o SPLC tem valor superior em custo de 41,87 R\$ ha⁻¹ (10,8%) quando comparado ao SPLS, tendo como principais ofensores a manutenção e depreciação, correspondendo a 33,46 R\$ ha⁻¹ (79,9%) da diferença entre custos. Nota-se ao analisar a Tabela 40 valores iniciais de aquisição do implemento canteirizador frente ao subsolador e, necessidade de trator de maior potência para a operação de canteirização.

Figura 87 - Comparativo de custos entre SPLS (sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada) e SPLC (sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador) sem aplicação de P_2O_5



Em resumo tem-se que o SPLC e SPLS apresentam-se como boas alternativas para redução de custos e emissões de GEE, sem mencionar vantagens operacionais como retomada menor tempo de retomada pós-chuva em operações de plantio (principalmente no sistema mecanizado), tratos culturais e colheita mecanizada. Referente ao plantio no sistema mecanizado, espera-se menor demanda de energia uma vez que a sulcação será realizada sob canteiro previamente preparado, bem como melhora na condição de rolagem do conjunto trator-plantadora estar trafegando em área compactada.

5.1.3 Impacto de sistemas de preparo de solo

Utilizando-se a metodologia descrita no capítulo 4.2.2, foram desenvolvidas equações para a modelagem da evolução do canavial – Tabela 41. A partir daí obteve-se como resultado a Tabela 42, onde as áreas obtidas para o SPC e SPR são constantes para todos os anos e as áreas para SPLC e SPLS seguem a lógica da Tabela 17. A etapa seguinte foi associar os custos operacionais para determinar os fluxos de caixa e os valores presente líquidos, conforme Tabela 43. A margem de contribuição entre os sistemas de preparo foi obtida por meio da diferença entre o VPL do sistema referência subtraído do VPL do sistema em análise - Tabela 44. O software utilizado para a estruturação de equações bem como a construção de cenários foi o Excel®.

Tabela 41 – Equações para modelagem de evolução de canavial

Variável	Sigla	Unidade	Equação	
Capacidade de processamento industrial	Moagem _{safra}	t.ano ⁻¹		
Participação cana própria	Cana _{própria}	%		
Produção de cana própria	Produção _{própria}	t.ano ⁻¹	$Produção_{própria} = Moagem_{safra} * Cana_{própria}$	Equação 35
Taxa de multiplicação de viveiros	Taxa _{multiplicação}	ha ha ⁻¹	$Taxa_{multiplicação} = \frac{TCH_v}{Consumo_{muda}}$	Equação 36
Produtividade em área total explorada	TCH _{total}	t ha ⁻¹	$TCH_{total} = \frac{1}{Longevidade + 1} * \left[\left(TCH_1 - \frac{TCH_1}{Taxa_{multiplicação}} \right) + \sum_{n=2}^5 TCH_n \right]$	Equação 37
Área total explorada	Área _{total}	ha	$Área_{total} = \frac{Produção_{própria}}{TCH_{total}}$	Equação 38
Área viveiros	Área _{viveiros}	ha	$Área_{viveiros} = \frac{Área_{total}}{(Longevidade + 1) * Taxa_{multiplicação}}$	Equação 39
Área plantio	Área _{plantio}	ha	$Área_{plantio} = Área_{viveiros} * Taxa_{multiplicação}$	Equação 40
Área 1ºCorte	Área _{1C}	ha	$Área_{1C} = Área_{viveiros} * (Taxa_{multiplicação} - 1)$	Equação 41
Área 2ºCorte	Área _{2C}	ha	$Área_{2C} = Área_{plantio}$	Equação 42
Área 3ºCorte	Área _{3C}	ha	$Área_{3C} = Área_{plantio}$	Equação 43
Área 4ºCorte	Área _{4C}	ha	$Área_{4C} = Área_{plantio}$	Equação 44
Área 5ºCorte	Área _{5C}	ha	$Área_{5C} = Área_{plantio}$	Equação 45
Área destinada a moagem	Área _{moagem}	ha	$Área_{moagem} = Área_{viveiros} * (Taxa_{multiplicação} * Longevidade - 1)$	Equação 46
Área destinada a tratos culturais de soqueira	Área _{tratos}	ha	$Área_{tratos} = (Longevidade - 1) * Área_{plantio} + Área_{viveiros}$	Equação 47
Produtividade do canavial	TCH	t ha ⁻¹	$TCH = \frac{Produção_{própria}}{Área_{moagem}}$	Equação 48

Tabela 42 – Evolução de canavial para SPC, SPR, SPLC e SPLS; considerando aumento de 10% TCH no SPLC e SPLS

Sistema de preparo Variável	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Preparo convencional ou reduzido										
<u>Produtividade ($t\ ha^{-1}$)</u>										
Taxa _{multiplicação}	7,50									
TCH ₁	108,20									
TCH ₂	102,85									
TCH ₃	97,25									
TCH ₄	91,28									
TCH ₅	83,32									
<u>Área na estabilidade (ha)</u>										
Área _{viveiros}	508,72									
Área _{total}	22.892,32									
Área _{1C}	3.306,68									
Área _{moagem}	18.568,28									
Área _{plântio}	3.815,40									
Área _{tratos}	15.770,32									
TCH	96,26									
TCH _{total}	78,08									
Preparo localizado										
<u>Produtividade ($t\ ha^{-1}$)</u>										
Taxa _{multiplicação}	7,50	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
TCH ₁	108,20	119,02	119,02	119,02	119,02	119,02	119,02	119,02	119,02	119,02
TCH ₂	102,85	102,85	113,14	113,14	113,14	113,14	113,14	113,14	113,14	113,14
TCH ₃	97,25	97,25	97,25	106,98	106,98	106,98	106,98	106,98	106,98	106,98
TCH ₄	91,28	91,28	91,28	91,28	100,41	100,41	100,41	100,41	100,41	100,41
TCH ₅	83,32	83,32	83,32	83,32	83,32	91,65	91,65	91,65	91,65	91,65
<u>Área na estabilidade (ha)</u>										
Área _{viveiros}	508,72	452,05	442,52	433,91	426,12	419,25	419,25	419,25	419,25	419,25
Área _{total}	22.892,32	22.376,47	21.904,81	21.478,40	21.093,14	20.752,73	20.752,73	20.752,73	20.752,73	20.752,73
Área _{1C}	3.306,68	3.277,36	3.208,27	3.145,85	3.089,37	3.039,56	3.039,56	3.039,56	3.039,56	3.039,56
Área _{moagem}	18.568,28	18.195,01	17.811,43	17.464,88	17.151,33	16.874,81	16.874,81	16.874,81	16.874,81	16.874,81
Área _{plântio}	3.815,40	3.729,41	3.650,79	3.579,76	3.515,49	3.458,81	3.458,81	3.458,81	3.458,81	3.458,81
Área _{tratos}	15.770,32	15.369,69	15.045,68	14.752,95	14.488,08	14.254,49	14.254,49	14.254,49	14.254,49	14.254,49
TCH	96,26	98,24	100,35	102,34	104,22	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92
TCH _{total}	78,08	79,88	81,60	83,22	84,74	86,13	86,13	86,13	86,13	86,13

Tabela 44 – Margem de contribuição (R\$) entre sistemas de preparo de solo

Comparativo	Ganho de produtividade									
	0,0%	2,5%	5,0%	7,5%	10,0%	12,5%	15,0%	17,5%	20,0%	22,5%
VPL _{SPC} - VPL _{SPLC}	19.679.546	31.318.871	42.462.068	53.170.219	63.416.017	73.257.364	82.714.753	91.854.622	100.612.503	109.057.193
VPL _{SPC} - VPL _{SPLS}	13.059.293	24.804.515	36.049.152	46.854.830	57.194.002	67.125.094	76.668.751	85.892.049	94.729.909	103.251.759
VPL _{SPR} - VPL _{SPLC}	9.311.858	20.951.183	32.094.380	42.802.532	53.048.329	62.889.676	72.347.065	81.486.934	90.244.815	98.689.505
VPL _{SPR} - VPL _{SPLS}	2.691.605	14.436.827	25.681.464	36.487.142	46.826.315	56.757.406	66.301.063	75.524.362	84.362.221	92.884.071

Ao analisar a Tabela 44, consegue-se elementos que contribuem para a tomada de decisão referente a adoção de implantação de novos processos. A partir de cada VPL para FC de 10 anos, conclui-se que:

- ➔ No pior cenário -onde o incremento em TCH é nulo- a margem de contribuição é de R\$ 2,69 milhões, resultado da substituição do SPR pelo SPLS. Segundo PECEGE (2020) a margem líquida agroindustrial média para a região Centro-Sul é de 16,46 R\$ t⁻¹ (10,41%), logo a unidade de bioenergia modelada apresenta como margem líquida R\$ 318,17 milhões -fluxo de caixa descontado em 10 anos. Neste caso os esforços para a implantação da tecnologia resultariam em contribuição de 0,8% sobre margem líquida. Cabe aqui as seguintes ressalvas: não se considera benefícios e potenciais receitas em crédito de carbono¹⁰ dada redução de GEE, sendo importante parâmetro a consolidação do RENOVABIO¹¹, onde esse valor será factível e deverá ser computado no curto prazo e; Galambošová et al. (2014) mostram que a resposta de rendimento mais comum ao STC foi um aumento na faixa de 10 a 20% e havia quase 100% de probabilidade de uma resposta de rendimento positiva em qualquer ano.
- ➔ O melhor cenário é onde propõem-se a substituição do SPC pelo SPLC com ganho de produtividade de 22,5%. A margem de contribuição encontrada é de R\$ 109,06 milhões, o que representa 34,3% da margem líquida da unidade de bioenergia avaliada.

Para entender a representatividade de cada uma das margens de contribuição obtida em relação à margem líquida (ML) elaborou-se a Tabela 45, a qual demonstra

¹⁰ Um crédito de carbono é a representação de uma tonelada de carbono que deixou de ser emitida para a atmosfera, contribuindo para a diminuição do efeito estufa. Existem diversas maneiras de gerar créditos de carbono, dentre elas, a substituição ou redução de combustíveis fósseis.

¹¹ RenovaBio é a Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela Lei nº 13.576/2017, com os seguintes objetivos:

- ➔ Fornecer uma importante contribuição para o cumprimento dos compromissos determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris;
- ➔ Promover a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e
- ➔ Assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e uso de biocombustíveis

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

(<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio#:~:text=Funcionamento,energ%C3%A9tica%20de%20transportes%20do%20pa%C3%ADs.>)

valores atrativos para todas as comparações realizadas a partir de 5% de ganho de produtividade.

Tabela 45 – Margem de contribuição relativa (%)

Margem relativa	Ganho de produtividade (%)									
	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5
(VPL _{SPC} - VPL _{SPLC})/ML	6,2	9,8	13,3	16,7	19,9	23,0	26,0	28,9	31,6	34,3
(VPL _{SPC} - VPL _{SPLS})/ML	4,1	7,8	11,3	14,7	18,0	21,1	24,1	27,0	29,8	32,5
(VPL _{SPR} - VPL _{SPLC})/ML	2,9	6,6	10,1	13,5	16,7	19,8	22,7	25,6	28,4	31,0
(VPL _{SPR} - VPL _{SPLS})/ML	0,8	4,5	8,1	11,5	14,7	17,8	20,8	23,7	26,5	29,2

Como mencionado anteriormente, o setor sucroenergético apresenta sempre períodos de crise, havendo necessidade de reduções de custos. Diante disso, foi elaborada a Tabela 46 e Tabela 47 onde foi desconsiderada a aplicação de P_2O_5 , ficando claro a perda de competitividade do SPLC ante a opção de aplicação de P_2O_5 . É possível concluir que:

- ➔ O cenário menos rentável passa a ser agora o que considera a substituição do SPR pelo SPLC quando não há ganho de produtividade;
- ➔ Frente ao SPR os cenários passam a apresentar representatividade a partir de 7,5% de ganho em TCH. Aqui também não se considerou ganhos referentes a melhor desempenho de equipamentos de plantio, efeito de retomada de atividades mecanizadas pós-chuva e preservação de cobertura vegetal área.

Os recursos financeiros envolvidos para aquisição de equipamentos e implementos para SPC, SPR, SPLC e SPLS, considerado a unidade de bioenergia em análise, é apresentado na Tabela 48, Tabela 49, Tabela 50 e Tabela 51

Tabela 46 - Margem de contribuição (R\$) entre sistemas de preparo de solo – sem fosfatagem

Comparativo	Ganho de produtividade (%)									
	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5
VPL _{SPC} - VPL _{SPLC}	11.922.142	23.432.408	34.451.976	45.041.267	55.173.264	64.905.237	74.257.489	83.295.679	91.956.088	100.306.739
VPL _{SPC} - VPL _{SPLS}	13.059.293	24.551.368	35.553.513	46.126.051	56.242.010	65.958.567	75.296.001	84.319.861	92.966.531	101.303.929
VPL _{SPR} - VPL _{SPLC}	1.554.455	13.064.720	24.084.288	34.673.579	44.805.577	54.537.549	63.889.801	72.927.992	81.588.400	89.939.051
VPL _{SPR} - VPL _{SPLS}	2.691.605	14.183.680	25.185.825	35.758.363	45.874.322	55.590.879	64.928.313	73.952.173	82.598.843	90.936.241

Tabela 47 - Margem de contribuição (%) – sem fosfatagem

Margem relativa	Ganho de produtividade (%)									
	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5
(VPL _{SPC} - VPL _{SPLC})/ML	3,7	7,4	10,8	14,2	17,3	20,4	23,3	26,2	28,9	31,5
(VPL _{SPC} - VPL _{SPLS})/ML	4,1	7,7	11,2	14,5	17,7	20,7	23,7	26,5	29,2	31,8
(VPL _{SPR} - VPL _{SPLC})/ML	0,5	4,1	7,6	10,9	14,1	17,1	20,1	22,9	25,6	28,3
(VPL _{SPR} - VPL _{SPLS})/ML	0,8	4,5	7,9	11,2	14,4	17,5	20,4	23,2	26,0	28,6

Tabela 48 – Quadro de investimentos sistema de preparo de solo convencional

Operação	Produção anual ha	Utilização %	Potência cv	Equipamentos necessários	Implementos necessários	Valor inicial do equipamento R\$	Valor Inicial do implemento R\$	Investimento R\$
Dessecação	20.914	100		1		1.100.000	0	1.100.000
Gradagem pesada	2.286	100	220		2		56.000	
Gradagem intermediária	3.936	200	210	5	2	448.800	39.350	2.465.200
Gradagem niveladora	5.447	100	220		1		30.500	
Aplicação de fósforo	7.477	100		1	1	350.000	180.000	530.000
Subsolagem	1.593	100	250	3	3	510.000	42.000	1.656.000
Total								5.751.200

Tabela 49 – Quadro de investimento sistema de preparo de solo reduzido

Operação	Produção anual ha	Utilização %	Potência cv	Equipamentos necessários	Implementos necessários	Valor inicial do equipamento R\$	Valor Inicial do implemento R\$	Investimento R\$
Eliminação mecânica de soqueira	1.886	38	200	1	1	408.000	70.000	478.000
Dessecação	20.914	62		1	1	1.100.000		1.100.000
Aplicação de fósforo	7.477	100		1	1	350.000	180.000	530.000
Subsolagem	1.593	100	250	3	3	510.000	42.000	1.656.000
Total								3.764.000

Tabela 50 – Quadro de investimento sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador

Operação	Produção anual ha	Utilização %	Potência cv	Equipamentos necessários	Implementos necessários	Valor inicial do equipamento R\$	Valor Inicial do implemento R\$	Investimento R\$
Eliminação mecânica de soqueira	1.886	38	200	1	1	408.000	70.000	478.000
Dessecação	20.914	62		1	1	1.100.000		1.100.000

Para o SPC, como os tratores que executam as operações de gradagem são de potência muito próxima, optou-se por fazer o dimensionamento simultâneo das atividades, ainda assim, é o sistema de preparo que mais necessidade de recursos financeiros, variando de R\$ 5,22 milhões -sem fosfatagem - a R\$ 5,75 milhões.

O sistema de preparo localizado apresenta valores de R\$ 2,48 milhões -SPLS sem fosfatagem- a R\$ 3,01 milhões em capital investido, ou seja, redução de investimentos em equipamentos e implementos de 44,9% a 52,5% comparado ao SPC . Em relação ao SPR representa redução de necessidade de capital financeiro de 11,1% - sem fosfatagem- a 23,4%.

A necessidade de recursos financeiros para o SPLC é de R\$ 2,88 milhões, apresentando vantagem de 4,6% quando comparado ao SPLS com fosfatagem e desvantagem de 13,9% sem fosfatagem, que representa R\$ 398.400.

O sistema de preparo localizado, tem ainda outras vantagens, como permitir a utilização de subprodutos da agroindústria canavieira de maneira eficiente e econômica. A torta de filtro é um dos subprodutos obtidos e, segundo Penatti (2013) resulta em excelentes repostas devido aos fatores: fornecimento de macro e micronutrientes- principalmente P_2O_5 -; menor lixiviação dos elementos minerais na matéria-orgânica; produção de substâncias complexantes e quelatizantes durante a mineralização da matéria-orgânica que reduzem a fixação de fósforo; aumento na capacidade de troca catiônica, que promove maior retenção de cátions fornecidos pelos adubos minerais, como potássio, cálcio e magnésio; retenção de maior quantidade de água; melhor desenvolvimento dos micro-organismos do solo que propiciam a absorção de nutrientes como o fósforo, fixam nitrogênio da atmosfera e podem secretar substâncias que melhoram a estrutura física do solo.

5.2 Análise da colheita mecanizada

5.2.1 Validação do modelo

A Tabela 52 traz as equações gerais para o processo de colheita de cana-de-açúcar. Tem-se na Equação 49 a quantidade máxima de matéria prima a ser processada em um dia de moagem, a Equação 50 tem como resultado os dias efetivos de safra. Estas equações são uteis para definição de parâmetros de moagem e tempo total utilizados para o processamento e são base para definição de dimensionamento e custos expressos em $R\$ t^{-1}$ e $R\$ h^{-1}$.

Tabela 52 – Equações gerais processo de colheita mecanizada

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Moagem diária	M _{dia}	t dia ⁻¹	$M_{dia} = M_{hora} * 24$	Equação 49
Dias efetivos de safra	DES	Dia	$DES = DS * AA$	Equação 50

A capacidade operacional corrigida da colhedora – RCC – é resultante do parâmetro inicialmente definido como RN e as características operacionais da área a ser colhida que definem o IC conforme apresentado na Equação 50 da Tabela 53.

Tabela 53 – Capacidade operacional corrigida da colhedora

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Capacidade operacional corrigida	RCC	t h ⁻¹	$RCC = \begin{cases} RN * (1 - IC), & IC < 70\% \\ RN * 30\%, & IC \geq 70\% \end{cases}$	Equação 51

A Equação 51, indica que quando o impacto do IC é menor que 70% no RN, aplica-se o IC para obtenção do RCC, quando este IC é maior ou igual a 70% limita-se o RN a 30%. Encontra-se no Anexo 5 exemplo de aplicação do IC.

Banchi et al. (2020) apresentam a Equação 52 para definir capacidade operacional de colheita a partir em função da produtividade agrícola e da vida operacional da colhedora.

$$HOC = 63,5 - x^{0,308} - \frac{1188}{y} \quad \text{Equação 52}$$

onde:

HOC: capacidade operacional de colheita (Mg h⁻¹);

63,5: constante correspondendo ao máximo HOC;

x: vida acumulada do equipamento (h);

y: produtividade agrícola do canavial (Mg h⁻¹)

A Equação 52 tem como base no histórico obtido dos computadores de bordo das colhedoras, registros da planta, velocidade operacional máxima de 5,5 km h⁻¹, produtividade agrícola potencial de 140 Mg ha⁻¹, largura de corte de 1,5 m, e uma eficiência de elevador de 55% foi adotada; o último porque o elevador é desligado durante uma parte do tempo de operação da colheitadeira para manobras e outras operações auxiliares. Porém, o conjunto de dados obtidos por meio de tecnologia embarcada e seu registro no SGPA, conforme descrito no capítulo 3.9, permite a abordagem mais detalhada dos parâmetros operacionais do processo, tornando possível a elaboração de equações de tempos, movimentos e disponibilidade, desenvolvidas neste trabalho, conforme apresentado na Tabela 54.

Tabela 54 – Equações para definição de tempos e movimentos e disponibilidade para o processo de colheita mecanizada

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Tempo logística colheita	T_{logc}	h dia ⁻¹	$T_{logc} = TT * \left(\frac{PR + TTT}{60} \right) + \frac{MA}{60}$	Equação 53
Tempo logística transbordo	T_{logt}	h dia ⁻¹	$T_{logt} = TT * \left(\frac{PR + TTT}{60} \right) + \frac{MA + HImp}{60}$	Equação 54
Tempo logística caminhão	T_{logcam}	h dia ⁻¹	$T_{logcam} = TT * \left(\frac{PR + TTT}{60} \right) + \frac{Check_{pneu}}{60}$	Equação 55
Tempo de manutenção em campo	TMC	h dia ⁻¹	$TMC = \frac{24 * DMC}{60 * IMC}$	Equação 56
Tempo manutenção oficina	TMO	h dia ⁻¹	$TMO = \frac{24 * DMO}{60 * IMO}$	Equação 57
Tempo em manutenção	T_{man}	h dia ⁻¹	$T_{man} = TMC + TMO$	Equação 58
Disponibilidade mecânica	Dmec	%	$Dmec = \left(1 - \frac{T_{man}}{24} \right) * 100$	Equação 59
Tempo abastecimento	T_{ab}	h dia ⁻¹	$T_{ab} = \frac{24 * Dab}{60 * IA}$	Equação 60
Tempo em lubrificação	T_{lub}	h dia ⁻¹	$T_{lub} = \frac{24 * Ilub}{60 * Dlub}$	Equação 61
Tempo troca de facas	T_{faq}	h dia ⁻¹	$T_{faq} = \frac{24 * Dfaq}{60 * Ifaq}$	Equação 62
Tempo suprimentos operacionais colhedora	TSO_C	h dia ⁻¹	$TSO_C = T_{faq} + T_{lub} + T_{ab} + \frac{Leq + Check}{60}$	Equação 63
Tempo suprimentos operacionais transbordo	TSO_T	h dia ⁻¹	$TSO_T = T_{lub} + T_{ab} + \frac{Leq + Check}{60}$	Equação 64
Tempo suprimentos operacionais caminhão	TSO_{Cam}	h dia ⁻¹	$TSO_{Cam} = T_{lcam} + T_{acam} + \frac{Leq + Check}{60}$	Equação 65
Tempo percurso bate/volta carregado	T_{PBVC}	min	$T_{PBVC} = V_{bvcar} * Dist_{bv}$	Equação 66
Tempo percurso bate/volta vazio	T_{PBVV}	min	$T_{PBVV} = V_{bvvaz} * Dist_{bv}$	Equação 67

De posse dos tempos e movimentos e disponibilidade, é possível realizar o cálculo de horas motor da colhedora e do transbordo, detalhados na Equação 68 e na Equação 69 da Tabela 55. Estas equações apoiam o cálculo de custo de variáveis de consumo específico – diesel e lubrificantes – e formaram a composição de custos da operação.

Tabela 55 – Horas motor colhedora e transbordo

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Horas motor colhedora	HMC	h	$HMC = 24 - (T_{logc} T_{man} + TSO)$	Equação 68
Hora motor transbordo	HMT	h	$HMT = 24 - (T_{logt} + T_{man} + TSO_T)$	Equação 69

As equações que compõem a Tabela 56 tem como finalidade apoiar o cálculo do capacidade operacional efetiva da colhedora. A Equação 70 é resultante das variáveis espaçamento entre linhas e produtividade, esta equação, em conjunto com RCC irá definir a velocidade operacional da colhedora - Equação 71 – que é uma das principais componentes do desempenho operacional. Aqui, percebe-se a importância de definir a capacidade operacional de colheita em função de características operacionais da área - IC - e pela característica do equipamento que está sendo operado – RN.

Tabela 56 – Equações para definição do capacidade operacional efetiva de colhedora de cana-de-açúcar

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Produtividade linear	Plin	t.m ⁻¹	$Plin = \frac{TCH * Esp}{10.000}$	Equação 70
Velocidade operacional	Vop	km h ⁻¹	$Vop = \frac{RCC}{1.000 * Plin * NL}$	Equação 71
Volume colhido por linha	VCT	t	$VCT = Plin * NL * CT$	Equação 72
Tempo comprimento tiro + Manobra	TCTM	min	$TCTM = \frac{(60 * CT)}{(1000 * Vop)} + \frac{TM}{60}$	Equação 73
Linhas colhidas	Lcol	linhas colhidas dia ⁻¹	$Lcol = \frac{HMC * Vop}{60}$	Equação 74
Tempo manobra fim de linha	T _{mfl}	h dia ⁻¹	$T_{mfl} = \frac{NL}{3.600}$	Equação 75
Tempo manobras totais	TM _{TOT}	h dia ⁻¹	$TM_{TOT} = T_{mfl} + \frac{Maux + Dab + Himp}{60}$	Equação 76

A Equação 72 tem função apenas informativa, podendo ser utilizada para gestão de campo como informação de estoque de cana a colher em áreas que estão sendo finalizadas. A Equação 76 é resultado da Equação 73, Equação 74 e Equação 75, e suportará o cálculo de horas efetivas colhendo cana-de-açúcar, indicador amplamente usado no setor sucroalcooleiro para avaliação de desempenho operacional.

Para suportar a análise de desempenho da operação de carregamento de cana-de-açúcar, foram definidas as equações que compõem a Tabela 57, mais uma vez utilizando os dados obtidos a partir de tecnologia embarcada – automação agrícola.

Tabela 57 – Equações para definir desempenho operacional de carregamento de cana-de-açúcar

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Distância carregamento transbordo	DCT	m	$DCT = \frac{Ctrans}{Plin * NL}$	Equação 77
Quantidade manobras transbordo	QMT	manobra carga ⁻¹	$QMT = 1 + \left(\frac{DCT}{CT}\right)$	Equação 78
Tempo para carregar transbordo	TCTT	min	$TCTT = \left(\frac{DCT}{\frac{1.000}{Vop}}\right) * 60$ $+ \frac{QMT * TM}{60}$	Equação 79
Tempo total de ciclo transbordo	TTCT	min	$TTCT = TCTT + D_{vaz} + D_{car} + T_{carga}$	Equação 80
Ciclos por dia Transbordo	CDT	ciclos d ⁻¹	$CDT = \frac{60 * HMT}{TTCT}$	Equação 81

De maneira análoga à operação de carregamento, a Tabela 58 apresenta o conjunto de equações para definir capacidade operacional de caminhões utilizados no transporte de cana-de-açúcar.

Tabela 58 – Equações para definir desempenho operacional de transporte de cana-de-açúcar

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Capacidade de transporte	Transp	t ciclo ⁻¹	$Transp = D_{carga} * Semi$	Equação 82
Ciclo caminhão	CCAM	min	$CCAM = \frac{60 * Raio}{V_{vaz}} + \frac{60 * Raio}{V_{car}} + T_{usina} + T_{campo}$	Equação 83
Ciclos por dia caminhão	CDCAM	ciclos d ⁻¹	$CDCAM = \frac{(24 - T_{logcam} - TSO_c) * 60 * DISP_{CAM}}{CCAM}$	Equação 84
Ciclo caminhões	CCAMH	ciclos h ⁻¹	$CCAMH = \frac{CCAM}{24}$	Equação 85
Estoque sobre rodas	ESR	conjuntos	$ESR = \frac{M_{hora} * Estoq}{D_{carga} * Semi}$	Equação 86
Ciclo bate/volta	CBVT	min	$CBVT = 2 * T_{edbv} + T_{PBVC} + T_{PBVV} + T_{peso} + T_{amostra} + T_{descarga}$	Equação 87

As equações desenvolvidas nas etapas descritas anteriormente, são utilizadas para a obter-se as capacidades operacionais de colhedora (colheita), conjunto trator-transbordo (carregamento) e caminhões (transporte). A Tabela 59 comporta o conjunto de equações para a determinação da desempenho operacional do processo de colheita mecanizada.

Tabela 59 – Capacidades operacionais de colheita, carregamento e transporte de cana-de-açúcar

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Capacidade operacional colhedora	ROC	t dia ⁻¹	$ROC = (HMC - TM_{TOT}) * (1.000 * Vop * Plin * NL)$	Equação 88
Capacidade operacional transbordo	ROTT	t dia ⁻¹	$ROTT = CD * Ctrans$	Equação 89
Hodômetro total ano	HTA	km ano ⁻¹	$HTA = Raio * CDCAM * DES$	Equação 90
Capacidade operacional caminhão	ROCAM	t dia ⁻¹	$ROCAM = CDCAM * D_{carga} * Semi$	Equação 91
Capacidade operacional caminhão bate/volta	ROCAMBV	t dia ⁻¹	$RODCAMBV = \frac{60 * DISP_{CAM} * D_{carga} * Semi}{CBVT}$	Equação 92
Relação transbordo / colhedora	Reltc	quantidade	$Reltc = \frac{ROC}{ROTT}$	Equação 93
Horas produtivas colhedora	HPC	h dia ⁻¹	$HPC = HMC - TM_{TOT}$	Equação 94
Utilização colhedora	Utc	h.ano ⁻¹	$Utc = DES * HMC$	Equação 95
Utilização transbordo	Utt	h.ano ⁻¹	$Utt = DES * HMT$	Equação 96
Utilização caminhão	Utcam	h.ano ⁻¹	$Utcam = DES * RODCAM$	Equação 97
Utilização caminhão bate/volta	Utcambv	h.ano ⁻¹	$Utcambv = DES * RODCAMBV$	Equação 98

Os consumos de combustíveis e lubrificantes para as operações de colheita mecanizada são definidos pelo conjunto de equações representados na

Tabela 60, sendo os mesmo expressos em l ano⁻¹ e l t⁻¹.

Tabela 60 – Consumo de combustível e lubrificante na colheita mecanizada

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Consumo de combustível total colhedora	Ccombt	l ano ⁻¹	$Ccombt = Utc * Comb$	Equação 99
Consumo de combustível total transbordo	Tcombt	l ano ⁻¹	$Tcombt = Utt * Comb$	Equação 100
Consumo de combustível total caminhão	Camcombt	l ano ⁻¹	$Camcomt = \frac{HTA}{Comb_{cam}}$	Equação 101
Consumo de combustível total caminhão bate/volta	Cambvcombt	l ano ⁻¹	$Cambvcomt = \frac{2 * Dist_{BV} * RODCAMBV * DES}{Semi * D_{carga} * Comb_{cam}}$	Equação 102
Consumo de combustível tonelada colhedora	Ccomb	l t ⁻¹	$Ccomb = \frac{Ccombt}{ROC * DES}$	Equação 103
Consumo de combustível tonelada transbordo	Tcomb	l t ⁻¹	$Tcomb = \frac{Tcombt}{ROTT * DES}$	Equação 104
Consumo de combustível tonelada caminhão	Camcomb	l t ⁻¹	$Camcomb = \frac{Camcomt}{RODCAM * DES}$	Equação 105
Consumo de combustível tonelada caminhão bate/volta	Cambvcomb	l t ⁻¹	$Cambvcomb = \frac{Cambvcombt}{RODCAMBV * DES}$	Equação 106
Consumo de lubrificante total colhedora	Cclubt	l ano ⁻¹	$Cclubt = Utc * Lub$	Equação 107

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Consumo de lubrificante total transbordo	Tclubt	l ano ⁻¹	$Tclubt = Utt * Lub$	Equação 108
Consumo de lubrificante total implemento transbordo	Ticlubt	l ano ⁻¹	$Ticlub = Utt * Lub$	Equação 109
Consumo de lubrificante total caminhão	Camclubt	l ano ⁻¹	$Camclubt = Utcam * Lub$	Equação 110
Consumo de lubrificante total caminhão bate/volta	Cambvclubt	l ano ⁻¹	$Cambvclubt = Utcambv * Lub$	Equação 111
Consumo de lubrificante tonelada colhedora	Cclub	l t ⁻¹	$Cclub = \frac{Cclubt}{ROC * DES}$	Equação 112
Consumo de lubrificante transbordo	Tclub	l t ⁻¹	$Tclub = \frac{Tclubt + Ticlubt}{ROTT * DES}$	Equação 113
Consumo de lubrificante caminhão	Camclub	l t ⁻¹	$Camclub = \frac{Camclubt}{RODCAM * DES}$	Equação 114
Consumo de lubrificante caminhão bate/volta	Cambvclub	l t ⁻¹	$Cambvclub = \frac{Cambvclubt}{RODCAMB * DES}$	Equação 115

O acompanhamento das operações por meio de automação agrícola tem como consequência a implementação de rotina de gestão por indicadores. Assim as equações apresentadas na Tabela 61, fornecem os indicadores obtidos na etapa de planejamento de operações para acompanhamento da operação, permitindo a visualização de desvios e consequentemente a discussão de planos de adequação.

Tabela 61 – Capacidades operacionais de colheita mecanizada para a gestão por indicadores

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Capacidade operacional efetiva colhedora 24 horas	RECD	t h ⁻¹	$RECD = \frac{ROC}{24}$	Equação 116
Capacidade operacional efetiva colhedora hora motor	RECM	t h ⁻¹	$RECM = \frac{ROC}{HMC}$	Equação 117
Capacidade operacional efetiva hora produtiva colhedora	RECP	t h ⁻¹	$RECP = \frac{ROC}{HPC}$	Equação 118
Capacidade operacional efetiva hora produtiva transbordo	RETP	t h ⁻¹	$RETP = \frac{ROTT}{24}$	Equação 119
Capacidade operacional efetiva caminhão 24 horas	RECAMD	t h ⁻¹	$RECAMD = \frac{ROCAM}{24}$	Equação 120
Capacidade operacional efetiva caminhão bate/volta 24 horas	RECAMBVD	t h ⁻¹	$RECAMBVD = \frac{ROCAMBV}{24}$	Equação 121

O detalhamento de custos variáveis – combustível, lubrificante e manutenção – e fixos – operadores e depreciação – estão dispostos nas equações da Tabela 62.

Tabela 62 – Custos fixos e variáveis para a colheita mecanizada de cana-de-açúcar

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Custo combustível colhedora	Ccustcomb	R\$ h ⁻¹	$Custcomb = RECM * Ccomb * Vcomb$	Equação 122
Custo combustível transbordo	Tcustcomb	R\$ h ⁻¹	$Tcustcom = RETP * Tcom * Vcomb$	Equação 123
Custo combustível caminhão	Camcustcomb	R\$ h ⁻¹	$Camcustcomb = RECAMD * Camcomb * Vcomb$	Equação 124
Custo combustível caminhão bate/volta	Cambvcustcomb	R\$ h ⁻¹	$Cammbvcustcomb = RECAMBVD * Cambvcomb * Vcomb$	Equação 125
Custo lubrificante colhedora	Ccustlub	R\$ h ⁻¹	$Ccustlub = RECM * Cclub * Vlub$	Equação 126
Custo lubrificante transbordo	Tcustlub	R\$ h ⁻¹	$Tcustlub = RET * Tclub * Vlub$	Equação 127
Custo lubrificante caminhão	Camcustlub	R\$ h ⁻¹	$Camcustlub = RECAMD * Camclub * Vlub$	Equação 128
Custo lubrificante caminhão bate/volta	Cambvcustlub	R\$ h ⁻¹	$Cammbvcustlub = RECAMBVD * Cambvclub * Vlub$	Equação 129
Custo manutenção colhedora	Ccustman	R\$ h ⁻¹	$Ccustman = \frac{VIE * Man}{Utc}$	Equação 130
Custo manutenção transbordo	Tcustman	R\$ h ⁻¹	$Tcustman = \frac{VIE * Man}{Utt}$	Equação 131
Custo manutenção implemento transbordo	Ticustman	R\$ h ⁻¹	$Ticustman = \frac{VIE * Man_{imp}}{Utt}$	Equação 132
Custo manutenção caminhão	Camcustman	R\$ h ⁻¹	$Camcustman = \frac{VIE * Man}{Utcam}$	Equação 133
Custo manutenção semi-reboque	Camicustman	R\$ h ⁻¹	$Camicustman = \frac{VII * Man_{imp}}{Utcam}$	Equação 134
Custo manutenção caminhão bate/volta	Cambvcustman	R\$ h ⁻¹	$Cammbvcustman = \frac{VIE * Man}{Utcambv}$	Equação 135
Custo operadores colhedora	Ccustoper	R\$ h ⁻¹	$Ccustoper = \frac{Sal * (1 + Enc) * 13 * TT * (1 + A) * (1 + F)}{Utc}$	Equação 136
Custo operadores transbordo	Tcustoper	R\$ h ⁻¹	$Tcustoper = \frac{Sal * (1 + Enc) * 13 * TT * (1 + A) * (1 + F)}{Utt}$	Equação 137
Custo operadores caminhão	Camcustoper	R\$ h ⁻¹	$Camcustoper = \frac{Sal * (1 + Enc) * 13 * TT * (1 + A) * (1 + F)}{Utcam}$	Equação 138

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Custo operadores caminhão bate/volta	Cambvcustoper	R\$ h ⁻¹	$\frac{Cambvcustoper}{Sal * (1 + Enc) * 13 * TT * (1 + A) * (1 + F)}$	Equação 139
Depreciação o colhedora	Deprec	R\$ h ⁻¹	$\frac{Deprec}{\left\{ \left[VIE - \frac{VIE * VRE}{(1 + TO)^{VUE}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUE} * TO}{(1 + TO)^{VUE} - 1} \right] + \left[VII - \frac{VII * VRI}{(1 + TO)^{VUI}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUI} * TO}{(1 + TO)^{VUI} - 1} \right] \right\}}$	Equação 140
Depreciação o transbordo	Depret	R\$ h ⁻¹	$\frac{Depret}{\left\{ \left[VIE - \frac{VIE * VRE}{(1 + TO)^{VUE}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUE} * TO}{(1 + TO)^{VUE} - 1} \right] + \left[VII - \frac{VII * VRI}{(1 + TO)^{VUI}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUI} * TO}{(1 + TO)^{VUI} - 1} \right] \right\}}$	Equação 141
Depreciação o caminhão	Deprecam	R\$ h ⁻¹	$\frac{Deprecam}{\left\{ \left[VIE - \frac{VIE * VRE}{(1 + TO)^{VUE}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUE} * TO}{(1 + TO)^{VUE} - 1} \right] + \left[VII - \frac{VII * VRI}{(1 + TO)^{VUI}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUI} * TO}{(1 + TO)^{VUI} - 1} \right] \right\}}$	Equação 142
Depreciação o caminhão bate/volta	Deprecambv	R\$ h ⁻¹	$\frac{Deprecambv}{\left\{ \left[VIE - \frac{VIE * VRE}{(1 + TO)^{VUE}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUE} * TO}{(1 + TO)^{VUE} - 1} \right] + \left[VII - \frac{VII * VRI}{(1 + TO)^{VUI}} \right] * \left[\frac{(1 + TO)^{VUI} * TO}{(1 + TO)^{VUI} - 1} \right] \right\}}$	Equação 143

Os custos operacionais são importantes na gestão da área agrícola em uma agroindústria de cana-de-açúcar, assim foram desenvolvidas as equações da Tabela 63 para auxiliar os gestores deste processo.

Tabela 63 – Custos totais expressos em R\$ t⁻¹ e R\$ h⁻¹ para colheita mecanizada de cana-de-açúcar

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Custo total colhedora	Ccusttotal	R\$ h ⁻¹	$Ccusttotal = Ccustcomb + Ccustlub + Ccustman + Ccustoper + Deprec$	Equação 144
Custo total transbordo	Tcusttotal	R\$ h ⁻¹	$Tcusttotal = Tcustcomb + Tcustlub + Tcustman + Tcustoper + Depret$	Equação 145
Custo total caminhão	Camcusttotal	R\$ h ⁻¹	$Camcusttotal = Camcustcomb + Camcustlub + Camcustman + Camcustoper + Deprecam$	Equação 146
Custo total caminhão bate/volta	Cambvcusttotal	R\$ h ⁻¹	$Cambvcusttotal = Cambvcustcomb + Cambvcustlub + Cambvcustman + Cambvcustoper + Deprecambv$	Equação 147

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Custo total colhedora tonelada	Custocolheita	R\$ t ⁻¹	$Custocolheita = \frac{Ccusttotal}{RECM}$	Equação 148
Custo total transbordo tonelada	Custotração	R\$ t ⁻¹	$Custotração = \frac{Tcusttotal}{RETD}$	Equação 149
Custo total caminhão tonelada	Camcustton	R\$ t ⁻¹	$Camcustton = \frac{Camcusttotal}{RECAMD}$	Equação 150
Custo total caminhão bate/volta tonelada	Cambvcustton	R\$ t ⁻¹	$Cambvcustton = \frac{Cambvcusttotal}{RECAMBVD}$	Equação 151
Custo total transporte de cana	Custo _{transporte}	R\$ t ⁻¹	$Custotransporte = Camcustton + Cambvcustton$	Equação 152

O dimensionamento dos recursos necessário para colheita, carregamento e transporte de cana-de-açúcar é obtido por meio das equações expostas na Tabela 64.

Tabela 64 – Dimensionamento de recursos para processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar

Variável	Sigla	Unidade	Fórmula	Equação
Necessidade de colhedoras	Ncol	quantidade	$Ncol = \frac{M_{dia}}{ROC}$	Equação 153
Necessidade de transbordos	Ntran	quantidade	$Ntran = Ncol * Reltc$	Equação 154
Necessidade de caminhões	N _{cam}	quantidade	$N_{cam} = \frac{M_{dia}}{ROCAM}$	Equação 155
Necessidade de semi-reboques	N _{Semi}	quantidade	$N_{semi} = N_{cam} * Semi + (N_{fre} * 2) + \frac{M_{hora*ESR}}{Transp}$	Equação 156
Necessidade de caminhões bate/volta	N _{cambv}	quantidade	$N_{cambv} = \left(\frac{60}{CBVT} \right) * D_{carga} * Semi * Disp_{cam}$	Equação 157

A avaliação do IC obtida na área utilizada – Capítulo 4.3.5 - para validação do modelo de colheita é apresentada na Tabela 65.

Tabela 65 – Índice de colheitabilidade da área destinada a teste de desempenho. As cores atribuídas a cada indicador estão relacionadas as notas atribuídas a cada indicador que compõem o índice

Índice de colheitabilidade	123043		123044		623004		623005	
	Nota*	Farol	Nota	Farol	Nota	Farol	Nota	Farol
TCH (t/ha)	1	●	1	●	1	●	1	●
Comprimento de tiro (m)	1	●	1	●	1	●	1	●
Declividade (%)	1	●	1	●	1	●	2	●
Ocorrência de pedra e tocos	1	●	1	●	1	●	1	●
Ocorrência de erosão	1	●	1	●	2	●	2	●
Ocorrência de ervas daninhas	1	●	2	●	3	●	2	●
Nivelamento do terreno	1	●	2	●	3	●	1	●
Tombamento	2	●	1	●	2	●	1	●
Avaliação geral**	9	●	10	●	14	●	11	●

*** Nota**

Verde: nota 1, não há limitação operacional;

Amarela: nota 2, há necessidade de atenção durante a realização da operação;

Vermelha: nota 3 e 4, indicando que há restrições operacionais e que há necessidade de atenção durante a realização da operação.

**** Avaliação geral**

Verde: somatório obtido dos índices menor 14 indicando não haver problemas de colheitabilidade;

Amarela: somatório dos índices obtidos no intervalo de 14 a 19 indicam necessidade de atenção quanto à realização da operação e;

Vermelha: somatório dos índices obtidos superior a 19 indicam que a área requer muita atenção para a realização da operação da colheita mecanizada.

Os relatórios de tempos e movimentos extraídos do sistema SGPA® podem ser observados no Anexo 2. Os mesmos foram consolidados na Tabela 66.

Tabela 66 – Tempos e movimentos obtidos no teste de desempenho operacional

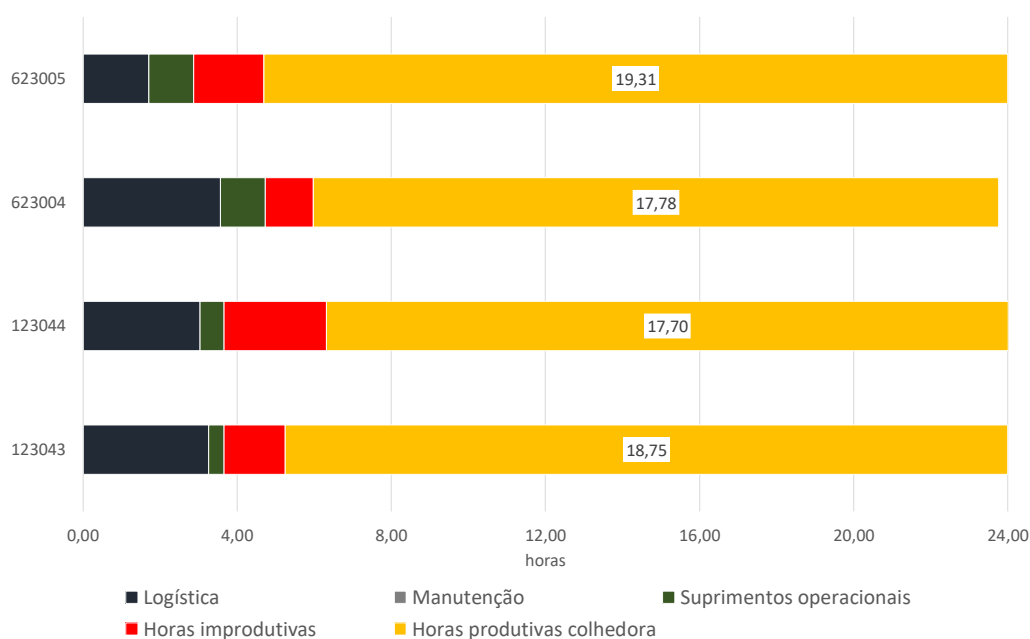
Classe	Índice	Unidade	Colhedora			
			123043	123044	623004	623005
<u>Logística</u>						
	Manobra fim de fileira	H	1,82	1,92	1,61	1,20
	Manobra auxiliar	H	0,99	1,01	1,85	0,46
	Deslocamento Abastecimento	H	0,28	0,10	0,11	0,04
	Parada para refeição	H	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempo de troca de turno	h	0,17	0,00	0,00	0,00
	Mudança de área	h	0,00	0,02	0,00	0,00
	Total	h	3,26	3,04	3,57	1,71
<u>Manutenção</u>						
	Tempo manutenção campo	h	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempo manutenção oficina	h	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	h	0,00	0,00	0,00	0,00
<u>Suprimentos operacionais</u>						
	Tempo em abastecimento	h	0,40	0,62	1,16	1,16

Classe	Índice	Unidade	Colhedora			
			123043	123044	623004	623005
	Tempo em lubrificação	h	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempo troca de facas	h	0,00	0,00	0,00	0,00
	Lavagem equipamento	h	0,00	0,00	0,00	0,00
	Checklist	h	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	h	0,40	0,62	1,16	1,16
<u>Horas Improdutivas</u>						
	Horas improdutivas	h	1,58	2,66	1,25	1,82
	Velocidade	km h⁻¹	6,00	6,00	3,99	5,00

A partir do conjunto de equações obtidas, utilizou-se o software Excel® para cálculo de seus resultados e análise de cenários.

Conclui-se que há espaços para melhorias no que se refere a gestão operacional, como por exemplo horas improdutivas e tempos logísticos - Figura 88.

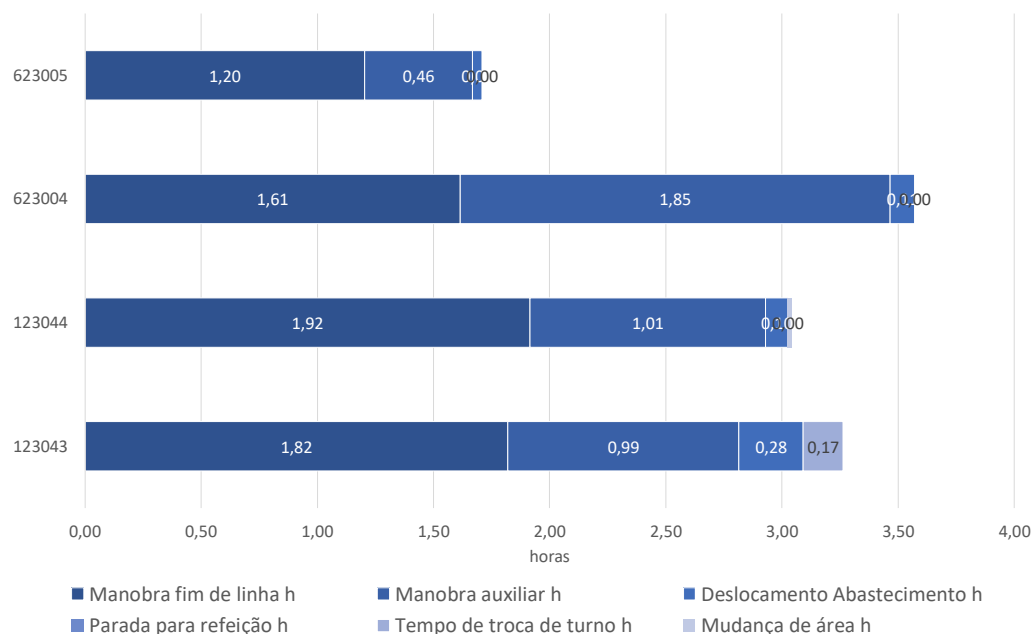
Figura 88 – Índices de tempo de desempenho operacional



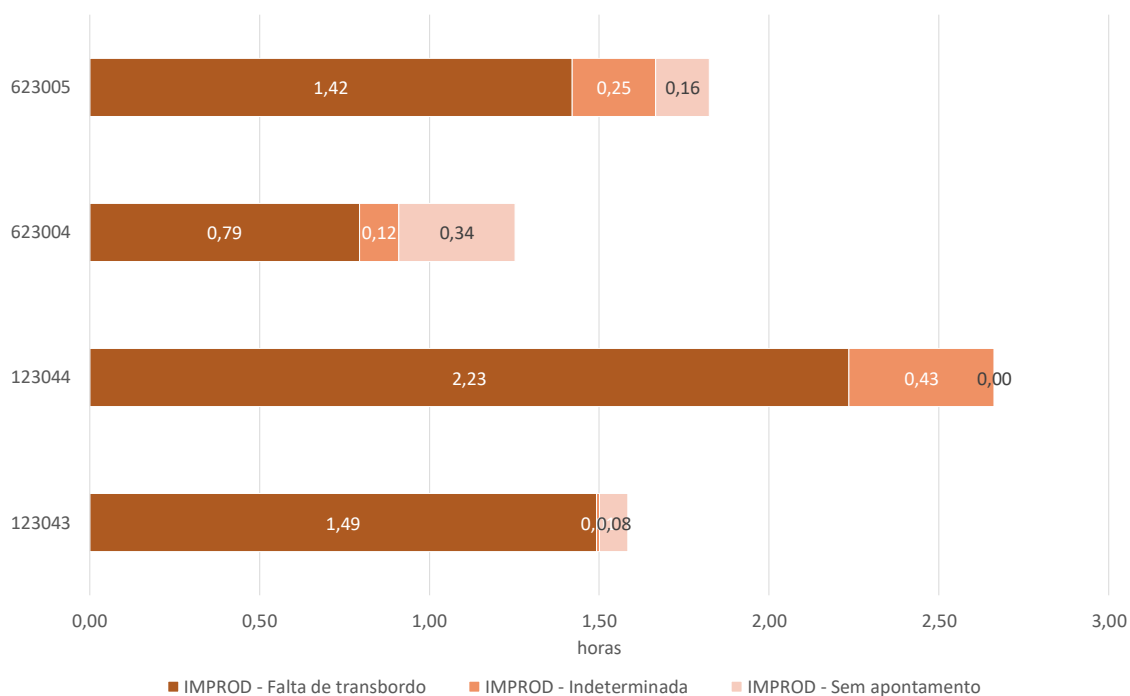
A análise de tempos logísticos - Figura 89 -, ilustra a importância de procedimentos operacionais para manobras de fim de linha na operação de colheita mecanizada. O valor excessivo de manobras auxiliares na colhedora 6230034 é resultado das condições do canavial – erosões, ervas daninhas, nivelamento do terreno e tombamento da cana -, isto implicou na necessidade de interromper a colheita para realizar manobras de desvio de obstáculos, bem como desembuchamento da área entre os

pirulitos e sistema de corte de base. Spekken et al. (2015) chegaram a conclusões equivalentes ao estudar os impactos de tempo de manobra em operações mecanizadas de cana-de-açúcar, sugerindo que há necessidade de mudanças para minimizar esta componente.

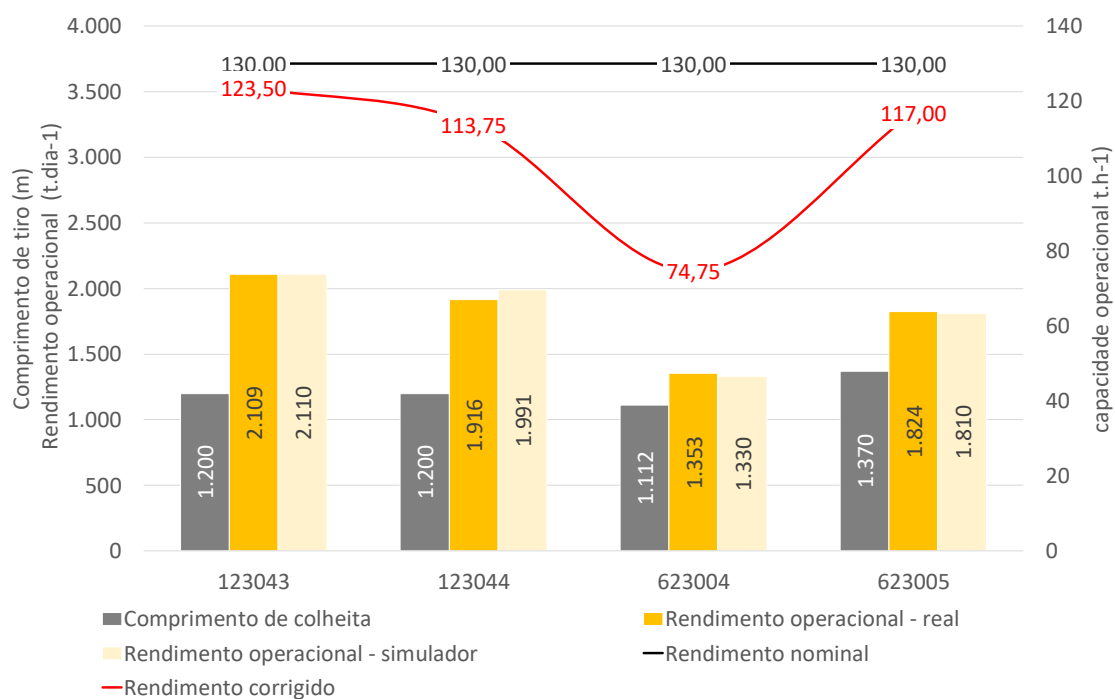
Figura 89 – Tempos logísticos em teste de desempenho de colhedoras



Ao analisar horas improdutivas - Figura 90 -, o maior impacto foi em erro de dimensionamento de transbordos necessários para que a colhedora obtivesse melhores resultados operacionais. As horas indeterminadas são oriundas de falha de comunicação/transmissão de dados. As horas sem apontamentos dizem respeito a falha do operador em identificar e apontar alguma atividade.

Figura 90 – Horas improdutivas em teste de desempenho de colhedoras

O resultado do teste de desempenho é apresentado na Figura 91.

Figura 91 – Capacidade operacional real e obtido por modelo de colheita mecanizada

Os valores de capacidade nominal (RN) e capacidade operacional corrigida (ROC) e velocidade operacional (Vop) indicado na Tabela 66, estão em linha com os encontrados por Belardo (2010), demonstrando que o modelo para colheita de cana-de-

açúcar pode ser utilizado como ferramenta para tomada de decisões e análise da operação - Figura 91.

Utilizando o teste de qui quadrado por meio da aplicação da Equação 6, nos dados obtidos na Figura 91, encontra-se $\chi^2 = 3,27$. O valor crítico de $\chi_{0,95}^2$ para a amostra com 3 graus de liberdade é de 7,81, validando o modelo para as condições de desempenho ao qual foi submetido a nível de significância de 0,05.

5.2.2 Análise exploratória de modelo de colheita mecanizada

Ao analisar a Tabela 22, pode-se observar que há condições que são impeditivas a colheita mecanizada e que associações entre vários parâmetros podem definir melhor ou pior IC. Neste sentido sugere-se a análise apresentada a seguir:

- ➔ Em situações de severidade, a colheita deve ser realizada preferencialmente manual;
- ➔ Em situações de alta ocorrência ou alta infestação de plantas daninhas a desempenho operacional ficará comprometida, exigindo atenção quanto ao ritmo de entrega de matéria-prima;
- ➔ Quando a soma das notas dos parâmetros, incluído declividade, for menor ou igual a 14 a área apresenta boa colheitabilidade;
- ➔ Quando a soma das notas dos parâmetros, incluído declividade, for maior que 14 e menor ou igual a 19 a desempenho operacional ficará comprometida.

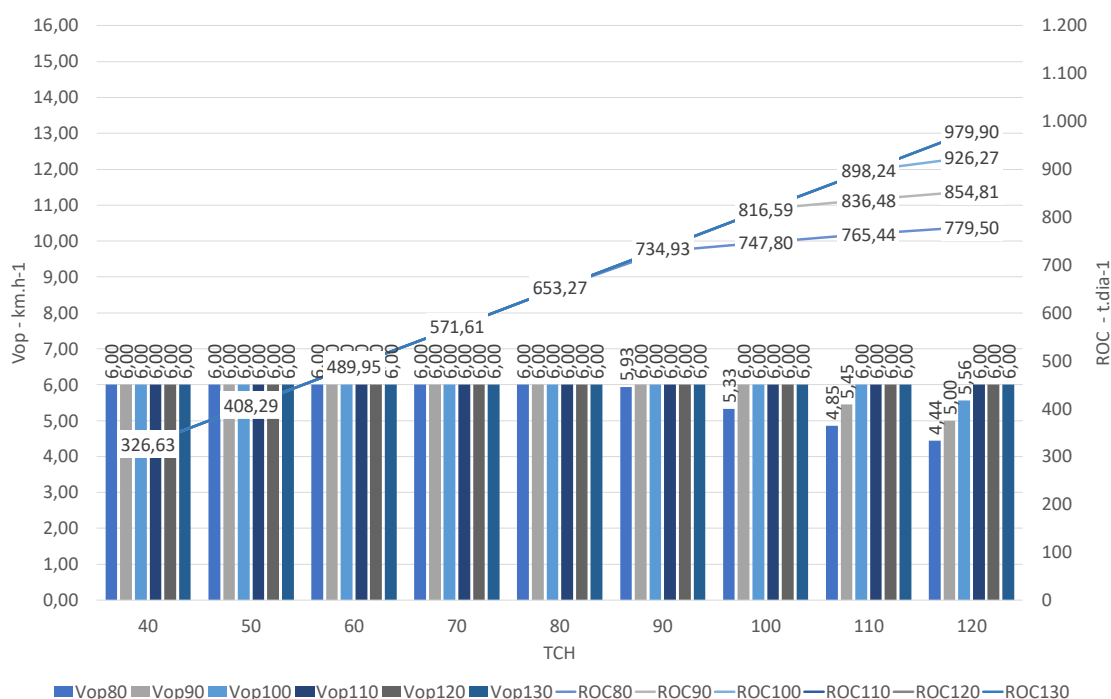
O preparo do solo e o plantio são aspectos importantes para a qualidade do corte basal realizado pelas colhedoras, pois à medida que aumentam os desníveis, buracos, presença de obstáculos como pedras e tocos na área de colheita, também aumentam as dificuldades de operação das colhedoras, resultando em maior perda de matéria-prima, presença de matéria estranha mineral e necessidade de manutenção das máquinas (VOLPATO, 2001).

Uma vez que o manejo e as operações mecanizadas em cana-de-açúcar constituem percentual importante no custo de produção e que estas operações ocorrem seguindo as fileiras e o seu caminhamento, a eficiência e a produtividade das máquinas, são proporcionais ao comprimento e a quantidade de cana por metro linear das fileiras, principalmente na colheita (BERNARDES e BELARDO, 2015). A velocidade deve ser ajustada em função das características de cada área, devendo ser analisadas: declividade

da área, tipo de solo e seu microrelevo, comprimento do talhão, porte do canavial e a produtividade agrícola estimada (BELARDO et al., 2015).

Análise de sensibilidade é a técnica de análise que busca prever o resultado gerado por alterações nos parâmetros ou nas atividades em um processo. Essa é a medida do grau de sensibilidade do processo perante uma mudança, permitindo avaliar o impacto hipotético de diferentes tipos de mudança sobre o processo como um todo, sobre um fluxo de trabalho ou sobre uma atividade e é útil para determinar como uma mudança pode impactar na operação. Desta forma, a Figura 92 permite o entendimento de como a variação do RN e TCH atuam sobre o desempenho operacional da colhedora. Para RN adotou-se os valores de 80, 90, 100, 110, 120 e 130 Mg h^{-1} ; os valores de TCH são: 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120 Mg ha^{-1} .

Figura 92 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em velocidade operacional (Vop) e capacidade operacional corrigida da colhedora (RCC) em espaçamento de 1,50 m



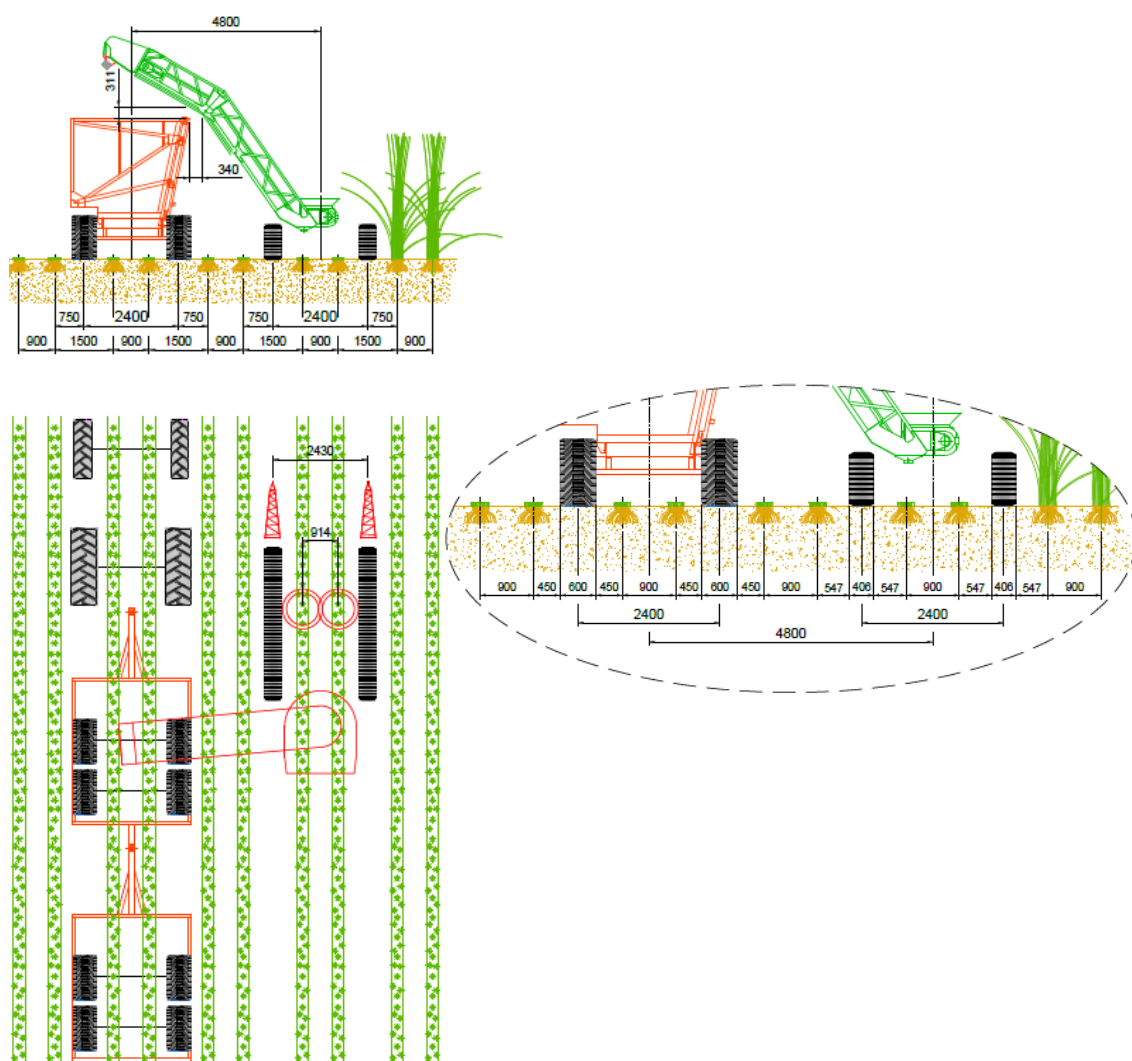
Pode-se concluir a partir da Figura 92, que:

- ➔ A Vop permanece igual a V_{max} enquanto o RCC não é atingido, a partir deste ponto a Vop irá se adequar ao RCC;
- ➔ A variação de TCH tem resultado direto no RCC, sendo mais significativo enquanto o RCC não é atingido; uma vez atingido este patamar o RCC terá ganhos marginais;

- ➔ Considerando-se que o TCH médio esperado para safra 2020/21 é de 76,3, 78,2 e 83,6 Mg ha⁻¹, para Brasil, Centro-Sul e São Paulo, respectivamente (CONAB, 2020), e que a idade média observada para o Centro-Sul é de 3,6 (PECEGE, 2020), pode-se estimar que cerca de 30% da área de colheita apresentará produtividade superior 100 Mg ha⁻¹. Isto permite a colocação que o resultado apresentado na Figura 91 para RN permitirá desempenho operacional de colhedora adequada às necessidades dos canaviais brasileiros bem próximo de sua totalidade;

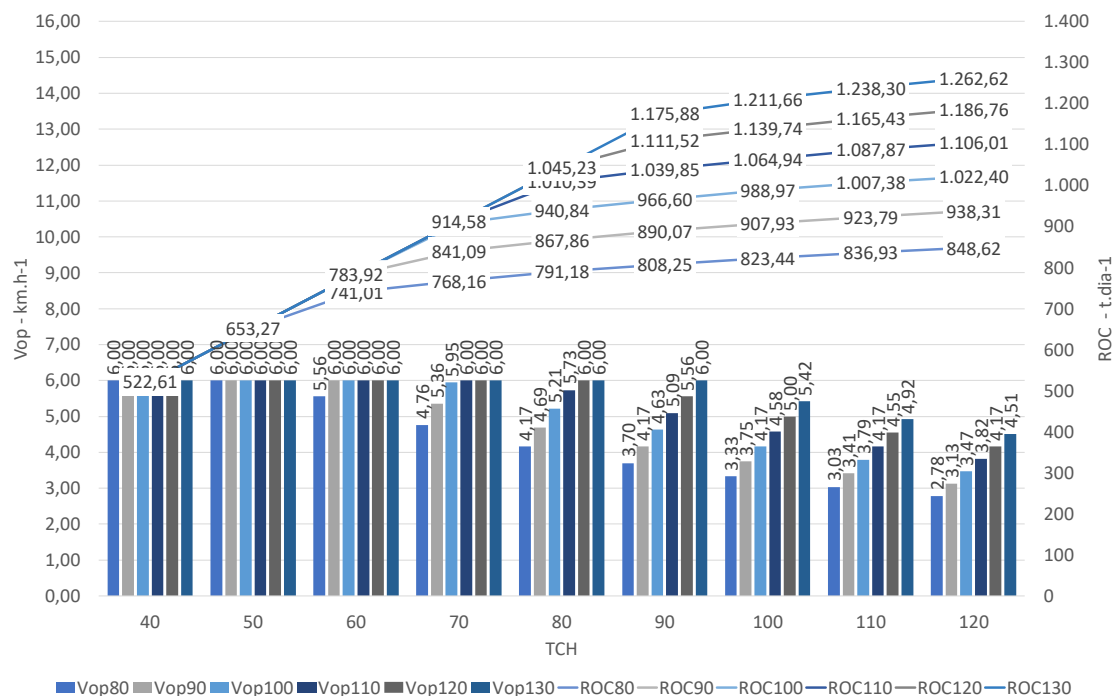
A busca de melhor desempenho operacional de colhedoras trouxe uma alternativa de espaçamento que atualmente é praticada por algumas unidades de bioenergia, trata-se do espaçamento denominado duplo alternado (0,90m x 1,40m) - Figura 93-, onde são colhidas simultaneamente duas linhas de cana.

Figura 93 - Representação esquemática de colheita mecanizada de cana-de-açúcar em espaçamento duplo alternado.



A Figura 94, permite analisar qual o impacto da mudança de espaçamento.

Figura 94 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em velocidade operacional (Vop) e capacidade operacional corrigida da colhedora (ROC) em espaçamento de 0,90 m x 1,40 m

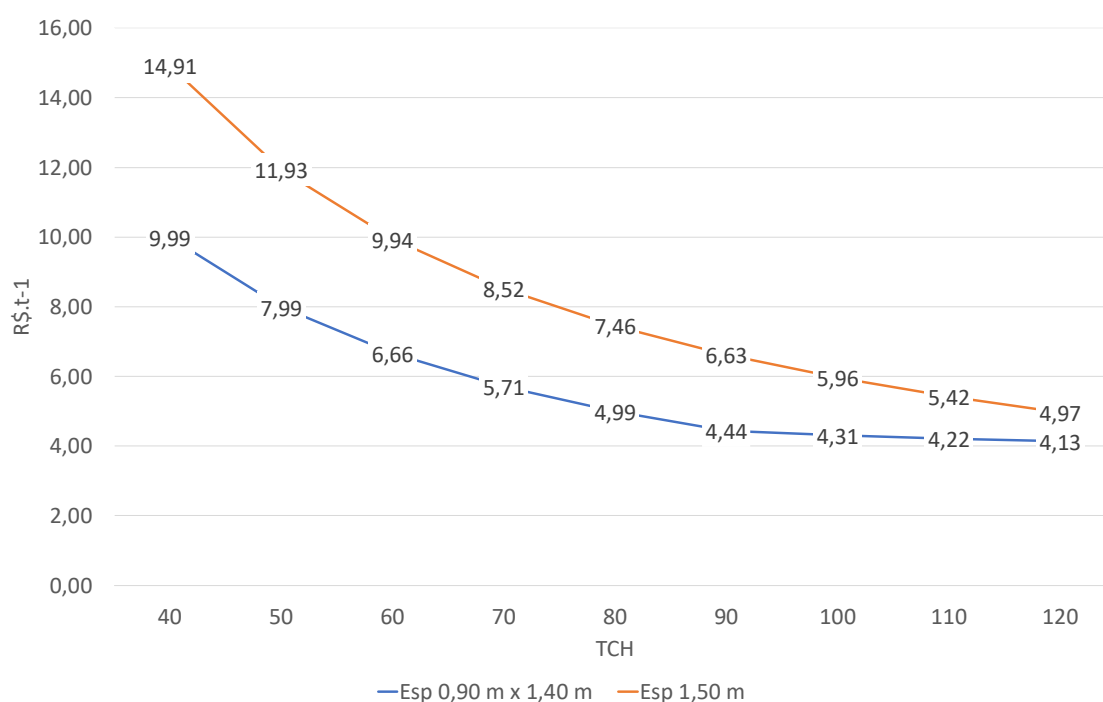


Ao se comparar a Figura 94 com a Figura 92, considerando-se RN de 130 Mg h⁻¹, tem-se:

- ➔ ROC superior a 60% quando comprado ao espaçamento de 1,50 m para TCH até 90 Mg ha⁻¹;

- ➔ A partir de 100 até atingir 120 Mg ha⁻¹; para cada variação em 10 Mg ha⁻¹, observa-se valores de ROC de 48,4%, 37,9% e 28,9%, respectivamente. O efeito em custos na operação de corte quando compara-se os dois espaçamentos é ilustrado na
- ➔ Figura 95, onde observa-se que quanto menor o TCH, maior a diferença entre os custos. Este resultado é função da velocidade máxima -Vmax- admitida em 6,0 km h⁻¹, e da maior quantidade de manobras no espaçamento de 1,50 m, que reduz a quantidade de horas produtivas - HPC;

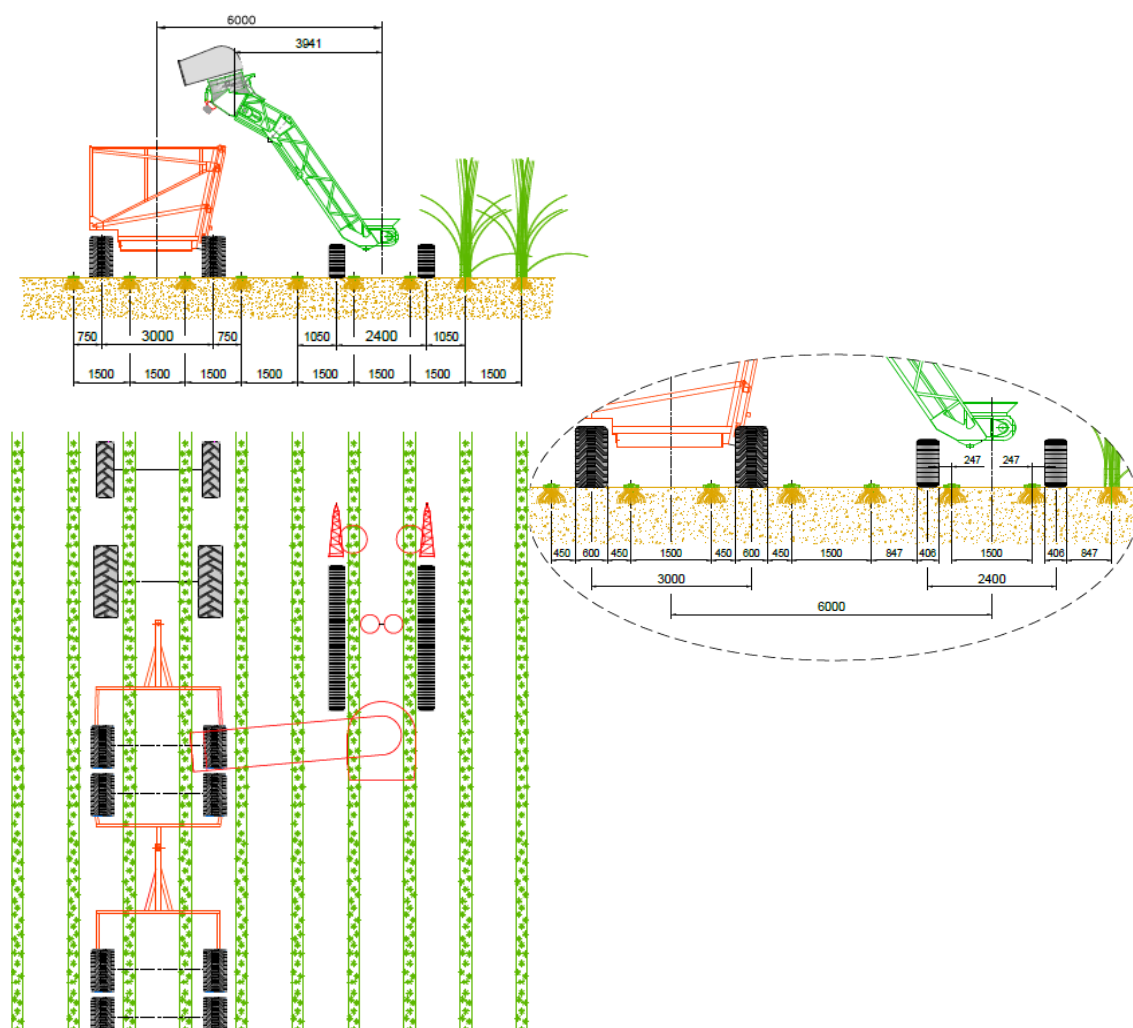
Figura 95 – Comparativo de custo na operação de corte mecanizado de cana-de-açúcar entre espaçamento de 1,50 m e 0,90 m x 1,40 m



- ➔ Não é objetivo deste trabalho comparar vantagens e desvantagens do ponto de vista agrônomo resultante entre espaçamento de 1,50 m e 0,90 m x 1,40 m, logo questões como perdas pela colheita, impactos de estresse hídrico e ambientes de produção desfavoráveis, não estão sendo considerados.

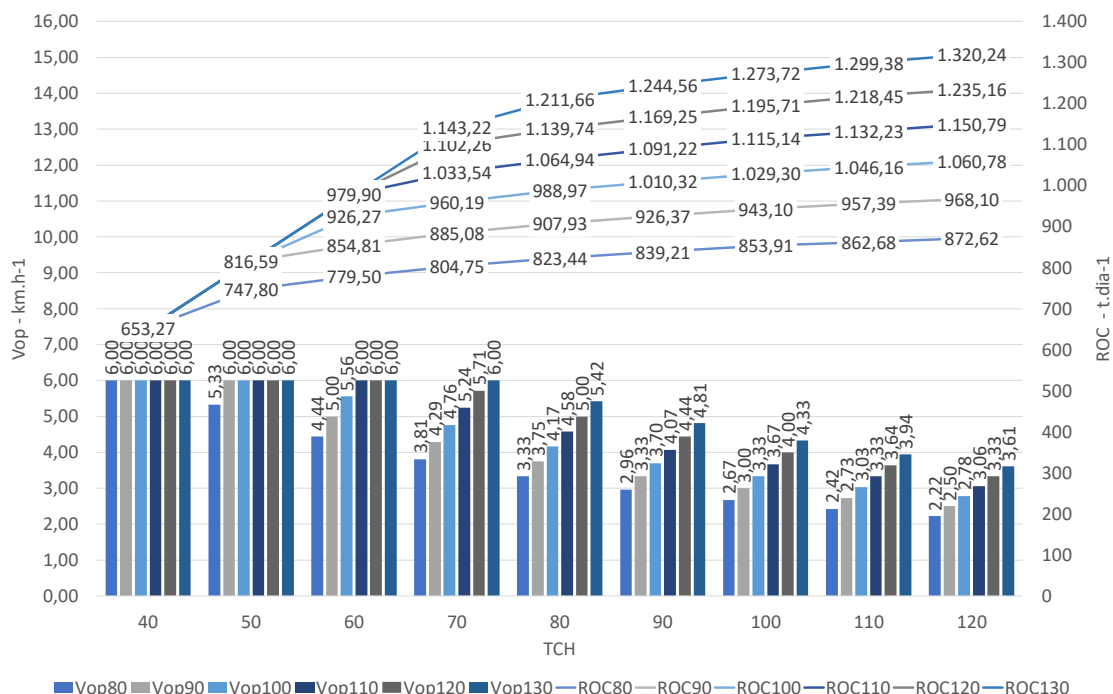
O STC está ligado de maneira intrínseca a utilização de dispositivos de direção assistida – capítulo 3.5.1-, que torna possível a colheita de 2 linhas em espaçamento de 1,50 m -Figura 96. Esta possibilidade, já vem sendo testada no mercado por alguns fabricantes de equipamentos.

Figura 96- Representação esquemática de colheita mecanizada de cana-de-açúcar no espaçamento duplo alternado



De maneira similar as análises apresentadas para a colheita de uma linha em espaçamento de 1,50 m a Figura 97 apresenta os resultados obtidos para colheita de duas linhas simultâneas.

Figura 97 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em velocidade operacional (Vop) e capacidade operacional corrigida da colhedora (ROC) em colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50m



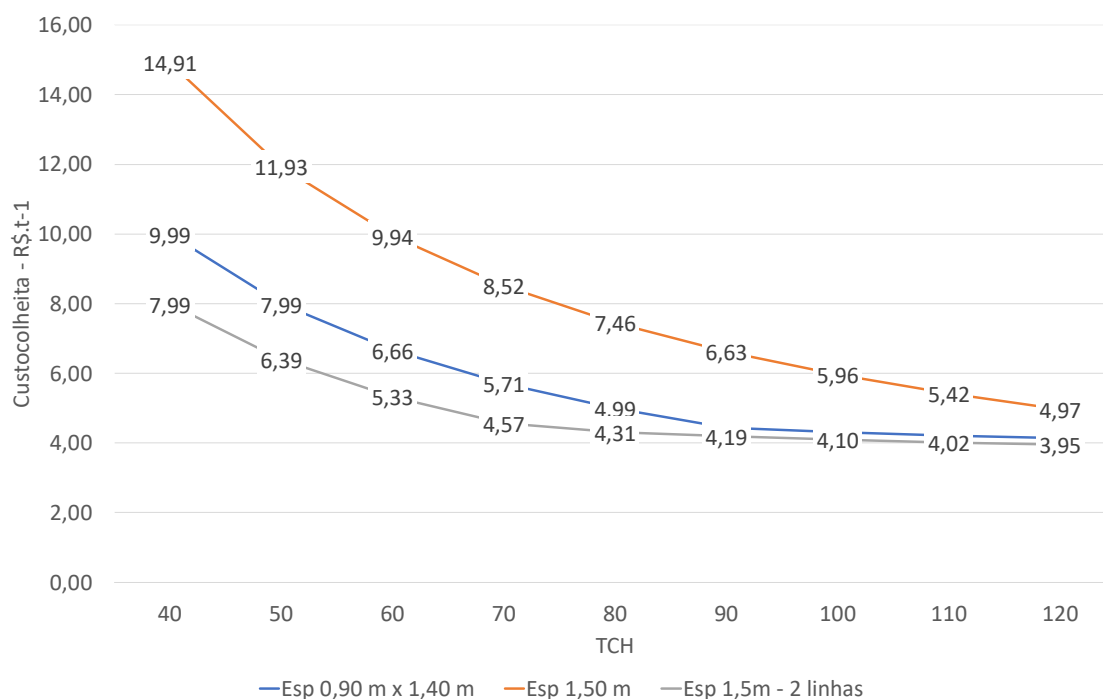
O comparativo entre a Figura 94 e Figura 97 permite concluir que em áreas de mesma produtividade -TCH- a colhedora de duas linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m tem melhor desempenho. Este resultado é explicado por dois aspectos:

- ➔ Largura de trabalho das colhedoras: onde a colhedora para duplo alternado tem 2,40 m e a colhedora de duas linhas em espaçamento de 1,50 tem largura de trabalho de 3,0 m;
- ➔ Quantidade de manobras de fim de linha: o espaçamento duplo alternado terá 4.166,67 metros lineares as serem colhidos por hectare, enquanto a colheita de duas linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m terá 3.333,33 metros lineares. Esta diferença resulta em menor quantidade de manobras, maior número de HPC - Equação 94.

Em termos de ROC, observa-se desempenho 25% superior para colhedoras de duas linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m para TCH de até 70 Mg ha⁻¹; 15,9% para TCH de 80 Mg ha⁻¹; 5,8% para TCH de 90 Mg ha⁻¹; para produtividades superiores a desempenho operacional apresentada permaneceu ao redor de 5%, limitado pelo RN de 130 Mg h⁻¹. O mesmo comportamento é observado para os custos – Figura 98. Tanto para o equipamento que opera no espaçamento duplo alternado quanto na colheita

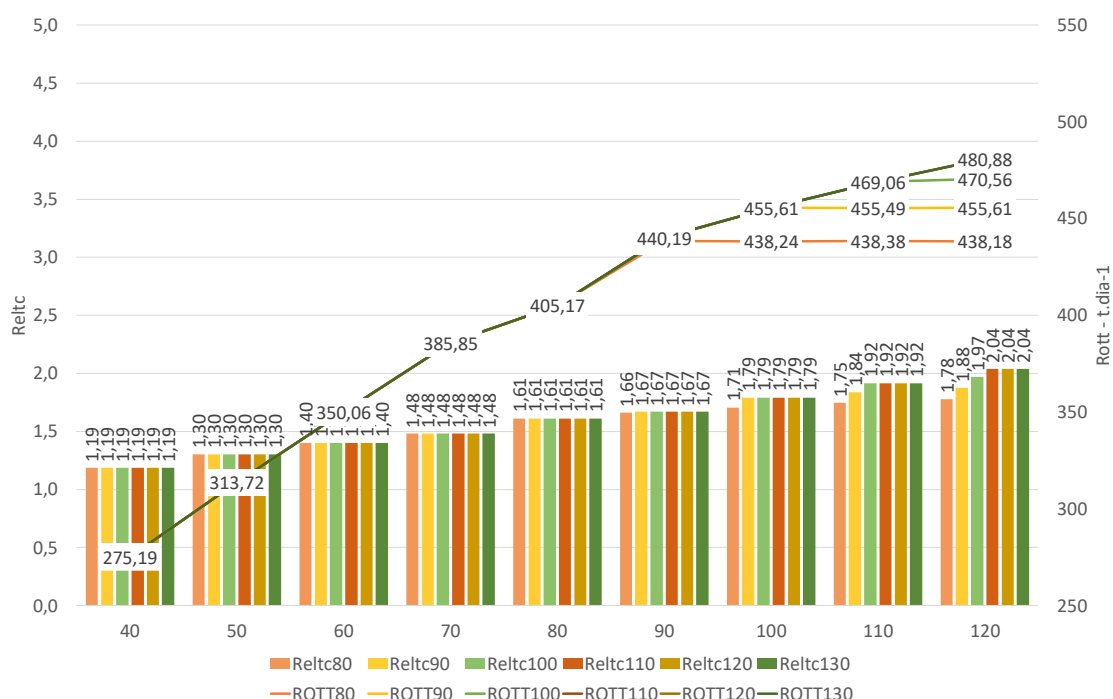
simultânea de 2 linhas em espaçamento de 1,50 m foi acrescido ao valor de aquisição do equipamento 150 mil reais.

Figura 98 - Comparativo de custo na operação de corte mecanizado de cana-de-açúcar entre espaçamento de 1,50 m , 0,90 m x 1,40 m e colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m



De maneira análoga às análises realizadas para a operação de corte mecanizado de cana-de-açúcar, podem ser realizadas as análises para a operação de carregamento (tração). A Figura 99, ilustra o impacto de TCH na desempenho da operação de carregamento expresso por ROTT - Equação 89.

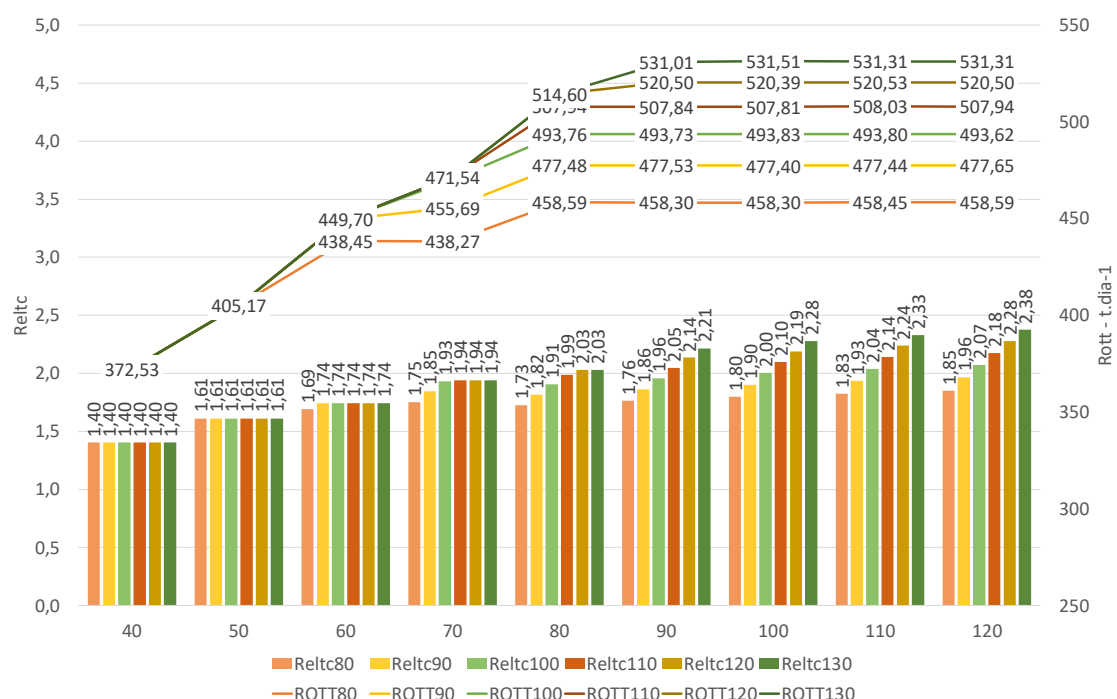
Figura 99 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em relação transbordo / colhedora (Reltc) e capacidade operacional transbordo (ROTT) em espaçamento de 1,50m



Há ainda incremento na relação quantidades de tratores necessários por colhedora - Reltc - dado aumento de TCH, fato gerado dada a menor quantidade de tempo necessário para completar a carga do implemento transbordo - Equação 79. A redução em TCTT não é suficiente para a diluição do TTCT - Equação 80 - , logo haverá aumento na necessidade de equipamentos transbordo para suprir a demanda da colhedora.

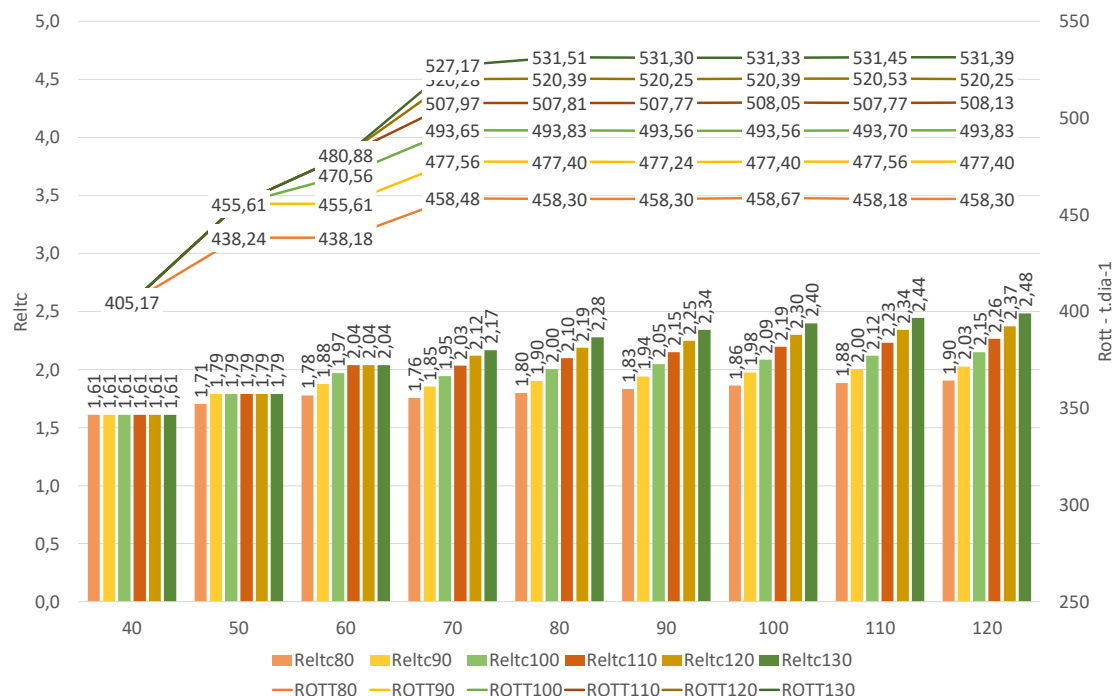
Considerando a colheita em espaçamento duplo alternado -Figura 100 - fica melhor evidenciada a análise realizada para a operação de carregamento realizada por meio da Figura 99, ou seja, a medida que a colhedora passa a operar em condições de atendimento do RCC, haverá maior necessidade de transbordos pois os mesmos estarão limitados ao TTCT.

Figura 100 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em relação transbordo / colhedora (Reltc) e capacidade operacional transbordo (ROTT) em espaçamento de 0,90 m x 1,40 m



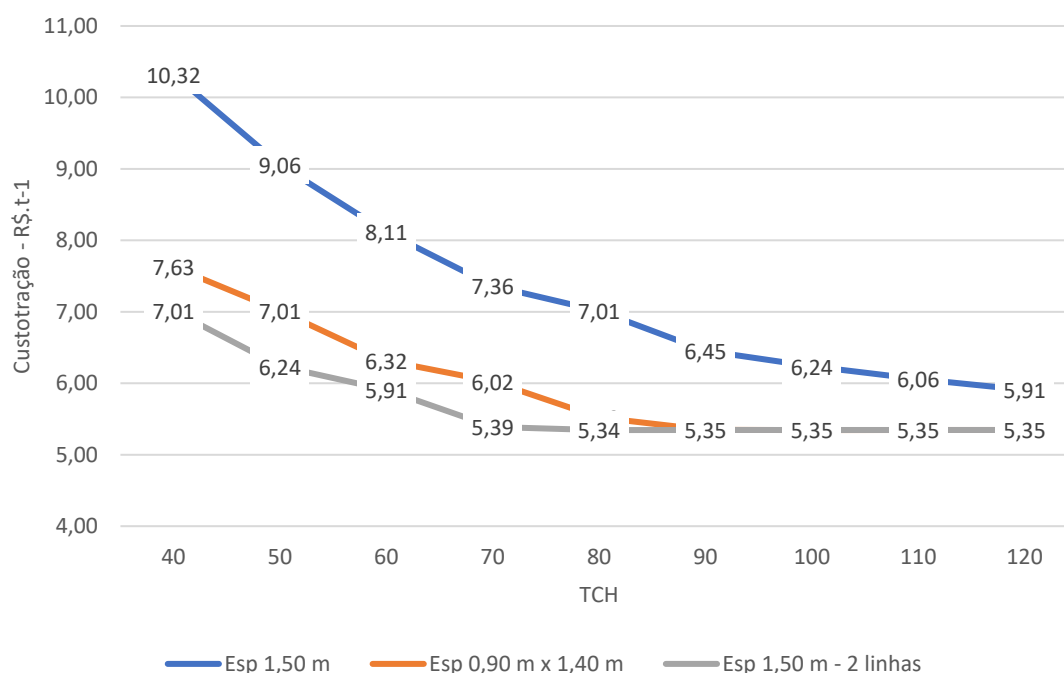
Desta forma, conforme demonstrado na Figura 101, haverá pouca variação de desempenho de equipamento transbordo entre a operação realizada em espaçamento duplo alternado e onde há colheita simultânea de duas linhas em espaçamento de 1,50 m.

Figura 101 - Variação de capacidade nominal (RN) e TCH e seus impactos em relação transbordo / colhedora (Reltc) e capacidade operacional transbordo (ROTT) em colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m



O comportamento de custos da operação de carregamento de cana-de-açúcar, tomando-se como base RN de 130 Mg h⁻¹, é apresentado na Figura 102. Há diferenças significativas para produtividades baixas, como por exemplo ao comparar-se 1 e 2 linhas de colheita simultânea em espaçamento de 1,50 m em TCH de 40 Mg ha⁻¹, onde observa-se redução de 3,31 R\$ t⁻¹ (32,1%). Refletindo a desempenho operacional dos transbordos, as diferenças de custos diminuem a medida que o TCH aumenta. Em colheita de espaçamento duplo alternado ou duas linhas simultâneas de 1,50 m, verifica-se que a partir de 90 Mg ha⁻¹, os custo são equivalentes.

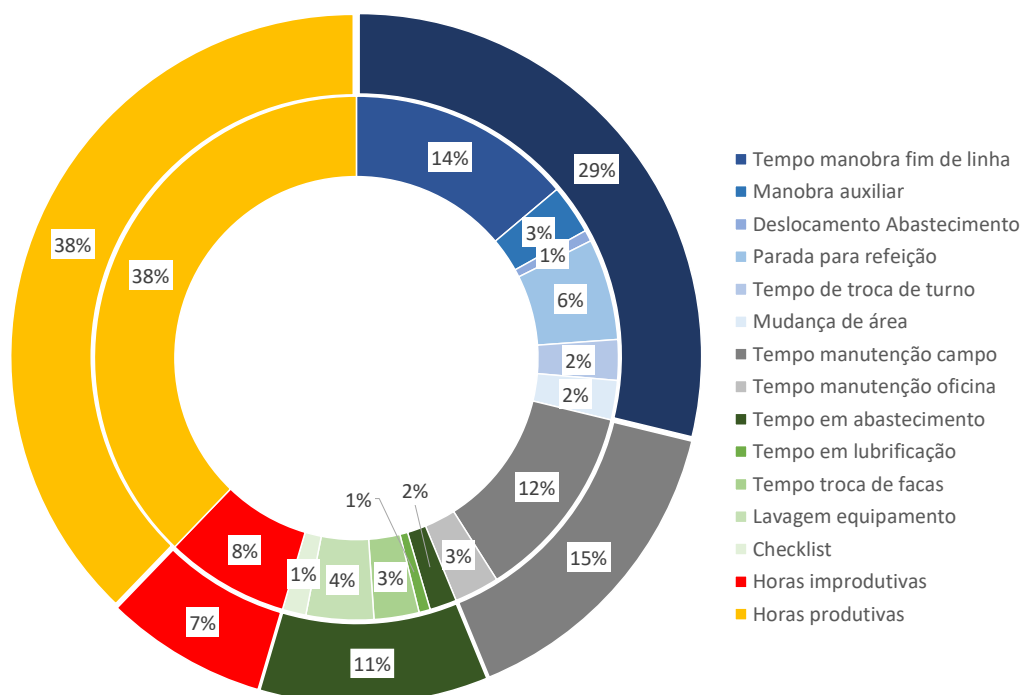
Figura 102 - Comparativo de custo na operação de carregamento de cana-de-açúcar entre espaçamento de 1,50 m , 0,90 m x 1,40 m e colheita de 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m



Banchi et al (2019) apontam em trabalho conduzido para colhedora de uma linha em espaçamento de 1,50 m, tendo como variáveis a produtividade agrícola e a vida operacional da colhedora valores de 26,43 a 7,23 R\$ t⁻¹, indicando que o custo da colheita decresce de forma não linear em função do aumento da produtividade, conforme observado na Figura 12. Importante notar que parâmetros operacionais como por exemplo tempo de manobra de fim de linha (TM) e comprimento de tiro (CT) tem impacto significativo no capacidade operacional e consequentemente em custos, pontos que serão abordados a seguir.

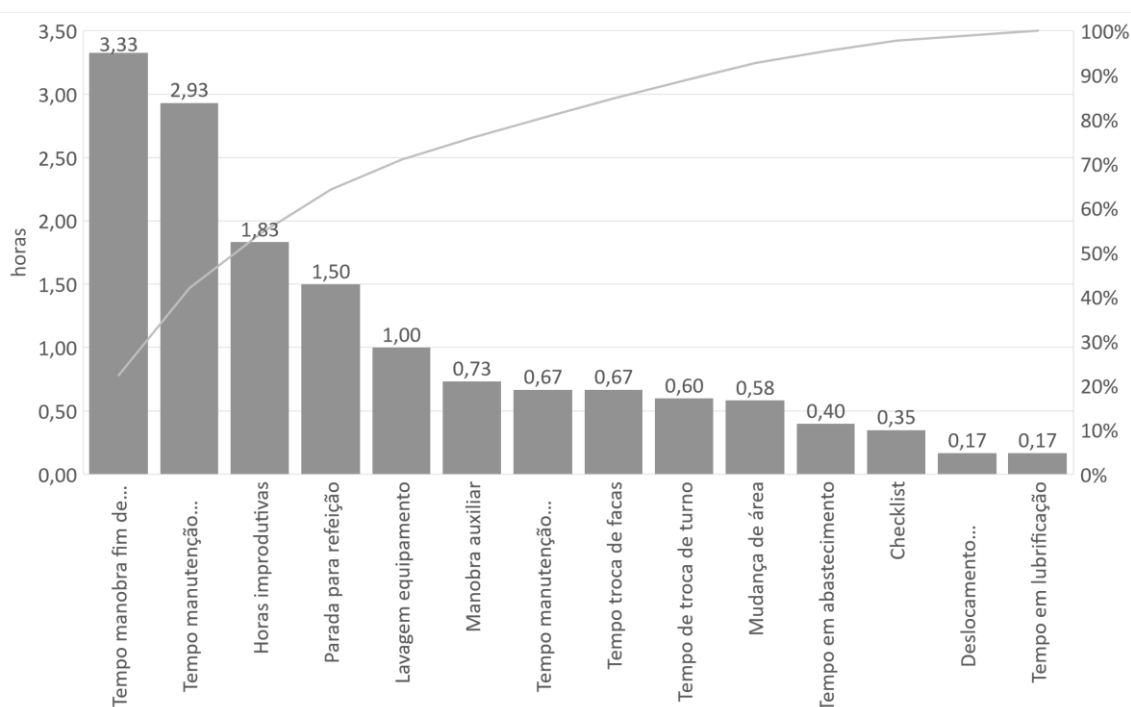
Apropriando-se da afirmação de Bérghamo (2020) que o monitoramento de ativos visa o aumento de eficiência operacional por meio do entendimento dos tempos em que os equipamentos não estão realizando a operação em si, no caso de colhedora os tempos onde não está sendo utilizada para o corte efetivo de cana-de-açúcar, o modelo da operação de colheita permite a análise destes tempos como pode ser observado na Figura 103.

Figura 103 – Distribuição percentual de tempos em 24 horas em operação de colheita mecanizada em espaçamento de 1,50 m



A parte externa do gráfico corresponde ao agrupamento de horas produtivas, tempos em logística, manutenção e suprimentos operacionais. Neste cenário as horas produtivas, onde o corte de cana efetivamente está sendo realizado, são 9,07 h dia⁻¹ (37,8%) colhendo cana efetivamente.

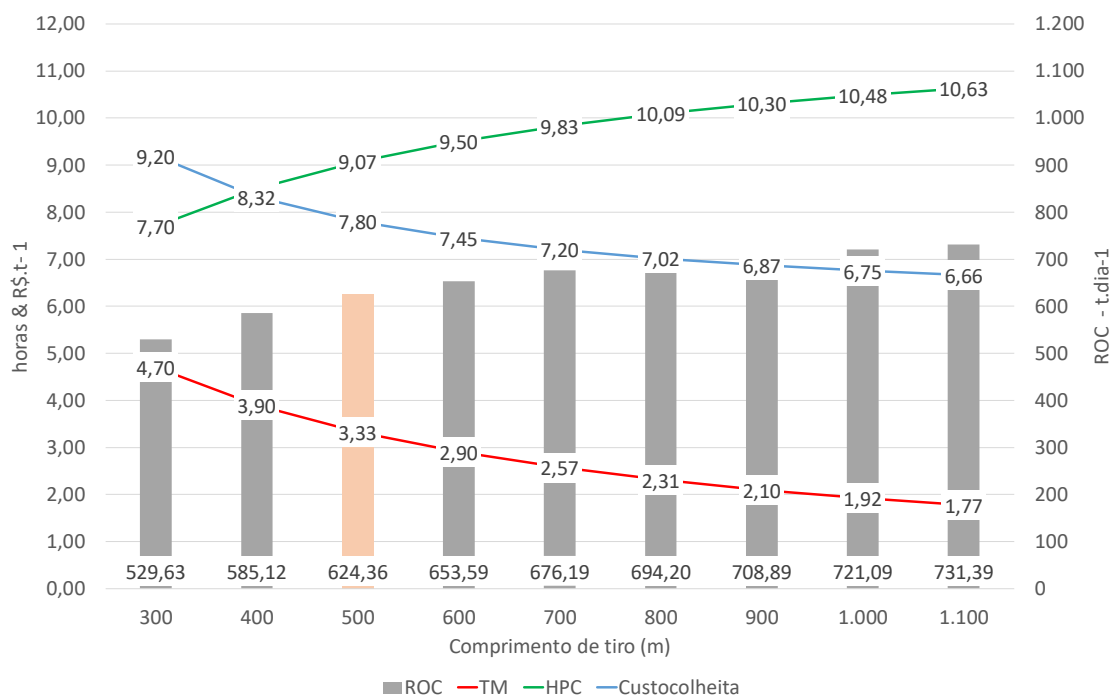
A utilização de diagrama de Pareto - Figura 104-, permite a identificação dos principais ofensores para a desempenho da colheita.

Figura 104- Diagrama de Pareto para ofensores de colheita mecanizada

No cenário apresentado pela Figura 104 é possível afirmar que:

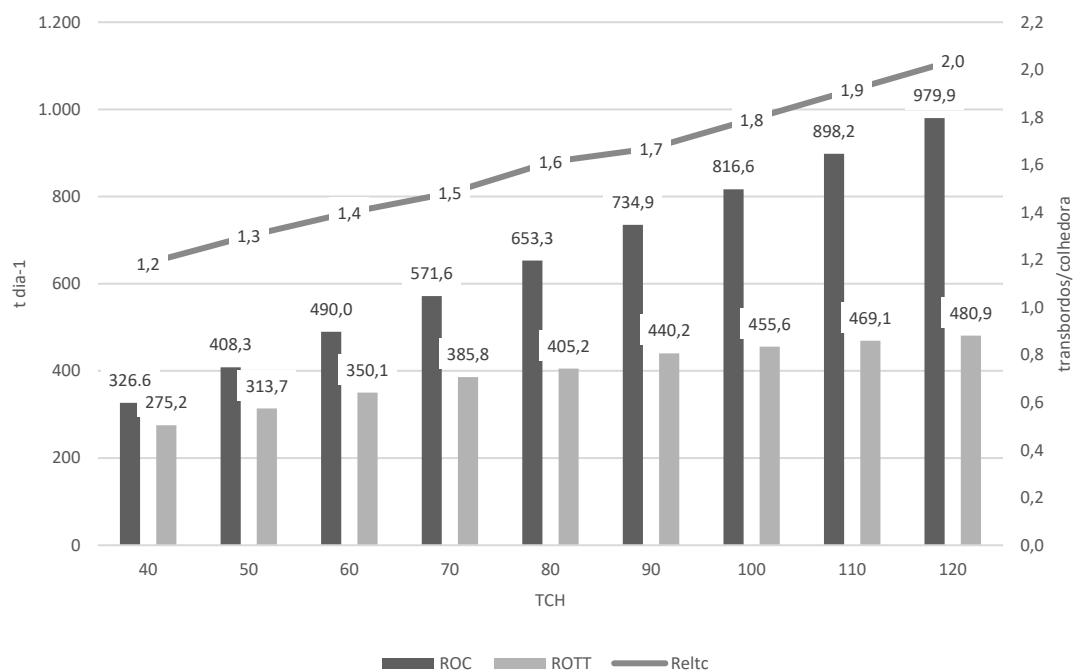
- ➔ Os tempos que envolvem manutenção em campo e manutenção na oficina automotiva anexa a unidade de bioenergia, representam 24,1% no diagrama de Pareto. A primeira ação a ser tomada será o comparativo com indicadores de mercado -benchmark- para entender se há oportunidades em melhorias nos processos de manutenção;
- ➔ Tempo de manobra em fim de linha, corresponde a 22,3% dos tempos em que a colhedora não está efetuando a colheita. Como proposta de melhoria pode-se buscar capacitação dos operadores no sincronismo de operação com o objetivo de reduzir o tempo para a realização de cada manobra. Seguindo a observação realizada por Bernardes e Belardo (2015), onde a operação de colheita mecanizada ocorre seguindo as fileiras e o seu caminhamento, a eficiência e a produtividade das máquinas, são proporcionais ao comprimento e a quantidade de cana por metro linear das fileiras. Logo, outra abordagem é a de redução do número de manobras por meio do planejamento adequado da base física. Mantendo-se o TM em 110 segundos e alterando-se a variável CT, chega-se a Figura 105, que ilustra significativos ganhos de desempenho, também calculado por Michelazzo (2018), e redução de custos em colheita, demonstrando que as etapas de conservação de solos, planejamento de base física, preparo de solos e colheita mecanizada devem estar integradas;

Figura 105 – Efeito do comprimento de percurso em desempenho operacional de colhedora de cana-de-açúcar em espaçamento de 1,50 m. ROC: capacidade operacional colhedora; TM: manobra de fim de linha; HPC: horas produtivas colhedora e Custocolheita: custo da colheita mecanizada R\$ t⁻¹



- ➔ Horas improdutivas, correspondem 12,3% . Estas horas são associadas a falhas de gestão e planejamento adequado. A gestão das informações obtidas em tempo real por meio dos computadores de bordo é importante aliado para reduzir as horas improdutivas. O modelo integrado das operações de corte e carregamento permite o dimensionamento de equipamentos de transbordo atendendo os parâmetros operacionais, IC e TCH - Figura 106. Como o resultado da relação nº de transbordo/nº de colhedoras é fracionado, destaca-se a necessidade de dimensionar a frente em termos de quantidade de colhedoras e a partir de Reltc definir a quantidade de transbordos em número inteiro para a frente;

Figura 106 – Dimensionamento de transbordos em função do TCH, capacidade operacional colhedora (ROC) e capacidade operacional transbordo (ROTT) para espaçamento de 1,50 m

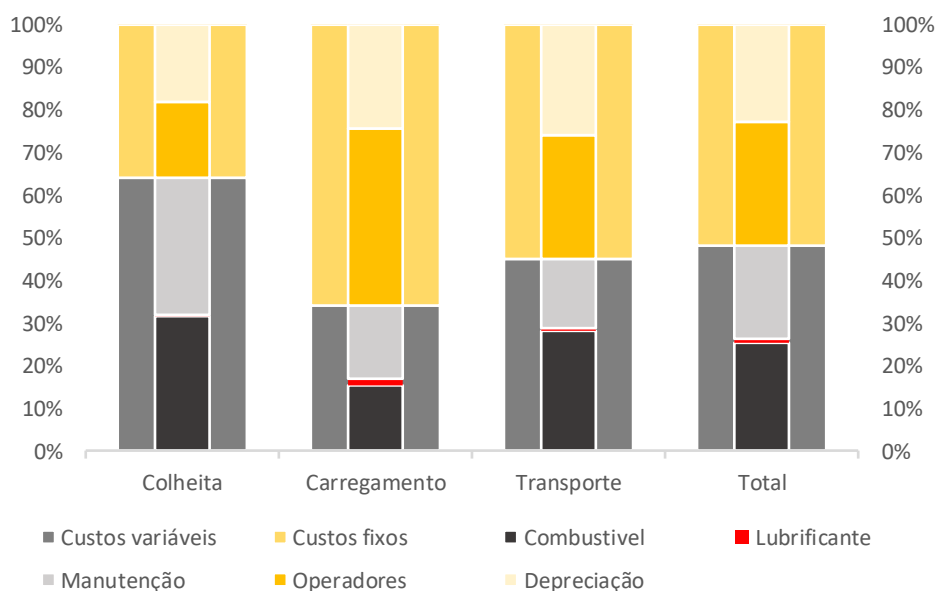


- ➔ As paradas para refeição que correspondes a 10% no diagrama de Pareto, estão vinculadas as leis trabalhistas e há poucas ações que podem ser tomadas neste sentido, devendo-se sempre analisar a legislação para a análise de viabilidade de converter parte destas horas em horas extras;
- ➔ O tempo utilizado em lavagem de equipamento representa 6,7% no diagrama de Pareto. Esta atividade é realizada com o intuito de reduzir riscos de incêndio na colhedora e auxilia na identificação de eventuais vazamentos e danos estruturais, possibilitando correções preventivas;
- ➔ As manobras auxiliares, que neste cenário representam 4,9% no diagrama de Pareto, estão relacionadas à necessidade da colhedora desviar de árvores, erosões e outros obstáculos presentes no talhão. Quanto a árvores, sua remoção está ligada à legislação ambiental, já erosões serão atacadas no momento de reforma do talhão, porém a prevenção de erosões passa necessariamente pelas etapas de planejamento de base física.

O sistema de colheita mecanizada é importante componente de custos na agroindústria canavieira, correspondendo a cerca de 40% do custo da matéria-prima (DIAS NETO, 2015), justificando assim a análise detalhada da composição dos custos -

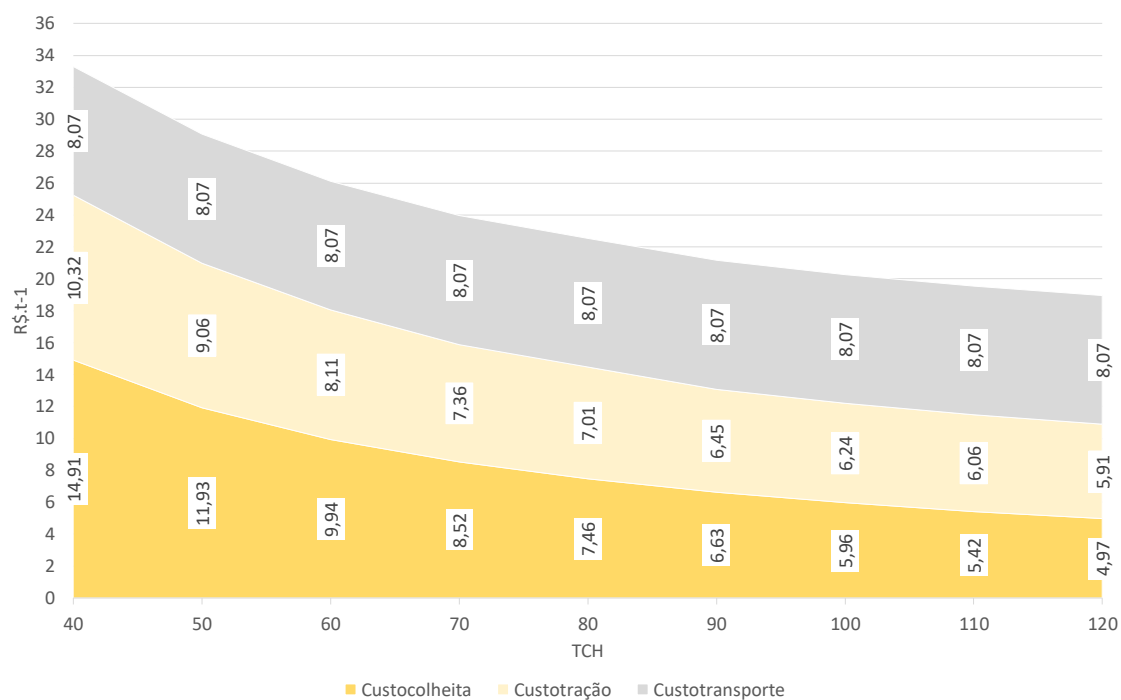
Figura 107. No cenário abordado custos fixos representam 50% do custo total, indicando que o dimensionamento correto de equipamentos, dado a seu elevado custo de aquisição, e colaboradores é fundamental para o controle de custos.

Figura 107 – Distribuição percentual de custos nas operações de sistema de colheita mecanizada



Considerando que a proposta deste trabalho é a avaliação do STC, e que este sistema apresenta como um de seus benefícios o ganho de produtividade agrícola, a Figura 108 permite a análise de como a variação de TCH impacta no componente custo.

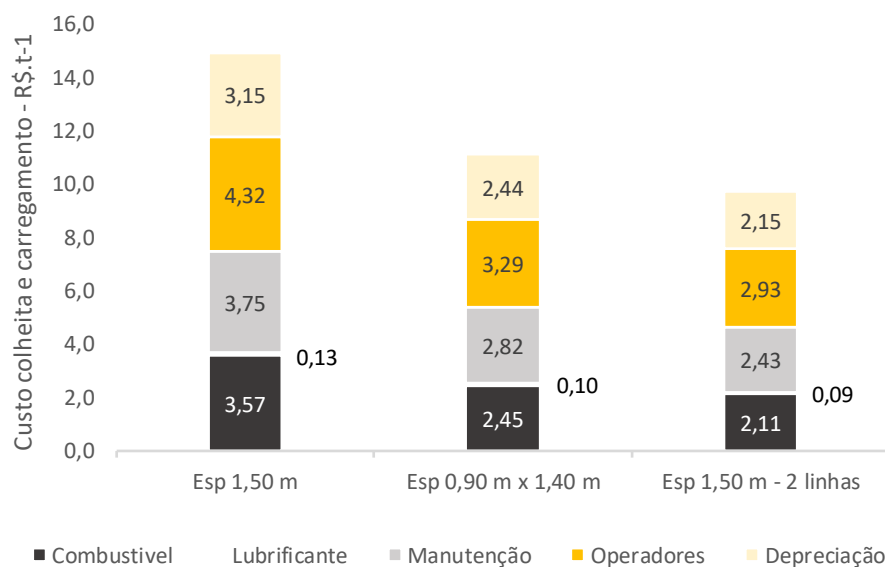
Figura 108 – Custo do CCT em função do TCH em espaçamento de 1,50 m



A operação mais afetada pelo aumento de TCH é a colheita. No cenário em análise, verifica-se variação de 9,94 R\$ t⁻¹ (66,7%) na operação de corte mecanizado. Observa-se também que a medida que o TCH fica próximo ao RN adotado na análise, os custos tendem a se estabilizar. O custo do carregamento (tração), apresenta variação de 4,41 R\$ t⁻¹ (42,8%), sendo que o impacto menor quando comparado a colheita pode ser justificado com o tempo de ciclo que a operação está sujeita -TCTT. Não houve variação nos custos de transporte pois o raio e demais condições operacionais para esta operação foram mantidas para esta operação não foram alteradas.

A integração dos processos agrícolas, partindo de adequado planejamento de base física associado ao preparo localizado e sistema de colheita mecanizada com dispositivos de direção assistida, torna possível a implantação do STC. Este ambiente favorece a adoção de colheita mecanizada ser efetuada simultaneamente em mais de uma linha sem causar danos a soqueira por pisoteio de máquinas, principalmente em espaçamento de 1,50 m. Neste conceito, a análise de composição de custos para o cenário apresentado na Tabela 24 à Tabela 30, para as operações de corte e carregamento, conforme ilustrado na Figura 109, apresenta redução em diesel entre 0,39 a 0,50 l t⁻¹, indicando que além do impacto em custo há efeito positivo em redução de emissões GEE. De acordo com a CONAB (2020) a produção de cana-de-açúcar para a safra 2020/21 será de próximo de 642 milhões de toneladas produtividade média de 76,3 Mg ha⁻¹ e 91,6% desta produção será colhida mecanicamente logo, respeitando particularidades operacionais de colheita de cada unidade de bioenergia, o cenário avaliado demonstra que há potencial de redução de consumo de diesel que pode estar próximo a 280 mil m³ por ano.

Figura 109 – Participação de custos nas operações de corte e carregamento de cana-de-açúcar em função do espaçamento



Considerando o exposto por Silva et al. (2011) no capítulo 3.8, onde a alimentação constante da planta industrial durante o período de safra depende do bom gerenciamento das operações de corte, carregamento e transporte, o planejamento da utilização dos recursos utilizados requer decisões que não se limitam apenas à sua quantificação, mas também aspectos ligados ao gerenciamento de localização das frentes de colheita e aspectos de manejo.

Para a análise das condições apresentadas pela lavoura, criou-se 5 frentes de colheita hipotéticas - F01, F02, F03, F04 e F05 - apresentado o mesmo TCH e necessidade de entrega de conforme variável M_{hora} na Tabela 24. As 5 situações operacionais podem ser observadas na Tabela 67,

Tabela 67 – Índices de colheitabilidade para avaliação de características operacionais de lavoura

	F01		F02		F03		F04		F05	
missas operacionais										
TCH	76,46	●	76,46	●	76,46	●	76,46	●	76,46	●
Comprimento de tiro (m)	1.200	●	300	●	500	●	500	●	500	●
Declividade (%)	5%	●	11%	●	5%	●	5%	●	5%	●
Ocorrência de pedra e tocos	sem ocorrência	●	alta ocorrência	●	sem ocorrência	●	sem ocorrência	●	sem ocorrência	●
Ocorrência de erosão	sem ocorrência	●	alguma ocorrência	●	sem ocorrência	●	sem ocorrência	●	alguma ocorrência	●
Ocorrência de ervas daninhas	alguma infestação	●	sem infestação	●	alta infestação	●	sem infestação	●	alta infestação	●
Nivelamento do terreno	Nivelado	●	Mediamente	●	Nivelado	●	Mediamente	●	Não nivelado	●
Tombamento	Ereto	●	Ereto	●	Ereto	●	Maioria dos colmos tombados	●	Alguns colmos tombados	●
Nota	9	●	15	●	10	●	11	●	14	●
IC	1	●	3	●	3	●	3	●	3	●

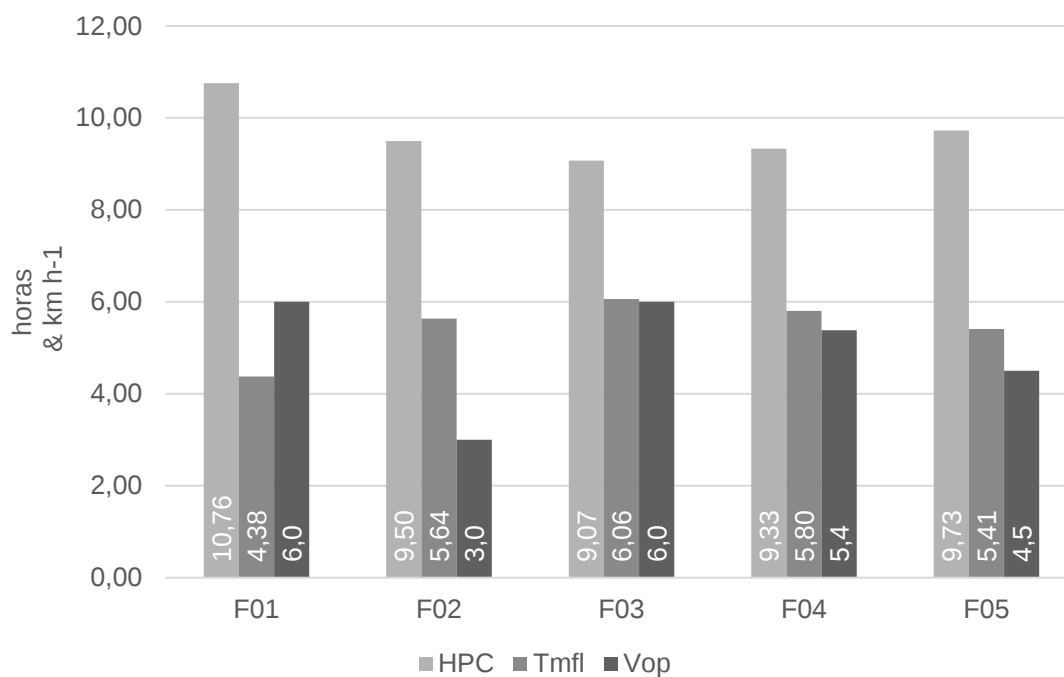
As principais características que pode-se observar são:

- ➔ F01: apresenta CT muito bom e alguma infestação por plantas daninhas;
- ➔ F02: a área apresenta atenção quanto à colheitabilidade. É comum a associação de CT, declividade e algumas vezes ocorrências de pedras, o que exigirá restrição de velocidade operacional em função de garantir níveis satisfatórios de segurança operacional.
- ➔ F03: apresenta alto índice de infestação de plantas daninhas, o que compromete a desempenho operacional da colhedora conforme pode ser observado na Figura 54;
- ➔ F04: o canavial apresenta-se tombado - Figura 55 – havendo a necessidade de realizar a operação em condições que minimizem as perdas na colheita em função da dificuldade de recolhimento e possibilidade dos discos de corte provocarem repicagem nos colmos;
- ➔ F05: apresenta alguma infestação de plantas daninhas e alguns colmos acamados. Esta situação pode ser presenciada se a planta invasora for *Ipomoea spp.*

Partindo das condições apresentadas na Tabela 67, tem-se que as horas motor colhedora equivalem a 15,13 h, há variação na Vop que resultará em maior ou menor quantidade de HPC para cada situação. A Figura 110 demonstra que:

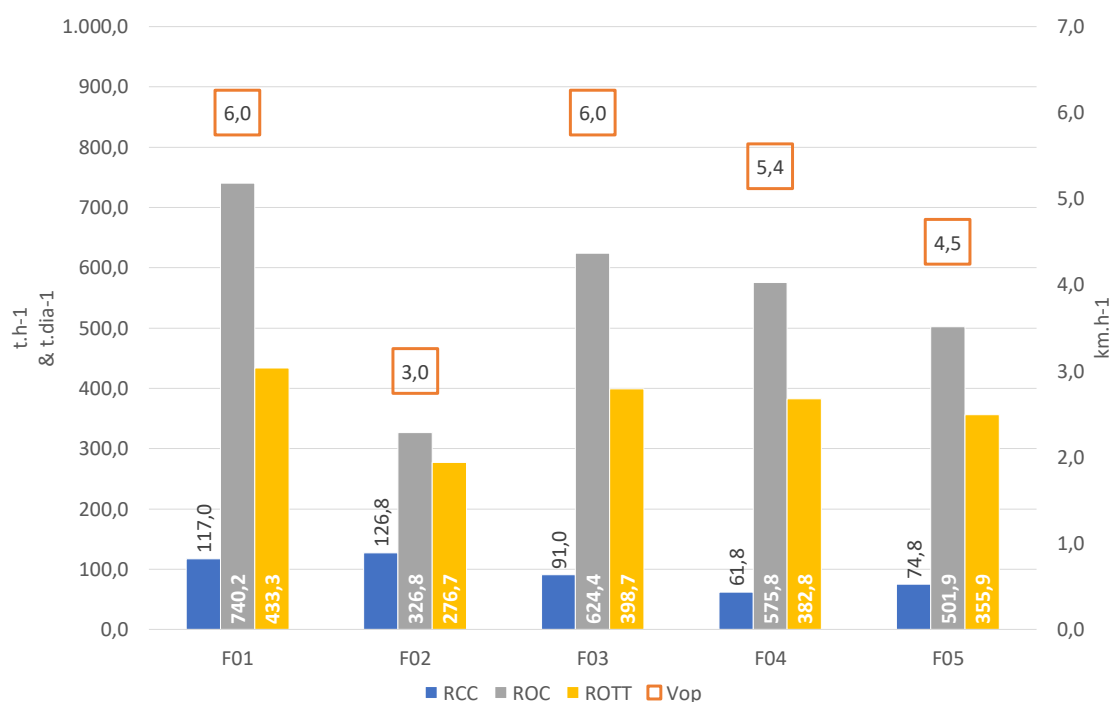
- ➔ F01, apresenta Vop no limite máximo estabelecido, 6,0 km h⁻¹, e 10,76 h efetivamente colhendo. Este resultado é função do CT considerado ser de 1.200 m.
- ➔ A relação entre HPC e HMC para F02, F03, F04 e F05 é de 62,8%, 60,0%, 61,7% e 64,3%, ou seja bem próximas entre si. Tomando como exemplo a F02, apesar de ter HPC de 9,5 h, tem a Vop em 3,0 km h⁻¹, devido as condições de colheitabilidade da área, demonstrando que o HPC é apenas reflexo da baixa Vop.

Figura 110 – Impacto de índice de colheitabilidade (IC) em horas produtivas colhedora (HPC), tempo manobra fim de linha (T_{mfl}) e velocidade operacional (Vop)



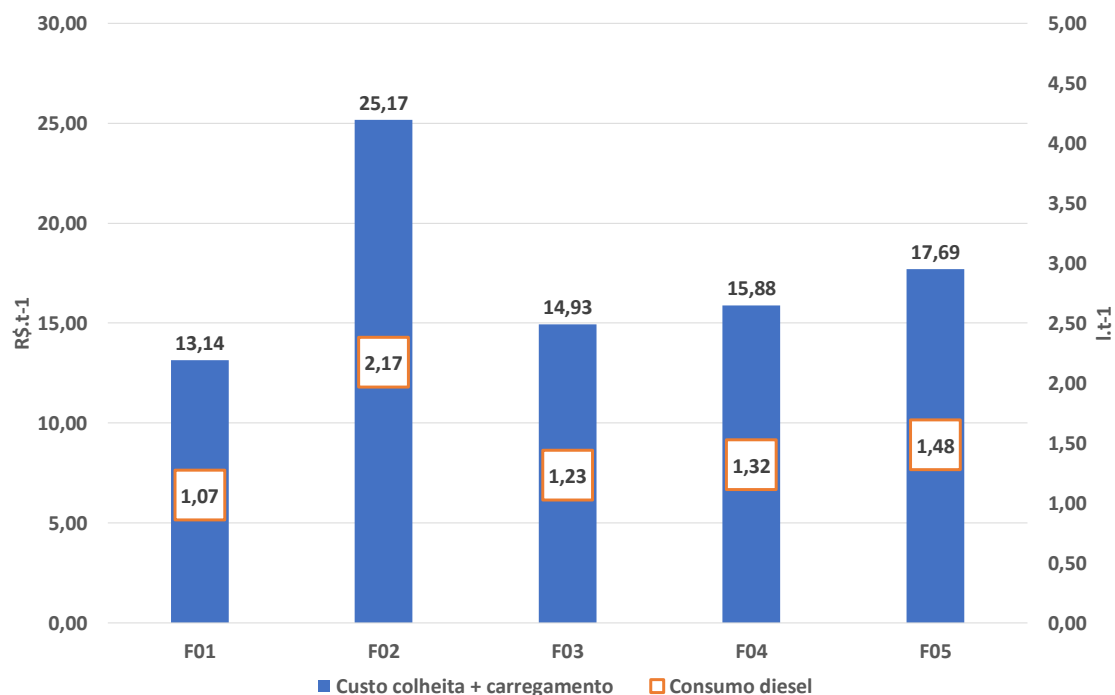
O impacto do IC pode ser melhor evidenciado na desempenho operacional da colhedora e do transbordo, conforme ilustra a Figura 111. Para a mesma TCH verifica-se rendimentos operacionais distintos, permitindo entender a capacidade de entrega de cada frente de colheita e como o planejamento de colheita deverá ser sequenciado para abastecer a planta industrial.

Figura 111 – Impacto do índice de colheitabilidade (IC) em capacidade operacional corrigida de colhedora (RCC), capacidade operacional de colhedora (ROC), capacidade operacional transbordo (ROTT) e velocidade operacional (Vop)



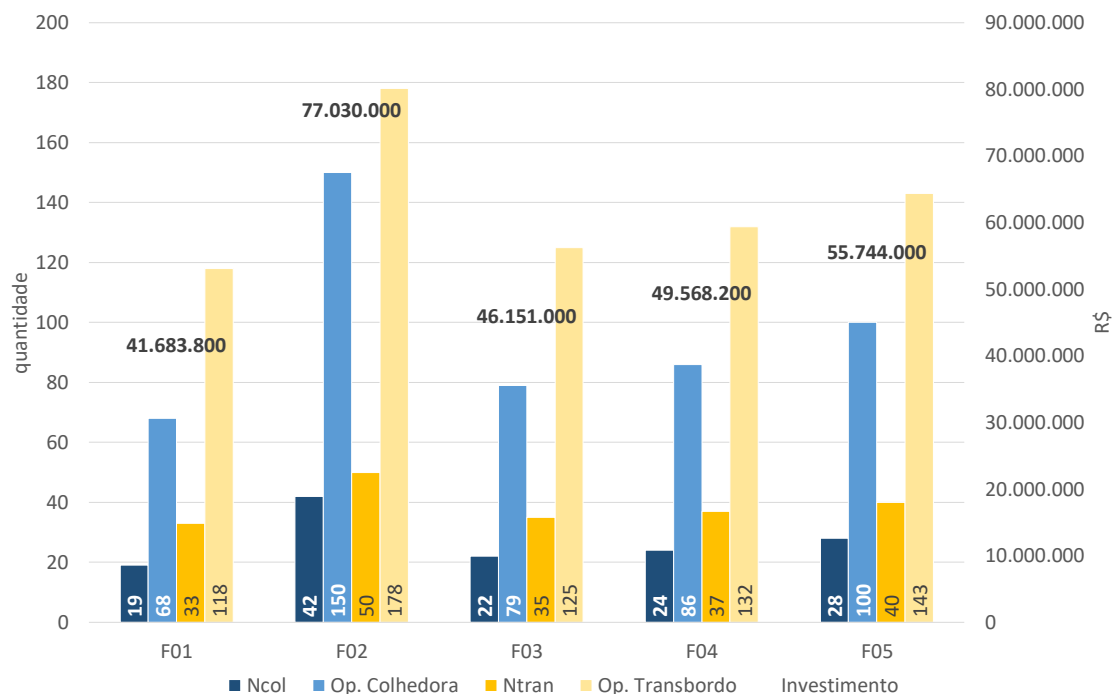
Em relação a custos das operações e consumo de diesel nas operações de colheita e carregamento, os mesmos seguem o capacidade operacional podendo apresentar grandes variações – 47,8% em custo e 50,8% em consumo de combustível - em função do IC conforme pode ser notado na Figura 112.

Figura 112 – Custos e consumo de diesel nas operações de corte e carregamento em função do índice de colheitabilidade (IC)



Supondo agora que ao invés de frentes de colheita, F01, F02, F03, F04 e F05 representem 5 diferentes unidades de bioenergia com M_{hora} definida na Tabela 24, ou seja, entrega diária de 13.560 toneladas de cana, tem-se na Figura 113 a necessidade de recursos humanos, equipamentos e financeiros envolvidos.

Figura 113 – Dimensionamento de colaboradores, colhedoras e transbordos e investimento. Ncol: necessidade de colhedoras; Op. Colhedora: operadores de colhedora; NTran: necessidade de transbordos; Op. Transbordo: operadores de transbordo



Logo a modelagem de sistema de colheita mecanizada por meio de simulações de parâmetros operacionais auxilia a tomada de decisão sobre onde instalar uma unidade de bioenergia e avaliar rentabilidade de áreas específicas para arrendamento.

5.3 Análise integrada de preparo de solo e colheita mecanizada e obtenção do custo por tonelada de cana-de-açúcar produzida

De acordo com Fernandes (2011) no setor sucroalcooleiro, os custos de produção de cana-de-açúcar são assuntos polêmicos devida a extensa lista de variáveis envolvidas.

Para a estimativa do custo da tonelada de cana-de-açúcar, conforme descrito no capítulo 4.4, utilizou-se como base a modelagem descrita no capítulo 4.1 e capítulo 4.3, bem como os resultados apresentados no capítulo 5.1.3 e no capítulo 5.2.2. O IC assumido é o da Tabela 31, alterando-se para cada estágio de corte o TCH. Para a operação de colheita considerou-se a colheita de uma linha em espaçamento de 1,50 m. As demais premissas utilizadas estão presentes na Tabela 33

O fluxo de caixa, bem como o valor presente líquido de cada etapa do processo e o custo estimado da tonelada de cana-de-açúcar, encontram-se na Tabela 68.

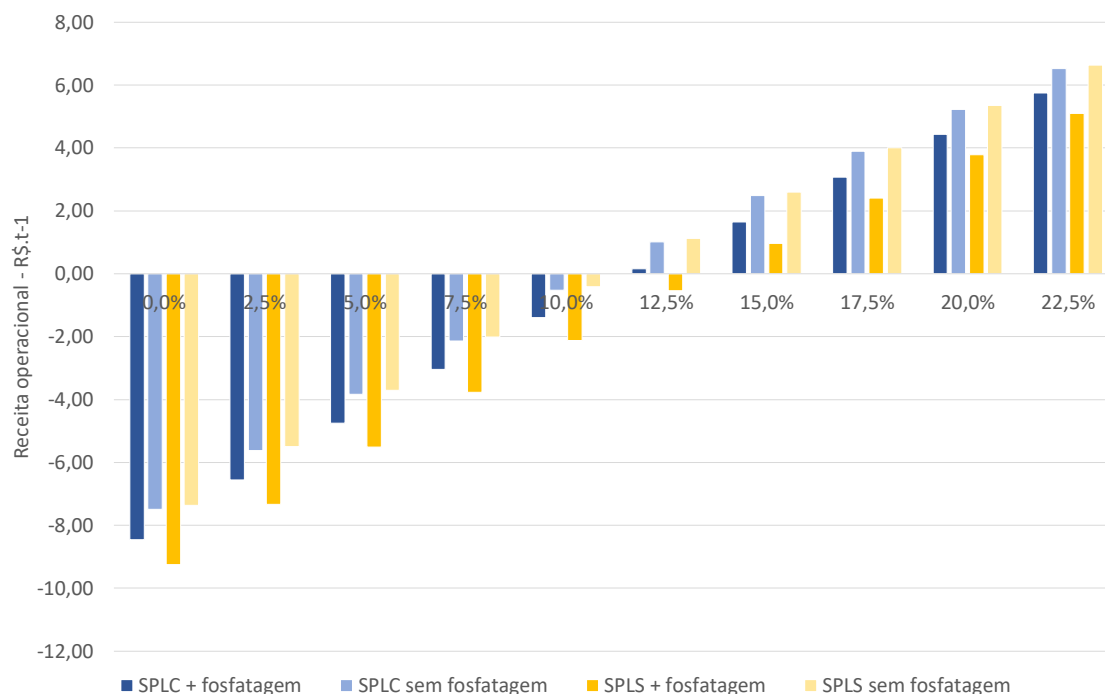
Tabela 68 – FC, VPL, custos e receitas da tonelada de cana-de-açúcar para SPC com fosfatagem

Evento	Data	TCH	Formaçã o	CCT	Tratos	Arrendament o	Adm. R\$ ha ⁻¹	Custo de produçã o
		t ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ t ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹
Plantio	15/04/2020	0,00	9.634,00	0,00	0,00	0,00	1.380,43	262,9
	0			20,6	1.975,8	2.229,8		0
1° Corte	24/07/2020	95,85	0,00	1	2	4	1.380,43	262,9
	1			21,1	1.903,6	2.229,8		0
2° Corte	24/07/2020	90,00	0,00	5	7	4	1.380,43	262,9
	2			22,7	1.786,4	2.229,8		0
3° Corte	24/07/2020	78,70	0,00	0	7	4	1.380,43	262,9
	3			24,3	1.644,0	2.229,8		0
4° Corte	24/07/2020	67,40	0,00	9	6	4	1.380,43	262,9
	4			26,0	1.575,4			0
5° Corte	24/07/2020	60,60	0,00	0	8	0,00	1.380,43	262,9
	5							0
VPL		308,3			6.914,0	7.142,2		262,9
		6	9.634,00		7	7	6.699,56	0
Custo (R\$ t⁻¹)			31,24		22,42	23,16		0,85
Receita bruta (R\$ t⁻¹)								99,41
Rec. operacional (R\$ t⁻¹)								88,60
								-10,81

Considerando o SPC, verifica-se que a área agrícola da unidade de bioenergia gera receita operacional negativa de 10,81 R\$ t⁻¹, já para o SPR a receita operacional é de -9,57 R\$ t⁻¹. Este cenário mostra a necessidade de buscar alternativas que busquem maior rentabilidade à cadeia agrícola. Como exposto pelo PECEGE (2020), é notória a atuação da elevação da produtividade como diluidora dos custos fixos agrícolas, dada a grande representatividade dos mesmos na composição do custo total, o aumento do TCH é fundamental na redução do custo médio da cana-de-açúcar, por meio de economias de escala.

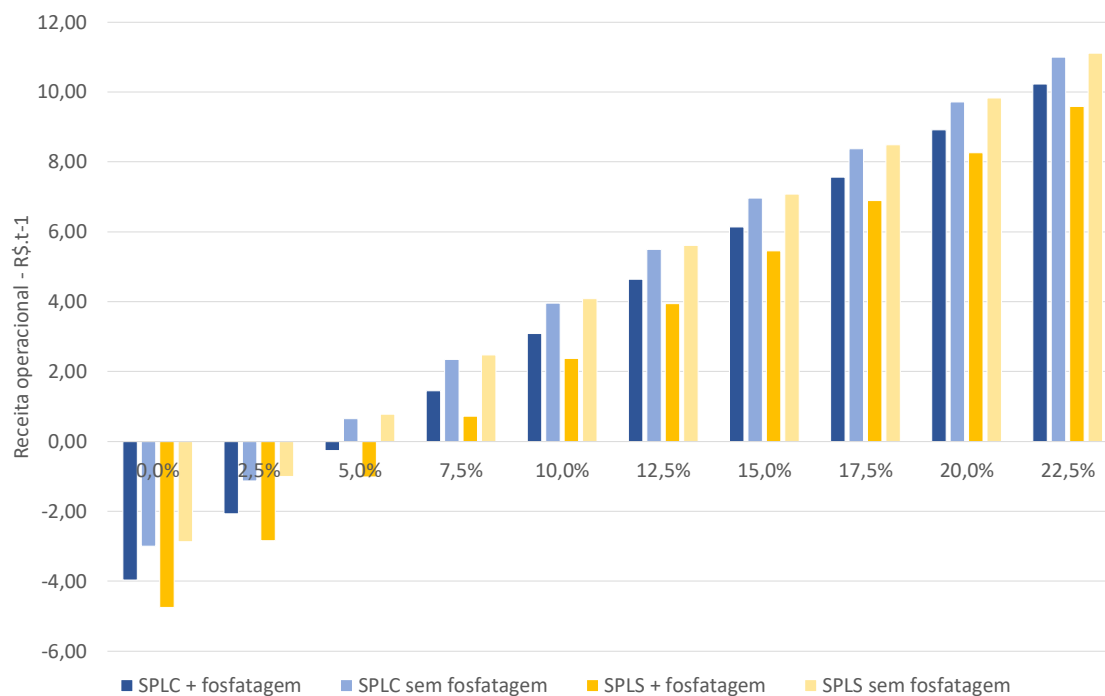
Voltando à observação realizada por Souza (2012), onde manejos com controle de tráfego proporcionaram compactação na linha do rodado e preservaram a qualidade física do solo na região da soqueira, resultando no maior desenvolvimento do sistema radicular, com aumento de 18% na produtividade, elaborou-se a Figura 114. Verifica-se que é necessário aumento de 12,5% em TCH para a área agrícola de unidade de bioenergia ter resultado operacional positivo. Em 17,5% de aumento de TCH a geração de receita apresenta variação de 2,40 R\$ t⁻¹, representando 5,9% de margem de lucro operacional para SPLS com fosfatagem e 4,00 R\$ t⁻¹, representando 6,0% de margem de lucro operacional para SPLS sem fosfatagem.

Figura 114 – Receita operacional para sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador (SPLC) e sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada (SPLS) com e sem fosfatagem para colheita de uma linha em espaçamento de 1,5 m



Ajustando-se o modelo para analisar o efeito da operação de colheita poder ser realizada em 2 linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m, a receita operacional para o SPC foi negativa em 6,31 R\$ t⁻¹, para SPR o valor encontrado foi de -5,08 R\$ t⁻¹. Para o manejo em STC, a Figura 115 indica que 7,50% de incremento em TCH possibilita gerar receita operacional positiva. Para 17,5% de incremento em TCH, a geração de receita apresenta variação de 6,89 R\$ t⁻¹ a 8,49 R\$ t⁻¹ para SPLS com fosfatagem e sem fosfatagem respectivamente, o que representa 9,5% de margem de lucro operacional.

Figura 115 - Receita operacional para sistema de preparo de solo localizado associado a canteirizador (SPLC) e sistema de preparo de solo localizado associado a subsolagem localizada (SPLS) com e sem fosfatagem para colheita simultânea de 2 linhas em espaçamento de 1,50m



6 Conclusões

O sistema de preparo localizado, associado a canterizador apresentou-se eficiente quanto à descompactação, quanto a densidade aparente a profundidades de 200, 400 e 600 mm observou-se nas áreas destinadas ao tráfego valores de 1,77; 1,67 e 1,56 g.cm^{-3} – e em áreas destinadas ao canteiro - 1,31; 1,31 e 1,56 g.cm^{-3} ; e a taxa e infiltração, a área destinada ao canteiro apresentou média de 278 mm h^{-1} e a área destinada ao tráfego média de 120 mm h^{-1} .

Em relação a geometria das áreas mobilizadas e não mobilizadas pela operação de canteirização, os resultados para largura de mobilização - 514 mm – e largura de área sem mobilização – 679 mm -, estão aderentes a proposta do STC. A profundidade de mobilização de 503 mm, também está aderente aos padrões de qualidade da operação, resultado também comprovado pela profundidade de 1.334 mm de raízes a 120 DAP.

A análise comparativa entre operações permite afirmar que a profundidade de trabalho da canteirização – 584 mm – é maior que a da subsolagem – 311 mm -, podendo esta última estar limitada a potência tratorial necessária para subsolador de 5 hastes. A maior profundidade de mobilização do solo resultou em maior profundidade de sistema radicular 90 DAP para a canteirização – 1.279 mm – frente a subsolagem – 562 mm.

Os resultados econômicos para as simulações realizadas para comparação dos sistemas de preparo de solo demonstram atratividade para o sistema de preparo localizado utilizando canterizador ou subsolador localizado – SPLC e SPLS –, frente aos SPC e SPR, tanto em cenário onde há fosfatagem como no cenário sem fosfatagem. Ao simular o impacto econômico em uma unidade de bioenergia padrão, fica claro o potencial de ganho com a adoção da tecnologia de sistema de preparo localizado associado ao manejo em STC, apresentando margem de contribuição relativa em torno de 10% a partir de 5 e 7,5% de acréscimo de produtividade no cenário com fosfatagem e sem fosfatagem respectivamente.

A proposta apresentada de modelagem de sistema de colheita mecanizada a partir do IC e RN, demonstrou estar alinhada com teste de desempenho de avaliação de colhedoras, os resultados de campo não diferem estatisticamente dos obtidos por meio do modelo em $\chi_{0,95}^2$ no teste de qui quadrado.

Os resultados encontrados durante a análise exploratória do modelo de colheita mecanizada para ROC, apresentou desempenho 25% superior para colhedoras de duas linhas simultâneas em espaçamento de 1,50 m para TCH de até 70 Mg ha^{-1} ; 15,9%

para TCH de 80 Mg ha⁻¹; 5,8% para TCH de 90 Mg ha⁻¹; para produtividades superiores a desempenho operacional apresentada permaneceu ao redor de 5%, limitado pelo RN de 130 Mg h⁻¹. O mesmo comportamento é observado para os custos.

O modelo de colheita mecanizada apresenta-se como ferramenta de apoio à gestão uma vez que permite o dimensionamento de recursos, adequação da relação transbordo/colhedora em frentes de colheita e análise de cenários para distribuição de frente afim de garantir linearidade de entrega de matéria-prima para a unidade industrial.

O modelo elaborado para cálculo da receita operacional permite a interpretação da participação de cada processo na formação de custos de produção e possibilita a criação de cenários para a avaliação do retorno econômico em relação a introdução de tecnologias e expectativas de acréscimo de TCH.

7 Referências bibliográficas

ANDRÉ, J.A. **Sistemas de preparo de solo para cana-de-açúcar em sucessão com amendoim**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Estadual Paulista -- Jaboticabal, SP: [s.n.], 2009.

ALBIERO, D.; MACIEL, A.J.S.; MILAN, M.; MONETEIRO, L.A.; MION, R.L. Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.1, p.86-95, jan-mar, 2012.

ALBIERO, R.; PAULO, R. M.; FÉLIX Jr., J. C.; SANTOS, J. S. G.; MELO, R. P. Agriculture 4.0: a terminological introduction. **Revista Ciência Agronômica**, v.51, p. 830-840, 2020.

AMIRI, A.; ALLAHYARI, S. Change point estimation methods for control chart postsignal diagnostics: A literature review. *Quality Reliability Engineering International*, v.28, n.7, p.673-685, 2012. Apud VOLTARELLI, M. A. **Ferramentas da qualidade na colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista – Jaboticabal, SP, 2015. 131 p.

ANTILLE, D.L., IMHOFF, S.C., ALESSO, C.A., CHAMEN, W.C.T. & TULLBERG, J.N. Potential to increase productivity and sustainability in Argentinean agriculture with controlled traffic farming: a short discussion. **Acta Technologica Agriculturae**. v.18, n.3, p.83–87, 2015. Special Issue: Controlled Traffic Farming. DOI: 10.1515/ata-2015-0016

ANTILLE, D.L.; PEETS, S.; GALAMBOŠOVÁ, J.; BOTTA, G.F.; RATAJ, V.; MACAK, M.; TULLBERG, J.N.; CHAMEN, W.C.T.; WHITE, D.R.; MISIEWICZ, P.A.; HARGREAVES, P.R.; BIENVENIDO, J.F.; GODWIN, R.J. Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. **Agronomy Research**. v.17, n.3, p. 653–682, 2019. <https://doi.org/10.1515/AR.19.133>

ARBEX, P. Ajuste de tratores para aplicação na cultura da cana-de-açúcar. p.505– 12. In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

BAIO, F.H.R.; LEAL, J.C.; CAMPANELLI, V.P.C. Casos e aplicações em AP na produção de cana-de-açúcar. p.439- 444. In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

BARBOSA, L.A.P. **Compactação do solo gerada por pneus de alta flutuação de eixo livre e trativo**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

BARBOSA, L.C. **Atributos físicos do solo e desenvolvimento radicular da cana planta em diferentes sistemas de manejo**. Dissertação de Mestrado apresentada à

Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas -- Campinas, SP: [s.n.], 2015.

BELARDO, G.C. **Avaliação de desempenho efetivo de três colhedoras em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) sem queima**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade Estadual de São Paulo -- Piracicaba, SP: [s.n.], 2010.

BELARDO, G.C.; ROSA, J.H.M., MAGALHÃES, P.S.G. *Evolução da colheita mecanizada na cultura de cana-de-açúcar*. p 335 - 355 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

BENEDINI, M.S.; CONDE, A.J. Espaçamento ideal de plantio para colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Coplacana**, Guariba – SP, n. 52, p. 26-28, 2008.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v.57, n.2, p 437–447, 2006

BÉRGAMO, L.R. **A tecnologia na gestão de operações e processos agrícolas na cultura da cana-de-açúcar**. 1ªed. Araçatuba, 2020: Edição do Autor. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/486092754/A-Tecnologia-na-GestA-o-de-OperaA-A-%C2%B5es-e-Processos-AgrA-colas-na-Cultura-da-Cana-de-AA-A-%C2%BAcar-pdf>> Acesso em 28/09/2021,

BERNARDES, M.S.; BELARDO, G.C. *Espaçamentos para a cultura da cana-de-açúcar*. p 243 - 257 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

BANCHI, A. D. ; GARCIA, A. P. ; GRESPAN, A. ; ALBIERO, D. ; FAVARIN, L. G. A. ; GALVÃO, CEZARIO B. . Operating cost of sugarcane harvester in function of agricultural productivity and harvester age. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** , v. 23, p. 552-557, 2019.

BANCHI, A. D. ; GARCIA, A. P. ; ALBIERO, D. ; GALVAO, C. B. ; FAVARIN, L. G. A. Importance of crop productivity and equipment lifetime in the strategic and tactical management of sugarcane harvesters. **ENG AGR-JABOTICABAL** , v. 40, p. 601-608, 2020.

BLUETT, C.; TULLBERG, J.N.; McPHEE, J.E.; ANTILLE, D.L. Soil and Tillage Research: Why still focus on soil compaction? **Soil & Tillage Research**, 194, 2019. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.028>> Acesso em: 28/09/2021.

BOCHTIS, D.D.; SØRENSEN, C.G.; BUSATO, P.; HAMEED, I.A.; RODIAS, E.; GREEN, O.; PAPADAKIS, G. Tramline establishment in controlled traffic farming based . on operational machinery cost. **Biosystems Engineering**, 107, 2010. p. 221-231. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/251681701>> Acesso em 16/10/2020.

BOTTA, G.F.; RIVERO, D.; TOURN; M.; BELLORA MELCON, F.; POZZOLO, O.; NARDON, G, BALBUENA, R.; TOLON BECERRA, A.; ROSATTO, H.; STADLER,

S. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil & Tillage Research*, v.101, p.44-51, September-October 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2008.06.001>> Acesso em 16/10/2020.

BRAUNBECK, O.A.; MAGALHÃES, P.S.G. *Technological evaluation of sugarcane mechanization*. p.451-464. In: CORTEZ, L.A.B. (Coord.). **Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability**, São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

BRENCO – Companhia Brasileira de Energia Renovável. **Plano Diretor Agrícola**: Diretrizes a curto, médio e longo prazo, 2009. 226p.

CARR, A. P.; CARR, D. R.; CARR, I. E.; WOOD, A. W.; POGGIO, M. *Implementing sustainable farming practices*. in the Herbert: The Oakleigh farming company experience. **Australian Soc. Of Sugarcane Technologists**, v. 30, p. 25-33, 2008

CAVALETT, O.; CHAGAS, M.F.; MAGALHÃES, P.S.G.; CARVALHO, J.L.N.; CARDOSO, T.F.; FRANCO, H.C.J.; BRAUNBECK, O.A.; BONOMI, A. The agricultural production model. p 13-51. In: BONOMI, A.; CVALETT, O.; DA CUNHA, M.P.; LIMA, M.A.P. **Virtual biorefinery- an optimization strategy for renewable carbon valorization**. Springer, 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-26045-7.pdf>> Acesso em: 29/10/2021.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. *Sistema de conservação do solo e modelo de sistematização da lavoura para áreas de cana colhida sem queimar*, 2004. 26 p.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Programa de diagnóstico de compactação de solos. Piracicaba, 2005. 6 p.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Tecnologias para aumentar o ciclo de vida do canavial. Piracicaba, 2008. 6 p.

CERISOLA, C.; DRAGHI, L. Y JORAJURÍA-COLLAZO, D. Compactación en siembra directa. Consecuencias del tránsito durante la operación de siembra sobre la pérdida de porosidad libre al aire del suelo. **Rev. De la Facultad de Agronomía**, La Plata. 113(2). p.123-133. 2015

CHAMEN, W.C.T. **The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types**. PhD Thesis. School of Applied Sciences, Cranfield University, Bedfordshire, UK, 2011.

CHAMEN, T. Controlled Traffic Farming – from Worldwide Research to Adoption in Europe and its Future Prospects. **Acta Technologica Agriculturae** 3, Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, p. 64–73, 2015.

CHAMEN, T.; MOXEY, A.P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P.D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil & Tillage Research**. v.146, p. 10–25, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198714001901>> Acesso em: 19/10/2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras. Agosto de 2020.** Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>> Acesso em: 24/10/2020.

CONDE, A. Sistematização Visando Manejo de Solos Sustentável. **CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA** – Piracicaba, 2008. 20 p.

CORREA, A.P.A.; QUEIROZ, E.; TREVISAN, N. *Teste do qui-quadrado*. CE001 – Bioestatística. UFPR. Disponível em: <http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:ce001:testes_do_qui-quadrado.pdf> Acesso em 15/02/2021.

CORRÊA, S.T.R.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; SCARPARE, F.V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E.T. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura – revisão. **Revista de Agricultura**, v.86, n.1, p.1- 3, 2011.

DA SILVA, R.P.; FURLANI, C.E.; TAVARE, T.O.; VOLTARELLI, M.A. **Compactação do solo, escarificação e subsolagem**. Material didático desenvolvido para suporte das atividades dos discentes do curso de Graduação em Zootecnia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista – Jaboticabal, 2015.

DE MARIA, I.C. de; MARTINS, J.P.P. *Uso do terraceamento agrícola na cultura da cana-de-açúcar*. p 117 - 127 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

DE MARIA, I. C.; DRUGOWICH, M.I.; BORTOLETTI, J.O. VITTI, A.C.; ROSSETTO, R.; FONTES, J.L.; TCATCHENCO, J.; MARGATHO, S.M.F. Recomendações gerais para a conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Instituto Agrônomo**, Campinas, 2016. 100 p. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 216). Disponível em: < <https://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/arquivos/iacbt126.pdf> > Acesso em: 28/09/2021.

DE OLIVEIRA, D.C. **Viabilidade econômica do preparo profundo de solo no cultivo de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - Piracicaba, SP: [s.n.], 2017.

DIAS NETO, A.F. *Automação agrícola: Aplicação na cultura de cana-de-açúcar*. p 535 -545 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

ESTEBAN, D.A.A.; DE SOUZA, Z.M.; TORMENA, C.A.; LOVERA, L.H.; LIMA, E.L.; DE OLIVEIRA, I.N.; RIBEIRO, N.P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**. v.187, p.60-71, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>.

FARINA, E.; ZECHIN, M.; RODRIGUES, A.P; BELON, J.G.O; DE SOUZA, E.L.; KUTAS, G.; PHILLIPS, L.; CAMARGO, R.; SZWARC, A.; DE SOUZA, Z.J.; Cenários de desafios no setor Sucroenergético. **AgroANALYSIS**, v. 38, n. 5, p. 30-36, 2018.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3ed.. Piracicaba, São Paulo: STAB, 2011.

FERREIRA, L.R.P.; FERREIRA, M.N. Estudo de caso: Aplicação de canteirização em canaviais. p. 487 – 503 545 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

GALAMBOŠOVÁ, J.; MACÁK, M.; RATAJ, V.; GODWIN, R.J.; ŽITŇÁK, M.; VITÁZKOVÁ, B.; ĎUĐÁK, J.; CHAMEN, T. Yield performance of controlled traffic farming permanent tramlines. Written for presentation at the 2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting Sponsored by ASABE Montreal, Quebec Canada July 13 – 16, 2014. 7 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/289334293_Yield_performance_of_controlled_traffic_farming_permanent_tramlines> Acesso em: 22/10/2020.

GODWIN, R.; MISIEWICZ, P.; WHITE, D., SIMITH, E.; CHAMEN, T.; GALAMBOŠOVÁ, J.; STOBART, R. Results from Recent Traffic Systems Research and the Implications for Future Work. **Acta Technologica Agriculturae** 3, Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, p.57–63, 2015, Disponível em: <<https://sciendo.com/article/10.1515/ata-2015-0013>> Acesso em: 28/09/2021.

GONÇALVES, N.H. *Manejo do solo para a implantação da cana-de-açúcar*. p.93-103. In: SEGATTO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba, CP 2, 2006.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I.C.; ARAUJO-JUNIOR, C.F.; FARHATE, C.V.; DE SOUZA, Z.M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of The Total Environment**. v.681, p.424-434, 2019. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.009> Acesso em: 04/10/2021.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S.; DE MARIA, I.S.; ARAUJO-JUNIO, C.F.; DE LIMA; C.C.; VITTI, A.C.; FIGUEIREDO, G.C.; DECHEN, S.C.F. Soil compaction on traffic lane due to soil Tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. **Scientia Agricola**. v.76, n.6, p.509-517, November/December, 2019. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0052>> Acesso em: 05/10/2021.

HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v.82, n.2, p.121-145, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>> Acesso em: 28/09/2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas. Organizador: Gesmar Rosa dos Santos . – Brasília: Ipea, 2016.

JIMENEZ, K.J.; ROLIM, M.M.; GOMES, I.F.; DE LIMA, R.P.; BERRÍO, L.L.A.; ORTIZ, P.F.S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanized sugarcane harvest, *Soil and Tillage Research*, v.206, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104847>. Acesso em: 04/10/2021.

KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. **Agricultural Systems**. Oxford, v.104, n.7, p.513-521, 2011.

LANÇAS, K. P. Sustentabilidade dos solos de cerrado e tráfego de máquinas. In: Encontro técnico de manejo de solos sob cerrado. Uberaba: [s.n.]. 2005. Disponível em: < <https://docplayer.com.br/45083165-Sustentabilidade-dos-solos-de-cerrado-e-trafego-de-maquinas.html> > Acesso em: 28/09/2021.

LANÇAS, K.P. Compactação, descompactação e canteirização na cana-de-açúcar. p 457 - 476 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

LANÇONI, A.A.; SOARES, W.M.; CARRER, C.C.; LIMA, C.G. Efeito da Aplicação de um Sistema de Automação Agrícola em Colheita Mecanizada de Cana-de-Açúcar como Ferramenta de Gestão e Controle de Custo Operacional. **Ensaio**, v. 24, n. 2, p. 146-152, 2020. Disponível em: <https://seer.pgskroton.com/index.php/ensaioeciencia/article/view/8672> Acesso em: 24/08/2021.

LANDELL, M.G.A.; BRESSIANI, J.A. *Melhoramento genérico, caracterização e manejo varietal*. p 101 – 155. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Instituto Agrônomo de Campinas, 2008.

LIMA, G. C.; FIGUEIREDO, F. L.; BARBIERI, A. E.; SEKI, J. Agro 4.0: enabling agriculture digital transformation through IoT. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, p.900-930, 2020.

MAGALHÃES, P.S.G.; NOGUEIRA, L. A. H.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R.; FRANCO, H. C. J.; BRAUNBECK, O. A. Agro-industrial technological paths. In: Centro de Gestão e Recursos Estratégicos (CGEE). (Org.). **Sustainability of sugarcane bioenergy**. 1 ed. Brasília: CGEE, p. 27-69, 2012.

MANZONI, C.R. Automação agrícola: visão atual, desafios e oportunidades na cana-de-açúcar. p 527-534. In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

MARTINS FILHO, M.V.; SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JÚNIOR, J. A importância de se conhecer a variabilidade dos atributos do solo. p 149 - 173 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

MASNELLO, O. D. ; MOLIN, J. P. . Tipos de pilotos automáticos para máquinas agrícolas. *Cultivar Máquinas*, 08 jan. 2021. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/noticias/tipos-de-pilotos-automaticos-para-maquinas-agricolas> > Acesso em: 06/12/2021.

MAZARON, B.H.S. **Preparo de solo para a cultura de cana-de-açúcar: alternativas e persistência**. Tese de Doutorado apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP -- Jaboticabal : UNESP, 2019.

MAZZA, J.A. Manejo dos solos na cana-de-açúcar como subsídio à mecanização. p.89 - 103 In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

McHUGH, A.D.; TULLBERG, J.N.; FREEBAIRN, D.M. Controlled traffic farming restores soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.104, n.1, p.164-172, 2009.

MEGETO, G. A. S.; SILVA, A. G.; BULGARELLI, R. F.; BUBLITZ, C. F.; VALENTE, 495 A. C.; COSTA, D. A.G. Artificial intelligence applications in the agriculture 4.0. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, p. 855-875, 2020.

MELO, M.O.; ROSA, J.H.M. Uso de transbordo na colheita mecanizada e seus impactos no CTT. p.429–437. In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

MELO, R.P.; ALBIERO, D.; MONTEIRO, L.A.; SOUZA, F.H.; SILVA, J.G. Qualidade na distribuição de sementes de milho em semeadoras em um solo cearense. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, jan-mar, p.94-101, 2013.

MICHELAZZO, M.B. **Mecanização de bitola larga para redução do tráfego e do custo da colheita de cana-de-açúcar**. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas -- Campinas, SP: [s.n.], 2018.

MILAN, M.; FERNANDES, R.A.T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agricola**, v.59, n.2, abr/jun, p.261-266, 2002

MILAN, M.; ROSA, J.H.M. Aspectos relevantes e uso de modelagem para CTT. p.415–427. In: BELARDO, G.; CASSIA, M.; DA SILVA, R. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

MILANEZ, A.Y.; MANCUSO, R.V.; MAIA, G.B.S.; ALVES, C.E.A.; MADEIRA, R.F. Conectividade rural: situação atual e alternativas para superação da principal barreira à agricultura 4.0 no Brasil. **BNDES**. Rio de Janeiro, v. 26, n. 52, p. 7-43, set. 2020. https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20180/1/PR_Conectividade%20rural_BD.pdf , Acesso em 24/08/2021.

MISSIO, C. **Qualidade do plantio mecanizado de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, MS, 2016.

MOLIN, J.P.; CARREIRA, P.T. Metodologia para ensaios cinemáticos de receptores de GNSS utilizando um GPS RTK como referência. **Revista Brasileira de Agroinformática**, Lavras, v.8, n.1, p.53-62, 2006.

MONTGOMERY, D.C. Cumulative Sum and Exponentially Weighted Moving Average Control Charts. In: MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. Arizona: Wiley, 2009. v.6, p. 399-432.

NACHILUK, K. Cana-de-açúcar: produção e processamento em 2019. In: Análises e indicadores do agronegócio. v. 15, n. 3, 2020. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>> Acesso em :23/10/2020.

NEVES, J.L.M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar picada e alternativas para sua redução.** Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas -- Campinas, SP: [s.n.], 2003.

NEVES, J.L.M. Gargalos e oportunidades da mecanização agrícola. **Painel de Bioeconomia** - FENASUCRO -- Sertãozinho, SP, 2017. 223 p.

NEVES, J.L.M. Las buenas prácticas y a calidad em el sistema de cosecha mecanizada, la cuestión de la Compactación. Cengicaña – Guatemala, 2018. 24 p.

OLIVEIRA, M.F.; KARAM, D. Dessecação antecipada reduz incidência de ervas daninhas. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/899386/1/Dessecacaoantecipada.pdf>> Acesso em: 23/11/2020.

OTTO, R. **Desenvolvimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada.** Tese de Doutorado apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Piracicaba, SP: [s.n.], 2012.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.2, p.131-143, 2004.

PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade na região centro-sul do Brasil: fechamento da safra 2019/2020, 2020.

PENATTI, C.P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência.** Itú, São Paulo: Ottoni, 2013.

RAMOS, C.R.G. **Metodologia para determinação do índice de colheitabilidade para avaliar a colheita mecanizada de cana-de-açúcar.** Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP - Campus de Botucatu – Botucatu, SP: [s.n.], 2016.

REIS, A.V.; MEDEIROS, F.A.; FERRERIA, M.F.; MACHADO R.L.T.; ROMANO, L.N.; MARINI, V.K.; FRANCETTO, T.R.; MACHADO, A.L.T. *Technological trends in digital Agriculture and their impact on agricultural machinery development practices.* **Revista Ciência Agrônômica**, v. 51, Special Agriculture 4.0, e20207740, Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2020. Disponível em: <<http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/7740/1952>> Acesso em: 27/08/2021.

RODRIGUES, E.G.; GUTIÉRREZ-RODRÍGUEZ, F.; DÁVILA, J.F.R.; GONZÁLEZ-HUERTA, A.; LÓPEZ, D.J.P.; CUEVAS, R.S. Evaluation of the intensity of the traffic of tractors and implements on agricultural soil. **Revista Mexicana Ciencias Agrícolas** volume 11 number 4. p. 753-766. May 16 - June 29, 2020.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F; VITTI, C.; CANTARELLA, H. Fertility maintenance and soil recovery in sugarcane crops. p.381-404 In: CORTEZ, L.A.B. (Coord.). Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability, São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

ROSSI NETO, J. **Desenvolvimento do sistema radicular e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes espaçamentos**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas -- Campinas, SP: [s.n.], 2015.

SANTOS FILHO, A.G.; DOS SANTOS, J.E.G. **Apostila de máquinas agrícolas**. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – Bauru, 2001.

SILVA, J.E.A.R.; ALVES, M.R.P.A.; COSTA, M.A.B. Planejamento de turnos de trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. *Gest. Prod.*, São Carlos, v. 18, n. 1, p.73-90, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-530X2011000100006>> Acesso em: 28/09/2021.

SILVA, J.E.A.R. **Um modelo de simulação discreta para analisar o sistema integrado de colheita de cana-de-açúcar e aproveitamento de biomassa**. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de São Carlos -- São Carlos: UFSCar, 2012.

SIMIONATO, R.; TORRES NETO, J. R.; SANTOS, C. J.; RIBEIRO, B. S.; ARAÚJO, F. C. B.; PAULA, A. R.; OLIVEIRA, P. A. L.; FERNANDES, P. S.; YI, J. H. Survey on connectivity and cloud computing Technologies: state-of-art applied to Agriculture 4.0. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, p.715-745, 2020.

SOUSA, A.C.M.; SOUZA, Z.M.; CLARET, R.M.P.; TORRES, J.L.R Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**. v.20, p.173-1782, 2017.

SOUZA, G.S. de **Controle de tráfego agrícola e seus efeitos nos atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar**. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, SP: [s.n.], 2012. 114 p.

SPEKKEN, M ; MOLIN, J.P. ; ROMANELLI, T.L. . Cost of boundary manœuvres in sugarcane production. **Biosystems Engineering**, v. 129, p. 112-126, 2015

SPIEGEL, M.R. **Estatística**. Rio de Janeiro: Ao livro técnico S.A., 1968.

STORINO, M.; PECHE FILHO, A.; KURACHI, S.A.H. *Aspectos operacionais do preparo de solo*. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Instituto Agrônômico de Campinas, 2008.

TENU, I.; CARLESCU, P.; COJOCARIU, P.; ROSCA, R. Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil. *Resource Management for Sustainable Agriculture*, p.263–296, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5772/47746>> Acesso em: 14/10/2020.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; da COSTA, A.C.S.; GONÇALVES; C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes

sistemas de preparo de solo. **Revista Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.795-801, out./dez. 2002.

TORRES, L.S. **Controle estatístico de processo aplicado ao monitoramento de perdas na colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista – Jaboticabal, SP, 2014.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2020. Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/>> Acesso em: 23/10/2020.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE A. A.; PERECIN D.; JORGE L. A. C.; LANDELL M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.849-858, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A.A. *Fisiologia do sistema radicular*. p 79-97 In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Instituto Agrônomo de Campinas, 2008.

VILLAFUERTE, A. VALADARE; F.G., CAMPOLINA; G.F.; DA SILVA, M.G.P. Agricultura 4.0 - Estudo de inovação disruptiva no agronegócio brasileiro. In: *9th International Symposium on Technological Innovation*. v. 9, n.1, p.150-162, Aracaju, Sergipe, Brasil 2018. Disponível em: <http://www.api.org.br/conferences/index.php/ISTI2018/ISTI2018/paper/viewFile/567/276> Acesso em: 23/08/2021.

VOLPATO, J. L. M. **Otimização de um cortador de base flutuante para seguimento do perfil de solo em colhedoras de cana-de-açúcar**. 204 p. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, SP: [s.n.], 2001.

VOLTARELLI, M.A.; SILVA, R.P.; TAVARES, T.O.; PAIXÃO, C.S.S. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola – FCAV/UNESP – Jaboticabal, 2015. Disponível em: <<https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/engenhariarural/rouversonpereiradasilva/apostila-colheita-mecanizada-de-cana-de-acucar.pdf>> Acesso em: 28/09/2021.

VOLTARELLI, M. A. **Ferramentas da qualidade na colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista – Jaboticabal, SP, 2015.

ZAPAROLLI, D. Uso de recursos da agricultura 4.0 aumenta a produtividade e melhora a sustentabilidade no campo. **Revista Pesquisa FAPESP**, v.21, n.287, p.12-20, 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2020/01/Pesquisa-287_Completo-2.pdf> Acesso em: 30/09/2021.

Anexo 1

Tabela 69 - Principais operações referentes aos processos de preparo de solo, plantio, tratos culturais e CCT

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO	GRUPO DE OPERAÇÃO	PROCESSO AGRÍCOLA
Abastecimento de Calda Pronta	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Abastecimento de Fertilizante	Produtiva	Plantio e Tratos Culturais
Abastecimento de Muda	Produtiva	Plantio
Aguardando Colhedora Terminar a Carga	Produtiva	CCT
Aplicação de Calcário	Produtiva	Preparo de Solo e Tratos Culturais
Aplicação de Fertilizante Líquido	Produtiva	Tratos Culturais
Aplicação de Fertilizante Mineral (Granulado)	Produtiva	Tratos Culturais
Aplicação de Fertilizante Orgânico	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Aplicação de Fosfato	Produtiva	Preparo de Solo e Tratos Culturais
Aplicação de Gesso	Produtiva	Preparo de Solo e Tratos Culturais
Aplicação de Herbicida (Área Total)	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Aplicação de Herbicida (Carreador)	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Aplicação de Herbicida (Catação)	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Aplicação de Inseticida	Produtiva	Plantio e Tratos Culturais
Aplicação de Nematicida / Inseticida na Soqueira	Produtiva	Tratos Culturais
Aplicação de Vinhaça	Produtiva	Plantio e Tratos Culturais
Aração (Aiveca)	Produtiva	Preparo de Solo
Aração (Disco)	Produtiva	Preparo de Solo
Balança de Entrada	Produtiva	CCT
Balança de Saída	Produtiva	CCT
Basculamento / Transbordamento	Produtiva	CCT
Bate-e-Volta na Indústria (Engate/Desengate)	Produtiva	CCT
Bate-e-Volta na Lavoura (Engate/Desengate)	Produtiva	CCT
Carregamento de Calcário / Gesso / Fertilizante / Adubo	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Carregamento de Muda	Produtiva	Plantio
Carregamento de Vinhaça	Produtiva	Preparo de Solo e Tratos Culturais
Carregando Cana (Transbordo)	Produtiva	Plantio e CCT
Carregando Cana (Caminhão Canavieiro)	Produtiva	CCT
Cobrição de Muda	Produtiva	Plantio
Colheita Mecanizada	Produtiva	CCT
Colheita Mecanizada de Muda	Produtiva	Plantio
Construção de Carreadores	Produtiva	Preparo de Solo
Construção de Terraços	Produtiva	Preparo de Solo
Cultivo (Escarificação)	Produtiva	Tratos Culturais
Cultivo (Fertilizante + Escarificação)	Produtiva	Tratos Culturais
Cultivo (Fertilizante)	Produtiva	Tratos Culturais
Descarregamento de Muda	Produtiva	Plantio
Descarregamento de Vinhaça	Produtiva	Preparo de Solo e Tratos Culturais
Deslocamento Carregado	Produtiva	CCT
Deslocamento Vazio	Produtiva	CCT

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO	GRUPO DE OPERAÇÃO	PROCESSO AGRÍCOLA
Manobra de Final de Rua	de Solo Produtiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manobra Interna no Talhão	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manutenção de Carreadores	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Mapeamento de Linhas de Plantio (RTK)	Produtiva	Plantio
Molhando Estrada	Produtiva	Plantio e CCT
Plantio Mecanizado	Produtiva	Plantio
Preparo Localizado (Penta)	Produtiva	Preparo de Solo
Quebra-Lombo	Produtiva	Tratos Culturais
Subsolagem	Produtiva	Preparo de Solo
Sulcação com Adubo	Produtiva	Plantio
Transbordo Alocado	Produtiva	CCT
Transporte de Água	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Transporte de Cana Carregado (Caminhão)	Produtiva	CCT
Transporte de Cana Vazio (Caminhão)	Produtiva	CCT
Transporte de Fertilizante	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Transporte de Muda Carregado	Produtiva	Plantio
Transporte de Muda Vazio	Produtiva	Plantio
Transporte de Vinhaça Carregado	Produtiva	Preparo de Solo e Tratos Culturais
Transporte de Vinhaça Vazio	Produtiva	Preparo de Solo e Tratos Culturais
Trator Reboque (Cabo de Aço)	Produtiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Abastecimento e Lubrificação	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Agitação de Calda Pronta	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Aguardando Manobra do Transbordo	Auxiliar	Plantio e CCT
Aguardando Colhedora Parada Rápida	Auxiliar	Plantio e CCT
Bater Pneus	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Check-List / Inspeção de Equipamento	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Deslocamento (Rodando)	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Enlonamento de Carga	Auxiliar	CCT
Fiscalização Rodoviária	Auxiliar	Plantio e CCT
Intervalo de Colheita (Janela)	Auxiliar	CCT
Lavagem e Limpeza de Equipamento	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Limpeza de Filtro e Bico	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Pátio Externo	Auxiliar	CCT
Pátio Interno	Auxiliar	CCT
Refeição	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Regulagem de Implemento	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Sonda (Amostragem)	Auxiliar	CCT

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO	GRUPO DE OPERAÇÃO	PROCESSO AGRÍCOLA
Treinamento / Instrução de Trabalho / Visita Técnica	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Troca de Faquinha	Auxiliar	Plantio e CCT
Troca de Turno	Auxiliar	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Borracheiro	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Comboio (Falta de Combustível)	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Eletricista	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Mecânico	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Peças	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Trocando Pneus	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Borracharia	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manutenção de Carretas / Julietas	Manutenção	Plantio e CCT
Manutenção de Implementos	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais
Manutenção Interna (Oficina)	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manutenção Preventiva	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manutenção de Piloto Automático	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manutenção Elétrica	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manutenção Hidráulica	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Manutenção Mecânica	Manutenção	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Abertura de Área	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Aguardando Alocação de Frente de Colheita	Improdutiva	CCT
Aguardando Carregamento	Improdutiva	CCT
Aguardando Descarregamento (Transbordo)	Improdutiva	CCT
Aguardando Descarregar na Mesa	Improdutiva	CCT
Aguardando Ordens	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Prancha / Munck	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Transbordo	Improdutiva	CCT
Trator Reboque (Cabo de Aço)	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Troca de Implemento	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Computador de Bordo Desligado	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Embuchamento	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio e CCT
Equipamento Encalhado / Atolado	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Equipamento Inativo	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO	GRUPO DE OPERAÇÃO	PROCESSO AGRÍCOLA
Equipamento Reserva	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Falta de Água	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Falta de Calda Pronta	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Falta de Caminhão	Improdutiva	CCT
Falta de Fertilizante	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Falta de Muda	Improdutiva	Plantio
Falta de Operador / Motorista	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Falta de Vinhaça	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Fila na Balança	Improdutiva	CCT
Fila na Sonda	Improdutiva	CCT
Higiene Pessoal	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Parada por Acidente	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Sem Apontamento	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Transporte de Equipamento no Prancha	Improdutiva	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Indústria Parada	Indústria	CCT
Moagem Reduzida	Indústria	CCT
Indeterminado	Indeterminado	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Aguardando Condições Climáticas (Pulverização)	Condições Climáticas	Preparo de Solo, Plantio e Tratos Culturais
Chuva / Solo Úmido	Condições Climáticas	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT
Sem Sinal de RTK / Cintilação	Condições Climáticas	Preparo de Solo, Plantio, Tratos Culturais e CCT

Fonte: Bérnago (2020)

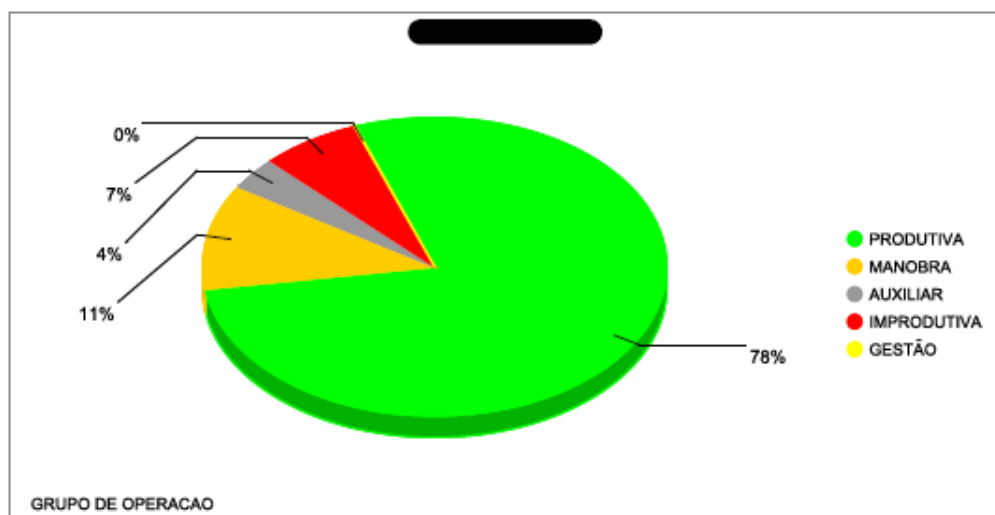
Anexo 2
Relatórios teste desempenho
Colhedora frota: 123043



Relatorio Gerencial de Horas

Corporativo/Grupo de Operação
 Período: 16/08/2018 até 16/08/2018

Grupo	Descrição da Operação	Tempo	%Dia
PRODUTIVA			
198	Colheita De Cana-Moagem	18:45:19	100.00%
Total de Horas Grupo: PRODUTIVA		18:45:19	78.15%
MANOBRA			
334	Manobra CI	01:44:40	63.70%
1039	Manobra Auxiliar CI	00:59:39	36.30%
Total de Horas Grupo: MANOBRA		02:44:19	11.41%
AUXILIAR			
610	Deslocamento CI	00:16:36	32.63%
902	Abastecimento CI-Tt	00:23:56	47.05%
952	Troca De Turno	00:10:20	20.31%
Total de Horas Grupo: AUXILIAR		00:50:52	3.53%
IMPRODUTIVA			
939	Falta De Transbordo	01:29:30	90.48%
954	Aguardando Manobra Transbordo	00:04:26	4.48%
1042	Sem Apontamento	00:04:59	5.04%
Total de Horas Grupo: IMPRODUTIVA		01:38:55	6.87%
GESTÃO			
1036	Indeterminado	00:00:35	100.00%
Total de Horas Grupo: GESTÃO		00:00:35	0.04%
Total de Horas Geral:		24:00:00	



Colhedora frota: 123044

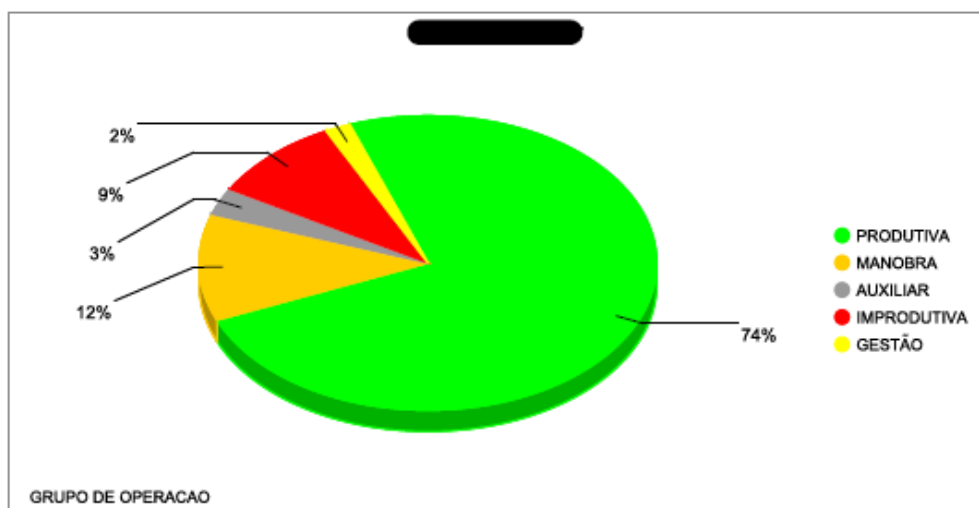


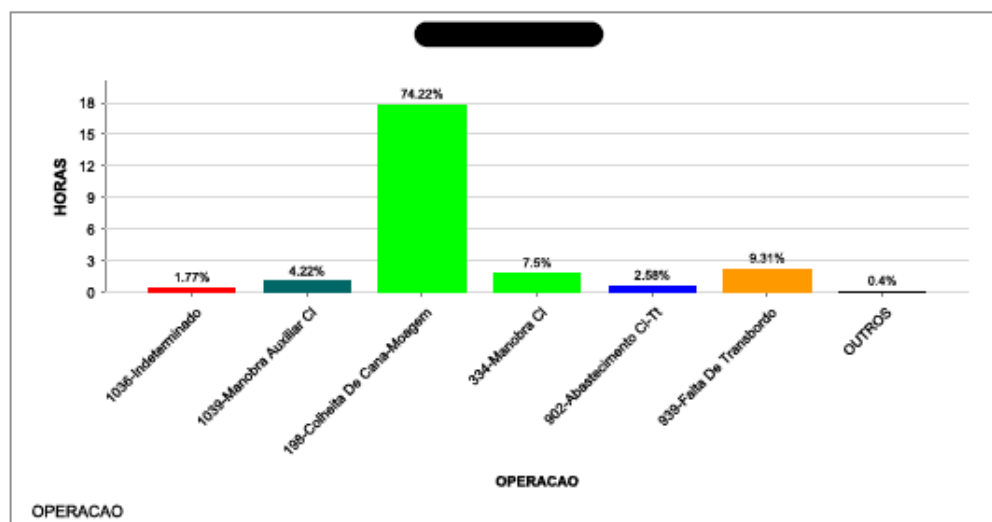
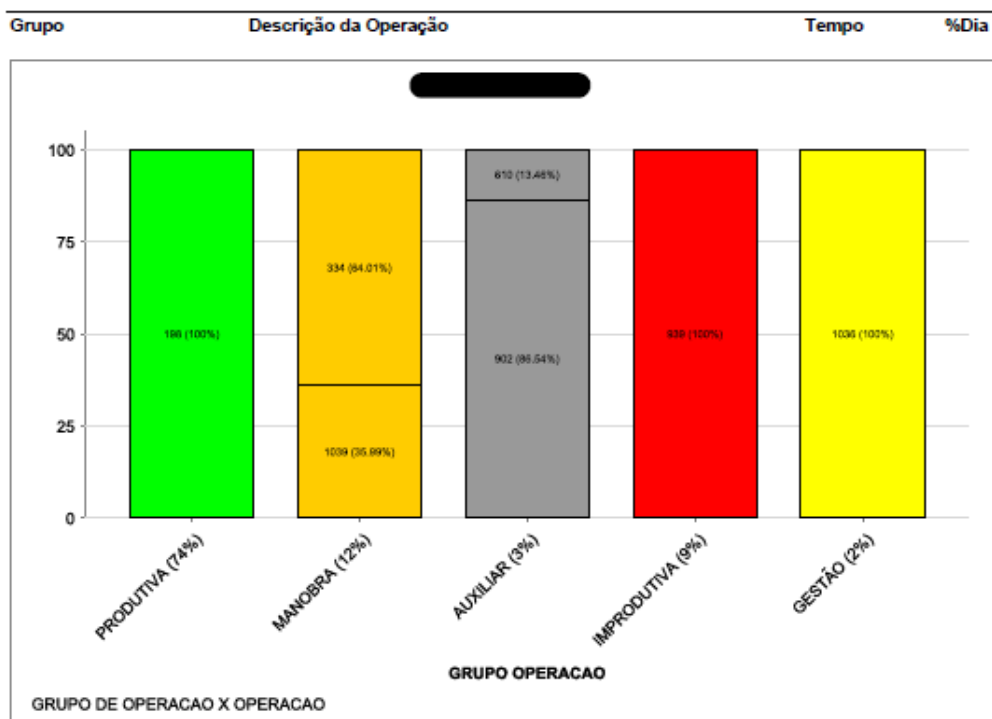
Relatorio Gerencial de Horas

Corporativo/Grupo de Operação

Período: 16/08/2018 até 16/08/2018

Grupo	Descrição da Operação	Tempo	%Dia
PRODUTIVA			
198	Colheita De Cana-Moagem	17:48:45	100.00%
Total de Horas Grupo: PRODUTIVA		17:48:45	74.22%
MANOBRA			
334	Manobra CI	01:48:04	64.01%
1039	Manobra Auxiliar CI	01:00:46	35.99%
Total de Horas Grupo: MANOBRA		02:48:50	11.72%
AUXILIAR			
610	Deslocamento CI	00:05:48	13.48%
902	Abastecimento CI-Tt	00:37:05	86.54%
Total de Horas Grupo: AUXILIAR		00:42:51	2.98%
IMPRODUTIVA			
939	Falta De Transbordo	02:14:05	100.00%
Total de Horas Grupo: IMPRODUTIVA		02:14:05	9.31%
GESTÃO			
1036	Indeterminado	00:25:29	100.00%
Total de Horas Grupo: GESTÃO		00:25:29	1.77%
Total de Horas Geral:		24:00:00	





Colhedora frota: 623004

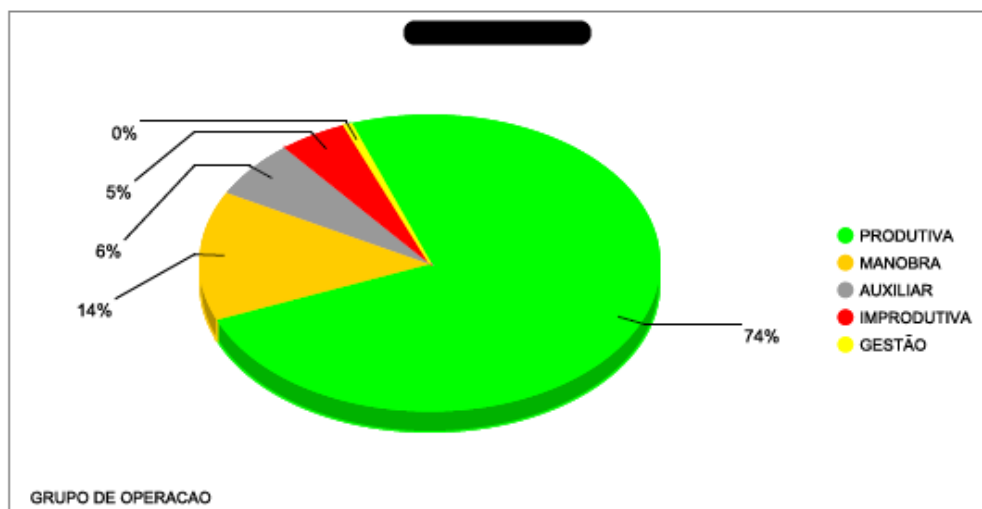


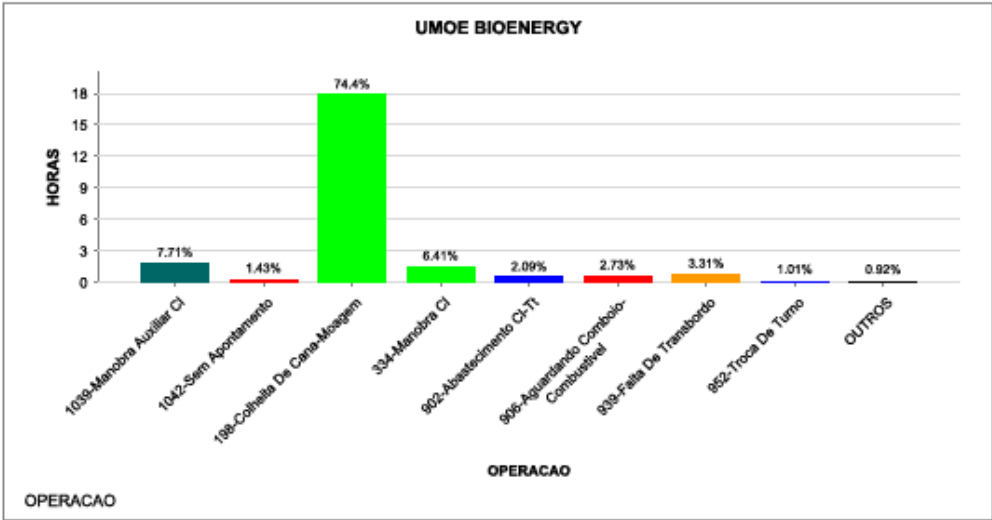
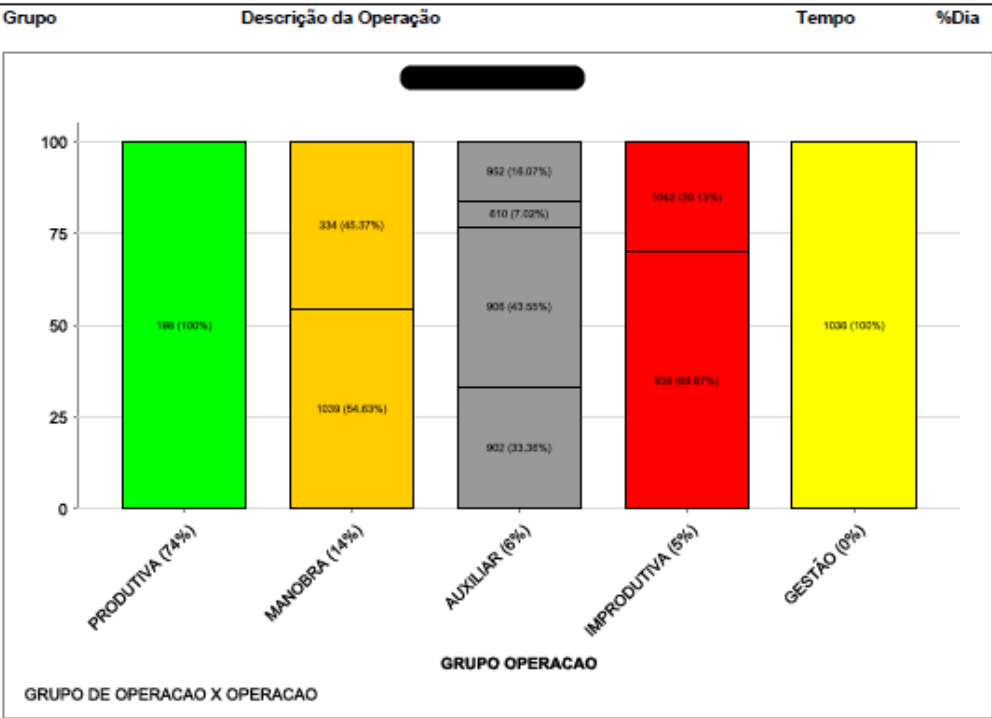
Relatorio Gerencial de Horas

Corporativo/Grupo de Operação

Período: 16/08/2018 até 16/08/2018

Grupo	Descrição da Operação	Tempo	%Dia
PRODUTIVA			
198	Colheita De Cana-Moagem	17:51:18	100.00%
Total de Horas Grupo: PRODUTIVA		17:51:18	74.40%
MANOBRA			
334	Manobra CI	01:32:15	45.37%
1039	Manobra Auxiliar CI	01:51:05	54.63%
Total de Horas Grupo: MANOBRA		03:23:20	14.12%
AUXILIAR			
610	Deslocamento CI	00:06:20	7.02%
902	Abastecimento CI-Tt	00:30:06	33.36%
906	Aguardando Comboio-Combustivel	00:39:18	43.55%
952	Troca De Turno	00:14:30	16.07%
Total de Horas Grupo: AUXILIAR		01:30:14	6.27%
IMPRODUTIVA			
939	Falta De Transbordo	00:47:39	69.87%
1042	Sem Apointamento	00:20:33	30.13%
Total de Horas Grupo: IMPRODUTIVA		01:08:12	4.74%
GESTÃO			
1036	Indeterminado	00:06:56	100.00%
Total de Horas Grupo: GESTÃO		00:06:56	0.48%
Total de Horas Geral:		24:00:00	





Colhedora frota: 623005

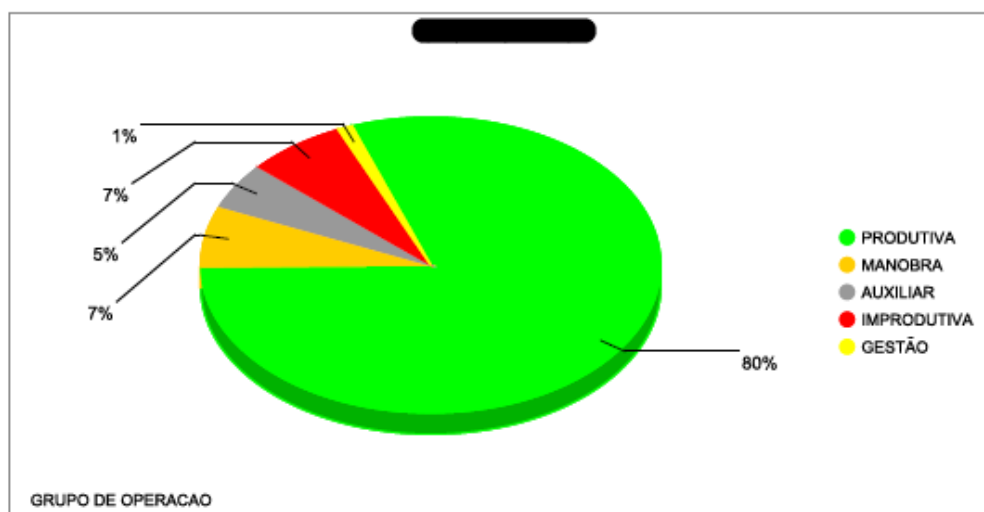


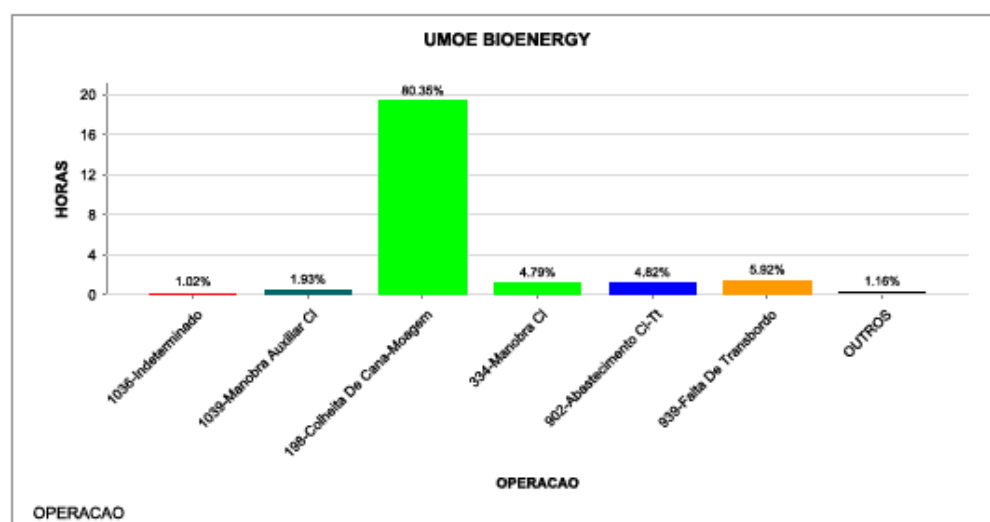
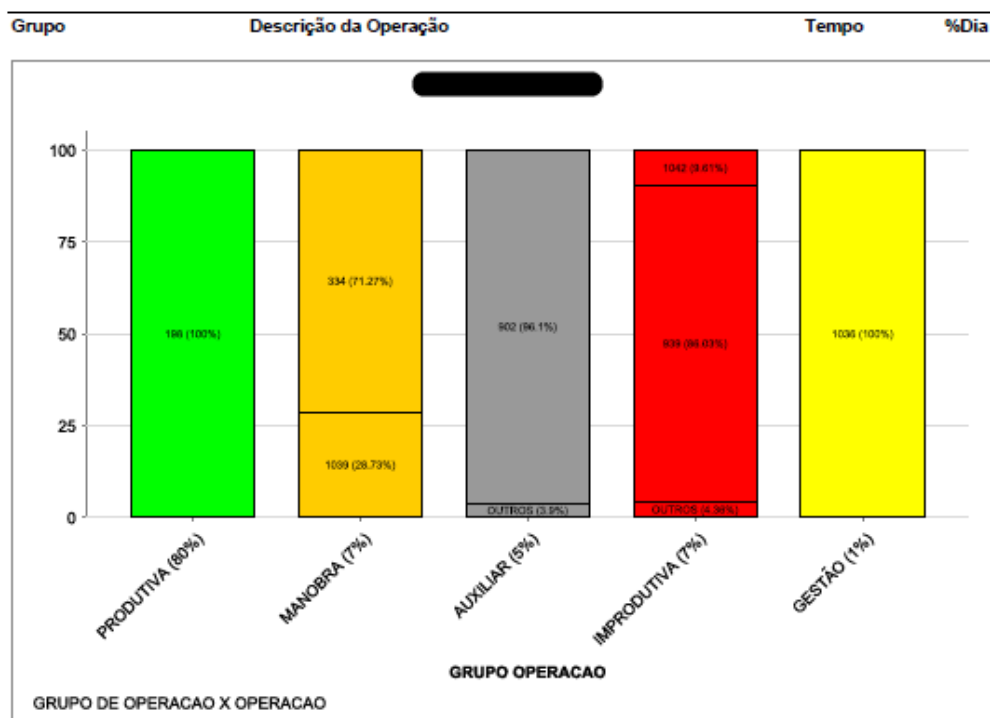
Relatorio Gerencial de Horas

Corporativo/Grupo de Operação

Período: 16/08/2018 até 16/08/2018

Grupo	Descrição da Operação	Tempo	%Dia
PRODUTIVA			
198	Colheita De Cana-Moagem	19:17:06	100.00%
Total de Horas Grupo: PRODUTIVA		19:17:06	80.35%
MANOBRA			
334	Manobra Ci	01:09:01	71.27%
1039	Manobra Auxiliar Ci	00:27:49	28.73%
Total de Horas Grupo: MANOBRA		01:36:50	6.72%
AUXILIAR			
610	Deslocamento Ci	00:02:30	3.46%
902	Abastecimento Ci-Tt	01:09:28	96.10%
952	Troca De Turno	00:00:19	0.44%
Total de Horas Grupo: AUXILIAR		01:12:17	5.02%
IMPRODUTIVA			
939	Falta De Transbordo	01:25:13	86.03%
954	Aguardando Manobra Transbordo	00:04:19	4.36%
1042	Sem Apontamento	00:09:31	9.61%
Total de Horas Grupo: IMPRODUTIVA		01:39:03	6.88%
GESTÃO			
1036	Indeterminado	00:14:44	100.00%
Total de Horas Grupo: GESTÃO		00:14:44	1.02%
Total de Horas Geral:		24:00:00	





Anexo 3

**Tabela 70- Características técnicas implemento de preparo localizado Antoniosi
PSPC 1102 - Figura 116**

Modelo	PSPC 1102
Nº de haste subsoladora	2
Espaçamento entre hastes	1.500 mm
Profundidade de trabalho	até 600 mm
Largura da chapa inferior	400 mm
Largura dos canteiros	600 mm
Sistema de distribuição de corretivo:	Rosca sem fim
Capacidade depósito de corretivo	2.000 Kg
Altura	2.700 mm
Largura	3.220 mm
Comprimento	3.900 mm
Bitola	3.000 mm
Pneus	7.50 x 16
Engate	Hidráulico 3 pontos
Peso aproximado	3.800 Kg
Capacidade do depósito de óleo	200 litros
Potência mínima requerida	220 a 240 cv

Figura 116 – Implemento para preparo localizado PSCP1102



Fonte: ANTONIOSI TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL Ltda.

Tabela 71- Características trator 230 cv

Motor	Unidade	Característica
Nº de cilindros/tipo		4 / turbo com intercooler
Capacidade	l	4.7
Potência nominal	cv	234
Potência máxima	cv	241
Torque máximo	Nm/rpm	965/1.600
Reserva de torque	%	30
Capacidade de tanque	l	410
Transmissão		
FullPowerShift 18x6 com Autoshift Powershuttle		Standart
Tipo bloqueio do diferencial do eixo traseiro		Acionamento eletro-hidráulico
Freio de serviço		Freio de disco em banho de óleo, auto ajustável
Tração nas quatro rodas e direção		
Tipo bloqueio do diferencial do eixo traseiro		Acionamento eletro-hidráulico
Raio de giro mínimo, ajuste da bitola 1.829 mm	m	6,1
Tomada de força		
Tipo		eletro-hidráulico
Padrão/opção de velocidades	rpm	540/1.000
Padrão/opção de rotações do motor	rpm	1.569/1.893
Tipo de eixo		1 3/8" 21 estrias 1 3/8" 6 estrias
Sistema hidráulico		
Fluxo do sistema hidráulico principal	l/min	150
Pressão do sistema	bar	215
Capacidade máxima de elevação	kg	6.894
Nº de válvulas do controle remoto		4
Peso		
Peso máximo admissível lastrado	kg	13.000
Dimensões		
Comprimento total	mm	4.916
Altura total	mm	3.100
Ajuste de bitola dianteira	mm	2.552/2.269
Ajuste de bitola traseira	mm	1.524/2.438

Tabela 72 – Piloto Automático - Figura 117

Componente	Descrição	Referência
Monitor FMX	Display que pode ser usado em qualquer operação de orientação, mapeamento e controle de aplicação. Utiliza sinais RTK (sinal através de base e repetidora) e RTX (sinal através direto do satélite).	Figura 118
AgGPS NavController II	Utiliza dados GPS e sensores internos para enviar instruções precisas para seu sistema de controle de direção.	Figura 119

Antena RTK	Possui alto desempenho multibanda montada em uma única estrutura. Opera nos sinais GPS, GLONASS, SBAS, RTK, OMNISTAR XP HP, VBS, RTX.	Figura 120
Kit antena e base	Base magnética Steelbras Antena RTK Trimble 24253-44 frequência 430-450 Mhz	Figura 121
Auto sense	Utilizado em equipamentos nos quais o piloto automático foi instalado, que não são compatíveis com sensor de roda ou potenciômetro desligado	Figura 122
Base RTK Trimble AgGPS 542	Equipamento é responsável pelo envio de coordenadas georreferenciadas para os equipamentos.	Figura 123
Rádio TDL 450h Trimble	Equipamento responsável em replicar o sinal dos equipamentos que estão mais distantes aonde a base não consegue chegar com o sinal.	Figura 124

Figura 117 – Componentes piloto automático Trimble®



Figura 118 – Monitor FMX Trimble®

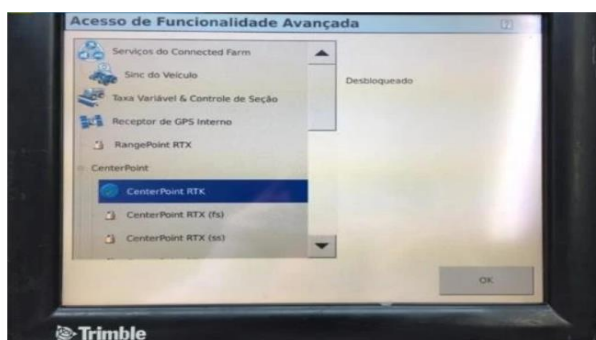


Figura 119 – AgGPS NavController II Trimble®



Figura 120 – Antena RTK Trimble®



Figura 121 – Kit antenna e base RTK Trimble®



Figura 122 – Auto sense Trimble®



Figura 123 – Base RTK Trimble® AgGPS 542.



Figura 124 - Rádio TDL 450h Trimble®



Anexo 4

Tabela 73 – Calendário agrícola

	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro	novembro	dezembro	Total
<i>Dias Totais</i>	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
<i>Aproveitamento Climático</i>	50,0%	55,0%	60,0%	65,0%	75,0%	80,0%	70,0%	65,0%	75,0%	65,0%	55,0%	50,0%	64%
<i>Dias disponíveis</i>	15,50	15,40	18,60	19,50	23,25	24,00	21,70	20,15	22,50	20,15	16,50	15,50	233
Convencional	15,50	15,40	18,60	19,50	23,25	24,00	21,70	20,15	22,50	20,15	16,50	15,50	233
Dessecação	15,50	15,40	18,60	19,50	23,25					20,15	16,50	15,50	144
Eliminação mecânica						24,00	21,70	20,15	22,50				88

Anexo 5

A Tabela 74 representa avaliação hipotética de uma área para definição do IC.

Tabela 74 - Parametrização para definir índice de colheabilidade de uma área hipotética

Índice de colheabilidade	Observação	Nota	Farol
TCH (t/ha)	76,5	1	●
Comprimento de tiro (m)	500,00	1	●
Declividade (%)	5%	1	●
Ocorrência de pedra e tocos	sem ocorrência	1	●
Ocorrência de erosão	sem ocorrência	1	●
Ocorrência de ervas daninhas	alguma infestação	2	●
Nivelamento do terreno	Nivelado	1	●
Tombamento	Alguns colmos tombados	2	●
Nota		10	●

Explorando os conceitos para definição do IC e supondo que uma colhedora tenha capacidade nominal de processar 130 Mg h^{-1} , ao aplicar-se a avaliação apresentada na Tabela 74, obtém-se RCC de $110,50 \text{ Mg h}^{-1}$ - Equação 51. Este valor é devido aos fatores de decréscimo percentual no RN apresentados na Tabela 22, indicando decréscimo 10% em função da ocorrência de alguma infestação de plantas daninhas e de 5% em função de ocorrência de alguns colmos tombados, totalizando-se 15% de decréscimo no RN.

Calculado o RCC, determina-se Vop - Equação 71. Vale ressaltar que caso o valor de Vop exceda os parâmetros estabelecidos na Tabela 21, o último deve ser adotado.

A determinação de RCC apoiara, em conjunto com indicadores operacionais, a determinação de ROC e finalmente custos da operação de colheita mecanizada.

A Nota 10 obtida na Tabela 74, faz menção apenas a soma dos parâmetros e não é utilizada como fator de cálculo do IC ou RC. Neste quesito valores inferiores a 14 demonstram que a área apresenta boa colheabilidade; valores no intervalo de 14 a 19 indicam necessidade de atenção quanto à realização da operação e; valores superiores a 19 indicam que a área requer muita atenção para a realização da operação da colheita mecanizada.

A associação de cores entre notas e farol foi realizada da seguinte forma. Nota 1, associada a cor verde indicando que não há limitações operacionais; nota 2, associada

a cor amarela, indicando que há necessidade de alguma atenção durante a execução da operação e; nota 3 e 4, indicando que há limitações operacionais que requerem atenção durante a execução da operação.