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

**Viabilidade econômica e energética do preparo profundo de solo no cultivo
da cana-de-açúcar**

Daniela Cristina de Oliveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de Concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2017**

Daniela Cristina de Oliveira
Engenheira Agrícola

**Viabilidade econômica e energética do preparo profundo de solo no cultivo da
cana-de-açúcar**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **THIAGO LIBÓRIO ROMANELLI**

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

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Oliveira, Daniela Cristina de

Viabilidade econômica e energética do preparo profundo de solo no cultivo da cana-de-açúcar / Daniela Cristina de Oliveira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

81 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Dimensionamento operacional 2. Custo operacional 3. Demanda energética 4. *Saccharum ssp* l. Título

DEDICATÓRIAS

*Aos meus pais, Benedito (in memorian) e Darci,
À minha irmã, Rafaela e à minha sobrinha, Núbia,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Deus por renovar minhas forças nos momentos difíceis.

Aos meus pais que mesmo com tantas adversidades sempre me apoiaram como puderam.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, pela oportunidade de aperfeiçoamento acadêmico/profissional, infraestrutura e moradia disponibilizados.

Ao meu orientador, professor Dr. Thiago L. Romanelli, pela orientação, agilidade, apoio e amizade.

Aos membros da banca de qualificação professores Dr. Marcos Milan, Dr. Leandro Gimenez e Dr. Mark Spekken pelas críticas construtivas que muito contribuíram para o desenvolvimento do meu trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

À MAFES pelas informações fornecidas e em especial aos engenheiros agrônomos Roberto Takahashi e Cristiano Costa.

À Tecnocana, em especial aos Srs. Paulo Artioli, Rivail Santos, Carlos Stradiotto e aos demais funcionários que gentilmente me auxiliaram.

Aos queridos amigos da “salinha” Diana Vasquez, Leonardo Vargas, Argélio Paniago, João Paulo Veiga, Nelson Franco Jr., Maria Carolina pela amizade e pelos bons momentos vividos que tornaram os dias mais alegres.

Aos queridos amigos da vila PG da ESALQ Laiane, Maria, Tamires, Laís, Yasmin, Leôncio, Cezar, Christopher, Ricardo, Marcos (Tony), Melina, Timóteo, Rony, Aline e Camila pela convivência sempre agradável, companheirismo, almoços coletivos e por todos os bons momentos vividos no período do mestrado.

À grande amiga, irmã, profa. Dra. Michelle Rodrigues que desde a graduação me incentiva com suas palavras e exemplo.

A todos os funcionários da PPGESA, em especial ao Francisco (Chicão), Áureo, Juarez, Fernanda, Davilmar e Ivone, por terem sido sempre muito solícitos.

Aos funcionários da Biblioteca Central “Luiz de Queiroz” por serem tão solícitos e eficientes.

A todos vocês o meu sincero agradecimento e gratidão.

EPÍGRAFE

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

(John F. Kennedy)

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. PREPARO DE SOLO.....	15
2.1.1. Sistema de preparo convencional de solo.....	18
2.1.2. Sistema de preparo profundo do solo	19
2.2. ANÁLISE ECONÔMICA	21
2.3. ASPECTOS ENERGÉTICOS DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR	23
2.3.1. Análise de fluxo de material.....	25
2.3.2. Fluxos de energia na agricultura	26
2.4. MODELOS APLICADOS À MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA	28
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1. MODELO	31
3.2. DIMENSIONAMENTO OPERACIONAL	35
3.3. ANÁLISE ECONÔMICA	38
3.3.1. Custos fixos horários.....	38
3.3.2. Custos variáveis horários.....	39
3.3.3. Custo horário total.....	40
3.3.4. Custo operacional.....	41
3.4. ANÁLISE DE ENERGIA.....	41
3.4.1. Fluxo de materiais	41
3.4.1.1. Depreciação do maquinário	41
3.4.1.2. Combustível	42
3.4.1.3. Mão de obra	42
3.4.2. Energia de Entrada	43
3.4.2.1. Maquinário.....	43
3.4.2.2. Mão-de-obra	43
3.4.2.3. Consumo de combustível	44
3.4.3. Energia de entrada total.....	44
3.4.4. Desempenho energético	45
3.4.4.1. Energia incorporada por produtividade da safra	45
3.4.4.2. Energia incorporada por volume mobilizado	45
3.5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	45
3.6. CENÁRIO BASE	46

3.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1. CENÁRIO BASE.....	51
4.1.1. Dimensionamento operacional.....	51
4.1.2. Análise econômica	53
4.1.2.1. Custos fixos, variáveis e operacionais	53
4.1.3. Análise de energia	59
4.1.3.1. Fluxo de materiais	59
4.1.3.2. Energia de Entrada	60
4.1.3.3. Energia Incorporada	63
4.1.4. Análise de sensibilidade.....	64
4.1.4.1. Custos operacionais.....	64
4.1.4.2. Energia de Entrada	66
5. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS	71

RESUMO

Viabilidade econômica e energética do preparo profundo de solo no cultivo da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é a cultura com finalidade energética mais importante do agronegócio brasileiro, por gerar muitos empregos no setor, representar uma parcela significativa do PIB agropecuário e por ser a fonte renovável de energia com maior participação na matriz energética brasileira. O sucesso de seu cultivo depende, dentre outros fatores, da realização do preparo de solo adequado para fornecer às plantas condições favoráveis de desenvolvimento, particularmente do sistema radicular. Em geral, ele é realizado a cada cinco anos e o custo de implantação do canavial, no qual ele se inclui, é alto, representando em torno de 25% desse custo. Os sistemas de preparo de solo comumente utilizados são o convencional e o reduzido, ambos mecanizados. O primeiro tem como característica práticas intensivas de mobilização do solo em camadas mais rasas, enquanto o segundo é composto por número reduzido de operações e máquinas na área e a mobilização do solo pode ser em camadas rasas ou profundas. A escolha pelo sistema de preparo de solo mais econômico e sustentável é complexa por envolver muitas variáveis. Avaliações econômica e energética têm sido uma alternativa eficiente para analisar sistemas de produção agrícola, pois fornecem indicadores financeiros e ambientais para auxiliar na tomada de decisão na adoção do sistema de preparo. Tendo em vista a importância econômica e energética da cana no cenário nacional, a influência do preparo de solo no desenvolvimento da planta e na composição dos custos operacionais, associados à carência de estudos energéticos que avaliem o sistema mecanizado do preparo profundo do solo, este trabalho teve o objetivo de analisar a viabilidade econômica e energética do sistema de preparo de solo profundo no cultivo da cana-de-açúcar em comparação ao sistema convencional. Para tal foi desenvolvido um modelo em planilha eletrônica que auxiliou na determinação dos indicadores econômicos e energéticos de cada sistema de preparo de solo. Os resultados apontaram que o sistema de preparo profundo do solo é viável do ponto de vista econômico e energético, pois apresentou custo operacional de 401,50 R\$ ha⁻¹ e demanda de energia de 2,63 GJ ha⁻¹, respectivamente, 30% e 40% inferiores, ao sistema convencional. A análise de sensibilidade evidenciou que a capacidade de campo operacional, a potência do trator e o consumo de combustível foram os fatores de maior impacto na variação dos custos operacionais e na demanda de energia de entrada.

Palavras-chave: Dimensionamento operacional; Fluxo de materiais; Demanda energética; *Saccharum spp*

ABSTRACT

Economic and energy viability of deep tillage in sugarcane cultivation

Sugarcane is the most of important energy crop for Brazilian agribusiness, since it propitiates many jobs, it represents a significant share of agricultural GDP and it is the renewable source of energy of higher contribution to the energy matrix. The success of its cropping depends, among other factors, of the appropriate tillage system to provide the plants favorable development conditions, particularly to the root system. Generally, it is carried out on every five years and it accounts around 25% of cropping cost. Soil tillage systems usually adopted are conventional and reduced, both mechanized. The conventional system consists of several operations in the superficial layers, while the reduced one uses less operations and soil mobilization can be in shallow or deep layers. In this latter category, the system of deep soil tillage is included if it is carried out in rows of planting. Economic and sustainable soil preparation system is complex because it involves many variables. Economic and energy assessments have been an efficient alternative to analyze agricultural production systems because it provides financial and environmental indicators for decision making on system adoption. Considering the economic and energy importance of sugarcane in the national scenario, the influence of soil preparation on the development of the plant and the composition of the operational costs, associated to the lack of energy studies that evaluate the mechanized system of deep soil preparation, this study aimed to analyze the economic and energy viability of the deep soil preparation system in sugarcane cultivation compared to the conventional system. For this purpose, a model was developed which assisted in the determination of the economic and energy indicators of each soil preparation system. The results showed that the deep soil preparation system is feasible from an economic and energy point of view, since it presented operational cost of 401.50 R\$ ha⁻¹ and energy demand of 2.63 GJ ha⁻¹, respectively, 30% and 40% below the conventional system. Sensitivity analysis showed that the operational field capacity, the power of the tractor, the fuel consumption were the factors presented greater relevance in the variation of operating costs and the demand for input energy.

Keywords: Operational sizing; Material flow; Energy demand; *Saccharum spp*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Exemplo de máquina utilizada no preparo profundo do solo; (b) Esquema do perfil do solo com preparo profundo do solo em faixa. Fonte: Revista Opiniões (2013).....	19
Figura 2. Fluxograma das operações mecanizadas de cada sistema de preparo de solo.....	31
Figura 3. Fluxograma para dimensionamento operacional e econômico de sistemas mecanizados agrícolas. Fonte: Milan (2004).	32
Figura 4. Fluxograma de energia, adaptado de Romanelli (2007).....	34
Figura 5. Custos horários de cada sistema de preparo de solo.....	53
Figura 6. Percentual de participação dos componentes do custo fixo de cada sistema de preparo de solo.	54
Figura 7. Componentes do custo variável horário de cada sistema de preparo de solo.....	54
Figura 8. Custo operacional total e por operação de sistema de preparo convencional do solo.	55
Figura 9. Variação do custo operacional em função da variação da velocidade e eficiência de campo.	56
Figura 10. Custo operacional dos dois sistemas de preparo de solo avaliados.....	57
Figura 11. Demanda de energia de entrada dos sistemas de preparo de solo	62
Figura 12. Composição da energia total de entrada, (a) preparo convencional, (b) preparo profundo.	63
Figura 13. Parâmetros com influência no custo operacional (COP) dos sistemas de preparo de solo avaliados.....	64
Figura 14. Parâmetros que influenciam na demanda de energia de entrada nos sistemas de preparo de solo avaliados	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Oferta interna de energia por tipo de fonte no Brasil em 2016.	24
Tabela 2. Estimativa de dias úteis para operações agrícolas para a cidade de Piracicaba, SP, para dois tipos de solo: arenoso e argiloso (adaptada de Moretti Filho, 1960)	36
Tabela 3. Índices de energia utilizados na conversão do fluxo de materiais em energia	43
Tabela 4. Equipamentos considerados nos sistemas de preparo de solo analisados	47
Tabela 5. Modelo - Entrada de valores.....	50
Tabela 6. Resultados do cenário base obtidos com o modelo	52
Tabela 7. Custos horário, operacional e capacidade de campo operacional de cada operação agrícola do preparo convencional.....	55
Tabela 8. Número de horas trabalhadas, distância percorrida, volume mobilizado na área do cenário base por conjunto mecanizado.....	58
Tabela 9. Fluxo de materiais por unidade de área	60
Tabela 10. Valores de energia de entrada dos sistemas de preparo de solo avaliados.	61
Tabela 11. Indicadores de intensidade de energia em cada sistema de preparo de solo	63

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*) tem ciclo de vida médio de 5 anos e é a cultura com finalidade energética de maior importância no cenário do agronegócio brasileiro e no estado de São Paulo por gerar muitos empregos no setor, representar uma parcela significativa do PIB (Produto Interno Bruto) agropecuário do país e do estado e por ser considerada uma fonte renovável de energia de grande potencial. É uma cultura com alto custo de implantação e seu sucesso depende, dentre outros fatores, do preparo adequado do solo. Após a implantação do canavial, a correção de falhas dessa etapa, deixa de ser possível. Além de afetar o desenvolvimento fisiológico da cultura, o preparo de solo tem participação expressiva na composição do custo de implantação do canavial, em torno de 25%, e operações desnecessárias e uso excessivo de máquinas contribuem diretamente na elevação desse custo.

O preparo do solo é a etapa que antecede a implantação da cultura e é realizado por meio de operações agrícolas que podem ser manuais, semi ou totalmente mecanizadas. Entre os sistemas de preparo de solo existentes estão o convencional e o reduzido. O primeiro tem como característica a prática intensiva de mobilização das camadas superficiais do solo executada por um conjunto de operações agrícolas mecanizadas para esse fim; o segundo consiste na mobilização de camadas rasas ou profundas do solo, entretanto com o número reduzido de operações e máquinas. É nessa categoria que o sistema de preparo profundo pode ser incluso, pois nele a mobilização do solo é profunda e canteirizada, abrangendo exclusivamente o espaço reservado às linhas de plantio.

O preparo de solo afeta as propriedades físicas do solo e tem a função de criar um ambiente favorável ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, fornecendo condições ideais para seu crescimento, de modo a facilitar absorção de água, nutrientes e trocas gasosas.

Em grandes extensões de área, as operações de preparo de solo, para o cultivo da cana-de-açúcar, são totalmente mecanizadas. A utilização de máquinas proporcionou o aumento da capacidade de trabalho por unidade de tempo e, em contrapartida, elevou a dependência de combustíveis fósseis, derivados do petróleo, na produção agrícola. Contribuiu para a necessidade de planejamento de sistemas que fossem mais eficientes, econômicos e sustentáveis. Análises econômicas e energéticas são uma alternativa eficiente para auxiliar na seleção de sistemas de preparo de solo que reúnam essas características.

Análises econômicas de sistemas produtivos agrícolas são, comumente, realizadas por meio de determinação dos custos operacionais, pois eles representam o custo monetário do referido sistema por unidade de área.

Análise econômica associada à análise de energia de sistemas de produção tornaram-se comuns e vantajosas, pois fornecem parâmetros financeiros e de sustentabilidade que auxiliam na tomada de decisão. Com base nesse fundamento o objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade econômica e energética do sistema de preparo de solo profundo no cultivo da cana-de-açúcar em comparação ao sistema de preparo convencional a partir da elaboração de um modelo.

A hipótese considerada neste trabalho foi a de que, no cultivo da cana-de-açúcar, o sistema de preparo reduzido na modalidade de preparo profundo de solo seria mais eficiente, em termos financeiros e energéticos, do que sistema convencional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e a produção canavieira na safra 2016/2017 alcançou 657 milhões de toneladas, colhidas em 9 milhões de hectares. Desse total de cana colhido foram produzidos 38,7 milhões de toneladas de açúcar e 27,8 bilhões de litros de etanol. No estado de São Paulo, a cana-de-açúcar é o principal produto da agropecuária responsável por 52,7% do total da produção brasileira e é considerada uma das principais alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos (CONAB, 2017a).

De acordo com dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2016) a cana-de-açúcar contribuiu com R\$ 164,2 bilhões na composição do PIB agropecuário nacional, representando 56% do total e o setor sucroenergético foi responsável pela geração de 613 mil postos de trabalho no ano de 2016.

2.1. Preparo de solo

O preparo de solo é a prática de mobilização do solo por meio de operações agrícolas manuais, mecanizadas ou semi-mecanizadas, as quais atuam diretamente na estrutura física do solo, modificando-a, de modo que aspectos químicos do solo e ambiente sejam também indiretamente afetados (FREITAS, 1987; VIEIRA e KLEIN, 2007).

Em áreas onde havia outra cobertura vegetal ou com muita irregularidade topográfica é necessário realizar um preparo inicial do terreno que constitui-se de operações de limpeza da área como desmatamento e retiradas de tocos anteriormente à mobilização do solo (FREITAS, 1987; SILVEIRA, 1989). O objetivo do preparo de solo é proporcionar condições adequadas de desenvolvimento às plantas, facilitando a absorção de água e nutrientes pelo seu sistema radicular (FREITAS, 1987; VIEIRA e KLEIN, 2007).

No cultivo da cana-de-açúcar, o manejo inicial do solo assume papel fundamental quanto ao desenvolvimento da planta, visto que um preparo de solo inadequado, executado fora das recomendações agronômicas estabelecidas, compromete totalmente o processo de sulcação e as operações agrícolas subsequentes, prejudicando o desenvolvimento satisfatório da cultura e a longevidade das soqueiras¹, além de elevar os custos de produção (FREITAS, 1987; BARROS e MILAN, 2010). Os efeitos indesejados têm sido evidenciados em diversos

¹ Refere-se à rebrota da cana-de-açúcar após o primeiro corte.

estudos, como em Bangita e Rao (2012) e Souza et al (2014), nos quais demonstraram-se que solos com qualidade física degradada resultaram em redução da capacidade de absorção de água e nutrientes pela cana, implicando na sua diminuição da produtividade.

Com condições favoráveis no solo para o desenvolvimento da cana planta², maior será a possibilidade de desenvolvimento adequado das soqueiras. Portanto, o preparo do solo é a constituição do “berço” do canavial e o que não for corrigido durante essa etapa, dificilmente será possível corrigir nas operações de manejo das soqueiras (VASCONCELOS, 2007).

As operações agrícolas, bem como o tráfego de máquinas, alteram a estrutura física dos solos. Essas atividades tornam-se prejudiciais quando há degradação da qualidade do solo, cujo principal atributo indicador é a configuração dos agregados do solo (REICHERT et al., 2003). O uso frequente de máquinas nas operações agrícolas é reconhecidamente o principal agente causador da compactação do solo (ETANA et al., 2012), devido ao aumento de sua densidade e resistência à penetração (BANGITA e RAO, 2012; BAQUERO et al., 2012; SOUZA et al., 2014; SOUZA et al., 2015), provocados pela sua diminuição da porosidade e da aeração, prejudicando o crescimento do sistema radicular da planta (OTTO et al., 2011; BAQUERO et al., 2012; SOUZA et al., 2014; SOUZA et al., 2015). O adensamento do solo é potencializado quando as operações são realizadas em condição inadequada de umidade do solo (SECCO et al., 2004; ETANA et al., 2012).

Baquero et al. (2012) verificaram que a macroporosidade média de três cortes (1º, 3º e 5º) de uma área cultivada com cana-de-açúcar apresentou o valor $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor mínimo inferior ao necessário para o desenvolvimento da maioria das plantas ($>0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) indicando que o solo sofreu adensamento de poros devido ao tráfego constante de máquinas na área. Tal conclusão foi reafirmada após medir a macroporosidade de uma área com vegetação nativa que apresentou um valor de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Constataram também que densidade de raízes foi 77% superior nos primeiros 0,10 m do que na camada de 0,10-0,40 m do solo na área com cultivo de cana. O autor concluiu que as práticas de manejo e gestão da área promovem mudanças na resistência à penetração, na densidade e na porosidade aparente quando comparada a floresta nativa.

Souza (2014) e Souza (2015) avaliaram três tipos de sistemas de gestão da área: (1) sem controle de tráfego; (2) com controle de tráfego por meio de ajustes da largura das entrelinhas, do trator e do reboque e (3) idem a (2) associado à utilização de direcionamento

² Denominação atribuída à cana-de-açúcar até sua primeira colheita, havendo um período de crescimento em torno de 12 ou 18 meses, dependendo da época de plantio.

automático. Verificaram que a resistência à penetração do solo na linha da planta foi inferior a 2 MPa em (2) e (3), houve aumento de superfície e volume da raiz em (2) e (3), com maior produtividade do que sob o sistema de gestão (1).

Otto et al (2011) analisaram a distribuição de raízes e a qualidade física do solo em uma área com colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Verificaram que nas camadas 0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m os valores de densidade e resistência foram maiores para as camadas próximas à superfície nas entrelinhas.

Para minimizar esses efeitos nocivos ao solo, ocasionados pelo tráfego intenso de máquinas no campo, tem-se como alternativa mecanizar racionalmente as operações agrícolas, utilizando os equipamentos de forma mais eficiente de modo que haja aumento de produtividade, melhoria da qualidade dos produtos agrícolas, redução de custos (MIALHE, 1974; SILVEIRA, 1989) e diminuição de impactos ambientais negativos. Para isso, em muitos casos, tem-se utilizado cultivos reduzidos associados ao controle de tráfego na área.

Em condições de tráfego controlado no cultivo reduzido, o preparo de solo é realizado somente nas linhas de crescimento da planta, para remoção de restos da cultura anterior e para a preparação de leito de semeadura para o próximo plantio de cana-de-açúcar, a área de tráfego dos rodados fica praticamente intocada (PARK et al., 2010). No entanto, Bangita e Rao (2012) mostraram em seu estudo que realizar a mobilização do solo nas faixas de tráfego do maquinário, a cada 03 ou 04 ciclos da cultura, diminuiu a resistência à penetração nas linhas de plantio de cana em 29% e proporcionou melhoria nas taxas de infiltração de água nas linhas com plantio de cana. Como consequência obteve-se aumento da umidade subsuperficial da camada agricultável (0–0,30 m), demonstrando ser uma alternativa interessante, pois promove melhoria nas propriedades físicas do solo e contribui para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar.

Além de influenciar no desenvolvimento da cultura, o preparo de solo assume papel significativo na composição do custo de produção de qualquer cultura. No sistema produtivo da cana-de-açúcar, por exemplo, a etapa de preparo de solo, representa cerca de 25% do custo de formação do canavial (PECEGE, 2014). O custo de preparo de solo é devido à taxa de utilização de maquinário, mão-de-obra e outros insumos na área e pode tornar-se mais ou menos expressivo de acordo com o planejamento operacional e econômico associados a fatores fora de controle como riscos climáticos.

Com a diversidade de solos, clima, culturas e máquinas do Brasil vários tipos de preparo de solo podem ser utilizados (SILVEIRA, 1989), tornando a escolha por um sistema mais adequado uma tarefa complexa.

2.1.1. Sistema de preparo convencional de solo

O preparo convencional é um sistema que envolve o preparo intensivo do solo com uso de arados, grades e subsoladores e é utilizado nas culturas com importância econômica em todo o mundo. Ele é caracterizado pela mobilização da camada agricultável do solo (0,30 m de profundidade), como explica Andrade et al (2009), podendo alcançar camadas mais profundas, 0,40 - 0,50 m, no perfil dependendo da condição física do solo e do implemento utilizado. O objetivo é promover a descompactação dessas camadas, incorporar corretivos e fertilizantes, aumentar os espaços porosos e, com isso, elevar a permeabilidade e o armazenamento de água e ar (SANTIAGO e ROSSETTO, 2007). Essa prática favorece o aumento da possibilidade de translocação de argila no perfil, a oxidação da matéria orgânica, a compactação das camadas imediatamente inferiores às que foram mobilizadas e erosões (ANDRADE et al., 2009).

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. Como resultado, as camadas mais profundas do solo tornam-se mais densas reduzindo a taxa de infiltração água (LITHOURGIDIS et al., 2009).

O preparo convencional do solo pode assumir diversas combinações de operações agrícolas havendo variações de acordo com o tipo, textura e condição do solo da região. Em uma dessas combinações o preparo do solo é composto por aração, gradagem e subsolagem (AZEVEDO, 2008) e pode ser dividido em duas etapas: preparo primário e secundário. O preparo primário é realizado com arados ou grades pesadas, por ser uma operação com a finalidade de fragmentação do solo em torrões grandes, de incorporação de corretivos, fertilizantes, resíduos vegetais ou para a descompactação superficial. O preparo secundário, consiste na operação de desestruturação dos torrões em agregados de solos menores e de nivelamento da camada arada de solo por meio de gradagens na área (ALVARENGA et al., 2002).

Caso seja identificada compactação abaixo da camada arada, o preparo do solo deverá contar com a operação de subsolagem (para camadas compactadas entre 0,25 e 0,50 m de profundidade) ou pode-se optar pela utilização do arado de aivecas se a camada estiver a menos de 0,40 m de profundidade (SANTIAGO e ROSSETTO, 2007). Os autores alertam que no cultivo de cana-de-açúcar deve-se considerar duas situações distintas antes do preparo do solo:

- (i) cana implantada pela primeira vez: neste caso, é necessário que os restos da cultura anterior sejam destruídos para serem incorporados e decompostos no solo. Para isso poderá ser realizada uma aração profunda seguida de gradagem antes do plantio.
- (ii) área já ocupada com cana: as soqueiras deverão ser destruídas logo após a colheita e essa operação pode ser executada por meio de aração rasa – 0,15 a 0,20 m - nas linhas de plantio da cana, seguida de gradagem intermediária ou pesada, enxada rotativa ou utilizando herbicida.

A utilização recorrente e anual de grades pesadas para o revolvimento intensivo do solo tem sido associada à redução do potencial produtivo dos solos cultivados e consequente declínio da produtividade, comprometendo assim a sustentabilidade e a longevidade da atividade agrícola (PAIVA, 2011).

2.1.2. Sistema de preparo profundo do solo

O sistema de preparo profundo do solo consiste na mobilização de camadas com profundidade maior que 0,50 m no perfil do solo. Para tal finalidade utilizam-se máquinas e implementos de ação profunda e, em alguns casos, de ação localizada (BISHOP e GRIMES, 1978; SOJKA et al., 1993) e tráfego dirigido (YOUNG et al., 1993). A correção física do solo é realizada por meio da descompactação dessas camadas, as quais foram geradas pelo longo período de utilização do preparo intensivo do solo (LABUSCHAGNE e JOUBERT, 2006). Na figura 1(a) há um exemplo de máquina destinada ao preparo profundo.

Figura 1. (a) Exemplo de máquina utilizada no preparo profundo do solo; (b) Esquema do perfil do solo com preparo profundo do solo em faixa. Fonte: Revista Opiniões (2013)

Durante o preparo do solo é interessante que as operações agrícolas mecanizadas promovam o mínimo movimento do solo e que o tráfego de máquinas na área seja reduzido com o intuito de minimizar a degradação do solo e custos. No cultivo da cana-de-açúcar o preparo profundo do solo pode atender esses aspectos, por ser, normalmente, realizado de forma localizada, originando a “canteirização” do canavial (figura 1b). Neste caso, tem-se um cultivo mínimo realizado em faixas. A técnica de preparo profundo do solo pode apresentar diversas variações diferindo quanto ao tipo de máquina utilizada, operações executadas e profundidades. Um exemplo dessas variações são as operações combinadas de subsolagem, destorroamento, correção e adubação do solo sobre as linhas onde serão implantados os canaviais, mantendo as entrelinhas sem revolvimento de solo, destinando-as ao tráfego de máquinas (ROSSETTO et al., 2008). A restrição do local de passagem dos pneus das máquinas configura-se indiretamente como controle de tráfego já que este tem como princípio concentrar a passagem dos pneus em linhas fixas dividindo regiões de tráfego das de crescimento das plantas, reduzindo a área com tráfego agrícola e evitando a compactação nas linhas de plantio ocasionada pela pressão exercida pelos pneus do maquinário agrícola (KINGWELL e FUCHSBICHLER, 2011).

Alamouti e Navabzadeh (2007) constataram em seu estudo que a utilização do sistema de preparo profundo do solo ofereceu maior efeito sobre sua densidade, o carbono orgânico, a taxa de infiltração de água e a produção de culturas em comparação com os sistemas de cultivo “semi profundos”³ e rasos. Os autores concluíram que a densidade do solo foi reduzida, a taxa de infiltração e a produtividade das culturas aumentaram com o aumento da profundidade mobilizada.

Tomaz (2013) teve entre seus objetivos verificar se o sistema de preparo profundo do solo no cultivo da cana-de-açúcar proporcionaria maior volume de solo explorado pelas raízes, se a condição de tráfego controlado de máquinas na área associado ao espaçamento duplo alternado traria incrementos de produtividade e se ocorreria a redução de custos para o produtor quando comparado ao sistema de preparo convencional. O autor verificou que no preparo profundo o comprimento, a área e o volume das raízes foram superiores estatisticamente. Nas avaliações biométricas foi constatado que o índice de área foliar, IAF, das plantas cultivas no preparo profundo foi de 7,1 além de verificar que a resistência do solo à penetração nesse sistema foi de 0,29 MPa e 0,45 MPa, nas profundidades de 0,20-0,40 e 0,40-0,60m, respectivamente.

³ Realizados na camada de 0-0,50m de profundidade.

Marasca (2014) avaliou o comportamento de dois atributos físicos do solo, resistência à penetração e densidade relativa, em duas áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Uma das áreas foi utilizando o preparo profundo canteirizado e a outra o preparo convencional. Para ambos os tratamentos de preparo do solo, a densidade relativa apresentou valores aceitáveis para a camada de 0 a 0,15 m. No entanto, na área com preparo convencional, as camadas de 0,15-0,30 m e 0,30-0,45 m apresentaram valores prejudiciais ao desenvolvimento da cultura. Com relação aos manejos, um dos critérios avaliados foi a produtividade da cana-de-açúcar, entretanto os dados obtidos foram insuficientes para se identificar diferença em produtividade de cana-de-açúcar nos tratamentos analisados devido a ter-se avaliado apenas um ciclo (ou um corte).

Lima (2016) comparou o sistema de preparo profundo canteirizado do solo com o preparo convencional no cultivo da cana-de-açúcar objetivando identificar quais os reflexos desses sistemas na distribuição do sistema radicular e nos atributos físicos e mecânicos do solo. O estudo apontou que houve melhoria na qualidade física do solo com o sistema de preparo profundo, observando-se redução de densidade, aumento da porosidade total e macroporosidade, além da diminuição da resistência do solo à penetração das raízes fatores que contribuíram para o maior crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar. No sistema convencional houve redução da qualidade física do solo devido ao tráfego de máquinas sobre o solo mobilizado durante as operações de preparo resultando em limitações ao crescimento das raízes abaixo da camada 0,0-0,20 m, refletindo em uma queda de produtividade da cultura de 23%.

2.2. Análise econômica

O desempenho econômico de conjuntos mecanizados utilizados na execução de operações de preparo do solo bem como em outras operações agrícolas envolve a contabilidade dos custos direto, indireto e o operacional. Os custos diretos são aqueles associados à posse e ao uso, os indiretos são aqueles devidos a um sub ou superdimensionamento e o operacional está relacionado à capacidade de trabalho do conjunto ou máquina, como salientado por Milan e Rosa (2015). Os mesmos autores alertam que a mão de obra do operador pode ser incorporada ao custo direto de duas formas: (i) se o operador tem como função exclusiva a operação do conjunto/máquina, o custo incide integralmente para a máquina; (ii) se ele exerce outras atividades poderá haver divisão proporcional do tempo gasto na máquina e na outra atividade.

O custo direto, também denominado custo horário, é tradicionalmente dividido em custos fixos e variáveis. Os custos fixos independem do uso da máquina e está associado ao tempo de permanência do equipamento na propriedade e abrangem depreciação, juros, alojamento, seguro e taxas. No entanto, é importante frisar que a depreciação mesmo que classificada como custo fixo, pode sofrer alteração no componente desgaste de acordo com a intensidade de utilização do bem, o que alterará o valor final do mesmo.

Segundo Cosentino (2004) a depreciação pode ser determinada por diversos métodos: linear, exponencial, da soma dos dígitos, da soma da taxa constante e por quotas proporcionais às horas de trabalho. Os juros são determinados em função do valor de aquisição da máquina e da taxa de juros vigente no mercado. Turra (1990), ao pesquisar métodos de cálculo de custos de produção, verificou que em 33 instituições analisadas todas utilizavam o método de depreciação linear. As justificativas seriam a facilidade de cálculo da equação e por ser o método oficial adotado para o cálculo de imposto de renda.

Quanto ao custo variável, ele está vinculado ao uso e reflete os dispêndios com combustível e com reparo e manutenção dos equipamentos (WITNEY, 1988; ASABE, 2011). O custo variável é contabilizado quando a máquina encontra-se em operação no campo ou se estiver parada para manutenção e pode ser influenciado por diversos fatores: características topográficas do terreno, habilidade do operador, manutenção e regulagem da máquina, por exemplo. Witney (1988) esclarece que o consumo de combustível de um trator pode variar entre as operações e dentro da operação como é o caso da diferença de consumo observada entre a máquina em operação e em manobra. A eficiência de um motor varia com a carga imposta e atinge nível máximo com aproximadamente 90% da carga.

De acordo com Rosa e Silva (2015) na composição dos custos os elementos de maior impacto são o maquinário agrícola e os insumos (combustível, fertilizantes, corretivos e a mão de obra), os quais são passíveis de melhoria na sua eficiência de utilização por meio de planejamento operacional adequado associado a um manejo eficiente da área. Segundo Hunt (1995), a escolha das máquinas, muitas vezes, é realizada pela propaganda dos fabricantes e seus revendedores e não com base técnica o que a torna a escolha ineficiente, podendo incidir em prejuízos.

O custo operacional (COP) é definido por Milan (2004) como a relação entre custo horário total e a capacidade de campo operacional (CcO) do equipamento e representa o dispêndio monetário da maquinaria por área. A capacidade de campo operacional ou capacidade de trabalho das máquinas agrícolas sofre variação em função da velocidade de deslocamento da máquina, da largura de trabalho, da porcentagem de tempo parada devido a

reparo e manutenção, manobras e outros fatores que podem surgir ao longo do processo que definem a eficiência de campo (SILVEIRA et al., 2006). O conhecimento do COP é uma importante ferramenta para tomada de decisão quanto à escolha de equipamentos e ao sistema de preparo a ser adotado (MILAN e MOLIN, 2002), pois mostram ao produtor se custo despendido e a capacidade de trabalho são viáveis economicamente e se estão em conformidade com o tempo disponível para execução do trabalho.

Tomaz (2013) avaliou três tratamentos nos quais foram utilizados os sistemas de preparo de solo convencional, preparo mínimo e o profundo, com espaçamentos duplos alternados (0,9 x 1,5 m) e simples (1,5 x 1,5 m). O autor verificou que os custos das operações no momento do plantio foram inferiores no preparo profundo, sendo 33% e 58% inferiores ao mínimo duplo e convencional duplo, respectivamente. Constatou também que a movimentação do solo no sistema de preparo profundo foi 80% inferior ao tratamento convencional duplo e demonstrou que o tráfego controlado proporcionado pelo preparo profundo, diminuiu em até 70% o tráfego de máquinas na lavoura, diminuiu o consumo de combustível, reduziu o tempo das operações agrícolas e o parque de máquinas, com menor custo operacional.

Sitta e Milan (2014) realizaram um estudo com o objetivo de verificar a viabilidade econômica do emprego do sistema de preparo profundo do solo utilizando um equipamento com operações agrícolas combinadas e atuação canteirizada e compararam seus custos operacionais aos custos do sistema de preparo convencional. Verificaram que o custo operacional do preparo profundo apresentou uma redução de até 40% em relação ao convencional. Os autores apuraram nesse estudo, também, que o aumento da área tem efeito direto nos custos fixos, mostrando que os mesmos podem ser diluídos até um determinado limite.

2.3. Aspectos energéticos da produção de biomassa da cana-de-açúcar

Energia é o alicerce da vida e está presente no sol, nas plantas, nos alimentos, nos animais, nas máquinas e no ser humano. Para realizar qualquer atividade são necessárias uma ou mais fontes de energia, tornando-as elementos fundamentais para o desenvolvimento humano de forma global (VECCHIA, 2010).

As fontes de energia são classificadas em dois grupos: fontes renováveis, aquelas com recursos que se regeneram mantendo a produção e disponibilização de energia continuamente em escala humana de tempo; e fontes não renováveis de energia são aquelas

que se encontram em quantidade finita na natureza ou se regeneram em escala geológica de tempo (ASSIREU et al., 2015).

Em 2016, a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo (43,5%), sendo a biomassa da cana-de-açúcar responsável por 17,4% desse percentual, como apresentado na tabela 1 (EPE, 2017).

Tabela 1. Oferta interna de energia por tipo de fonte no Brasil em 2016.

Tipo de fonte	Oferta Interna Brasil 2016	
	Unidade	
Renovável	10 ⁶ GJ	%
Energia hidráulica ¹	1519,88	12,59
Biomassa de cana	2106,06	17,45
Lenha e carvão vegetal	967,20	8,01
Eólica	121,42	1,01
Solar	0,29	0,00
Lixívia e outras renováveis	535,94	4,44
Total	5246,31	43,46
Não Renovável	10 ⁶ GJ	%
Petróleo e derivados	4413,10	36,56
Gás natural	1490,57	12,35
Carvão mineral	665,73	5,52
Urânio (U3O8)	175,85	1,46
Outras não renováveis	79,55	0,66
Total	6824,81	56,54
Total geral	12071,12	100,00

¹Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica.

Adaptado do Balanço Energético Nacional 2017, Fonte: EPE, 2017

A biomassa e os biocombustíveis obtidos a partir de diferentes processos de conversão das diversas culturas energéticas são alternativas comuns às fontes de energia não renováveis e nesses processos é essencial levar em consideração a sustentabilidade do solo (LAL e BRUCE, 1999).

A agricultura é um importante consumidor e fornecedor de energia na forma de bioenergia. Nas práticas agrícolas atuais, o preparo do solo destaca-se como grande consumidor de energia devido à intensiva mecanização das operações, mão-de-obra necessária e insumos utilizados. Portanto, a seleção de um sistema de preparo de solo adequado pode reduzir custos de produção como resultado do melhor uso de energia (HAMZEI e SEYYEDI, 2016). A melhoria no uso energético além de beneficiar a

competitividade, ao proporcionar redução de custos, resulta em menor degradação ambiental graças ao seu uso minimizado, contribuindo positivamente para o desenvolvimento sustentável (OZKAN et al., 2004).

A crescente utilização de máquinas e implementos nas operações agrícolas, com o objetivo de aumento de produtividade do trabalho no campo, incorreu na substituição da energia humana pela energia fóssil, cujo principal representante da categoria é o petróleo, utilizado nas formas de combustível, lubrificantes e pneus. Nesse cenário é interessante investigar não só a eficiência econômica dos processos de produção agrícola, mas também a eficiência energética disponibilizando uma avaliação em conjunto e comparativa, que pode ser denominada de análise econômica-energética. Fatores econômicos, ambientais, disponibilidade finita das fontes fósseis e eficiência energética tornaram obrigatória a busca por fontes alternativas renováveis de energia para auxiliar ou mesmo atender totalmente a demanda mundial. Nesse contexto, a cana-de-açúcar é aceita como alternativa viável, renovável e limpa (VIEIRA, 2007).

2.3.1. Análise de fluxo de material

Um sistema socioeconômico e seu ambiente estão inter-relacionados por meio de fluxos de materiais e energéticos. O consumo de materiais provenientes do ambiente é um pré-requisito necessário para a produção de bens e serviços e para a manutenção e melhoria do nível de vida. De acordo com as leis da termodinâmica, todos os materiais consumidos serão transformados e seus resíduos liberados de volta para o ambiente (KANIANSKA et al., 2011)

Para mensurar a intensidade de materiais utilizados e resíduos liberados para o meio ambiente tem se utilizado como ferramenta a análise de fluxo de material (AFM). A AFM é um procedimento quantitativo de medição de fluxo de entradas e saídas de materiais/ insumos utilizados no processo ou sistema de produção e é empregado também para identificar a intensidade do consumo de recursos naturais com base no princípio do balanço de massa (HOQUE et al., 2012; FRÖHLING et al., 2013). O material incorporado nos sistemas de produção agrícola reflete a convergência dos insumos, apontando, indiretamente, os recursos naturais utilizados. Em se tratando de operações agrícolas há dois tipos de convergência de materiais: insumos diretos e indiretos. Insumos diretos são os fertilizantes, sementes, mudas, enquanto que os indiretos abrangem maquinário, trabalho, sistemas de irrigação e combustíveis (ROMANELLI e MILAN, 2010a). De acordo com os autores, a análise de fluxo

de materiais é o ponto inicial para qualquer análise ambiental (ciclo de vida, energética, pegada hídrica) e econômica.

2.3.2. Fluxos de energia na agricultura

Estudos sobre o uso da energia na produção agrícola tornaram-se relevantes desde que os preços dos insumos, particularmente os combustíveis e os fertilizantes, aumentaram drasticamente como resultado da primeira crise do petróleo em 1973. Esses estudos abrangem dois objetivos: redução da dependência do petróleo substituindo energias não renováveis por energias renováveis e o desenvolvimento de estratégias destinadas a melhorar a eficiência energética na produção de todo o tipo de produto e serviço (PIMENTEL et al., 1973).

As avaliações energéticas permitem estimar a energia diretamente consumida e/ou indiretamente utilizada em um processo produtivo. Deste modo é possível determinar a dependência ou não de fontes não renováveis de energia, que podem constituir-se como fator limitante no processo de produção agrícola (SALLA et al., 2009). Ter conhecimento da quantidade de energia gasta ou absorvida em um determinado sistema ou operação possibilita também a identificação das etapas ou equipamentos que devem ser repensados do ponto de vista sustentável e econômico.

Para Biaggioni e Bovolenta (2010), estudos energéticos refletem a necessidade de buscar alternativas que possibilitem uso racional dos recursos naturais não renováveis, principalmente do óleo diesel.

Na produção agrícola uma das estratégias de redução do uso de energia é evitando-se o preparo de solo desnecessário, no qual possa haver uso excessivo de máquinas e mão de obra ociosa em campo. Essa estratégia favorece indiretamente a melhoria do teor de água do perfil e a conservação do solo, visto que a redução de máquinas na área reduzirá a possibilidade de adensamento das partículas do solo causado pelo tráfego intenso de maquinário. Portanto, a mudança do preparo convencional para sistemas de preparo do solo reduzidos, como o cultivo mínimo e plantio direto pode ser uma alternativa para atender esses objetivos (HERNANZ et al., 2014).

Serra et al. (1979) realizaram um estudo para avaliar a energia de entrada na fase agrícola de dez culturas no Estado de São Paulo, entre elas, a cana-de-açúcar. Este trabalho serviu como ponto de partida para outras pesquisas que tinham o objetivo de verificar a eficiência cultural na produção agrícola das mais diversas culturas no Brasil. As culturas estudadas foram a cana-de-açúcar, mandioca, milho, algodão, trigo, soja, eucalipto, pinos,

tomate e batata. Os autores apresentaram uma metodologia para a mensuração do consumo energético das culturas escolhidas, constatando que a participação da energia fóssil representava aproximadamente 80% do total requerido para a produção agrícola.

Pimentel (1980) desenvolveu um manual de utilização de energia de entrada tomando como base a agricultura norte americana. Este manual, bem como o estudo de Serra et al. (1979), tem sido fonte de dados e metodologia para pesquisas posteriores. Entre as culturas pesquisadas por Pimentel (1980) estão o arroz, algumas frutas, a cana-de-açúcar das quais foram calculadas a energia entrada (input) e a energia de saída (output) por área e tempo na produção em Louisiana.

Vieira (2007) teve como objetivos principais realizar uma análise energética e um levantamento de custos de produção da cana-de-açúcar durante cinco anos (2001 à 2006). Neste estudo foram consideradas todas as fases do processo produtivo (preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita) e foi apontado no trabalho que a etapa de preparo de solo teve um custo energético de $3325,4 \text{ MJ ha}^{-1}$, sendo 74,4% referente ao uso de energia direta. Deste total 74,3% é proveniente de fonte de energia fóssil, no qual a utilização do óleo diesel é predominante, responsável por 72,9% desse montante.

Análises de fluxos de entrada e saída de energia de sistemas de produção agrícola nos indicam se a relação entre insumos utilizados e energia produzida pela cultura é positiva ou não. Com esse propósito diversos estudos tem sido realizados a respeito do balanço energético da cultura da cana-de-açúcar sendo ela uma fonte renovável de bioenergia a expectativa é que a sua energia produzida seja superior à quantidade de insumos utilizados (SPEKKEN et al., 2015). Oliveira et al. (2005) e Macedo et al. (2008) encontraram relação entre a produção de cana e energia de entrada de 9,3 considerando uma entrada de $15,2 \text{ GJ ha}^{-1}$, enquanto a razão obtida por Oliveira et al.(2005) foi de 3,7 e uma entrada de 36 GJ ha^{-1} . Como Macedo et al. (2008) calcularam a energia incorporada na cana-de-açúcar, desde a produção de campo até a fase de produtos energéticos (etanol e eletricidade) obtiveram resultados mais abrangentes e condizentes com a realidade de São Paulo.

Karimi (2008) realizaram uma análise de energia no sistema de produção da cana-de-açúcar de uma indústria situada no sul do Iran e verificaram que o custo energético total foi de 148 GJ ha^{-1} e o balanço energético encontrado foi de 0,76. Os autores constataram também que as operações de maior demanda energética de entrada foram a irrigação e o consumo de combustível (diesel).

Salla e Cabello (2010) realizaram uma análise energética de três sistemas de produção de etanol utilizando como matéria-prima a mandioca, a cana-de-açúcar e o milho.

Verificaram que na etapa de preparo da área para o cultivo de cana-de-açúcar, onde utilizou-se o sistema de preparo convencional de solo, o custo energético foi de 3611,9 MJ ha⁻¹, valor que representa 25% do custo energético total de implantação da cana planta. Os autores constataram também que o custo energético para produção etanol de cana-de-açúcar, considerando somente a etapa agrônômica está em torno de 1,99 MJ L⁻¹.

Veiga et al.(2015) avaliaram em seu estudo a energia incorporada, a quantidade de energia utilizada em sua produção, bem como o retorno de energia em 23 culturas. Dentre as conclusões obtidas verificaram que com relação custo baixo de produção de carboidratos e proteínas como fonte de energia, a mandioca e a soja apresentaram maior economia.

2.4. Modelos aplicados à mecanização agrícola

Modelos são representações idealizadas de sistemas reais (CAIXETA-FILHO, 2010), podem ser representados por um desenho do sistema analisado, uma descrição verbal escrita ou um complexo conjunto de equações (SINCLAIR e SELIGMAN, 1996). Modelos podem ser definidos também como um conjunto de algoritmos ordenados de forma que descrevam um sistema.

Para a construção de um modelo é essencial que haja uma análise e compreensão clara das relações existentes no problema, seguida pelo sequenciamento lógico das instruções e ordenação de procedimentos (algoritmo) envolvidos (MILAN e ROSA, 2015). Um algoritmo é composto por etapas sequenciais e lógicas organizadas de forma a executar uma tarefa (CORMEN, 2013). Para modelos executados em plataformas computacionais, os cálculos seguirão a sequência de acordo com o algoritmo que foi pré-estabelecido, o qual pode ter sido escrito em diversas linguagens de programação, resultando em programas com níveis de complexidade diversos.

A modelagem de sistemas tornou-se uma ferramenta de apoio no planejamento de estratégias de gerenciamento, intervenção e relevante para as tomadas de decisões agrícolas (NASSIF et al., 2012) por executar uma elevada quantidade de cálculos simultaneamente com rapidez e por oferecer a possibilidade de simulação de cenários. No processo de melhoria do gerenciamento tornou-se comum utilizar modelos computacionais como ferramentas de apoio por facilitarem a escolha de conjuntos mecanizados mais econômicos impactando diretamente nos lucros.

Diversos estudos apontam os benefícios proporcionados pela utilização de ferramentas computacionais no gerenciamento do maquinário como mencionado

anteriormente, Mercante et al.(2010), por exemplo, desenvolveram um programa computacional para a seleção e estimativa do custo operacional de máquinas e implementos agrícolas e verificaram que o mesmo pode auxiliar o usuário na escolha da máquina mais adequada do ponto de vista técnico e econômico para a execução das operações.

Qi et al.(2009) verificaram que a utilização do programa computacional, desenvolvido por eles, permitiu uma análise contínua e mais eficaz da frota agrícola ao longo do tempo realizando análise estatística do uso da maquinaria em uma região da China.

Santos (2011) buscando avaliar sistematicamente o desempenho operacional e econômico da colheita mecanizada da cana-de-açúcar desenvolveu um modelo computacional e verificou que no processo de colheita mecanizada a colhedora é o elemento que mais impacta nos custos. Em relação ao sistema de colheita as variáveis de maior relevância foram a eficiência de campo e o valor inicial das máquinas.

Piancentini et al (2012) desenvolveram um modelo computacional que determina o custo operacional da maquinaria agrícola (MAQCONTROL) e fornece relatórios por operação. Esse software calcula os custos fixos e variáveis, o custo horário e o custo operacional com base em uma máquina específica ou em um conjunto mecanizado utilizado na operação agrícola: preparo de solo, plantio e colheita.

Buscando avaliar o desempenho operacional e econômico do sistema de plantio mecanizado da cana-de-açúcar, Oliveira (2012) elaborou um modelo em planilha eletrônica que permitiu simular essa operação. De acordo com a autora observou-se que, nas condições consideradas, os custos com plantio são maiores do que com transbordos e que a capacidade de carga da plantadora apresentou maior influência na composição dos custos operacionais, indicando que eficiência operacional e velocidade de trabalho apresentam potencial de redução dos custos operacionais.

Almeida (2016) em seu estudo analisou a viabilidade operacional, econômica e energética de um sistema mecanizado para o aproveitamento de resíduos florestais, para isso desenvolveu um modelo computacional em Excel baseando-se no fluxograma adaptado de Milan (2004) concluindo que o sistema é viável operacional e economicamente quando mantido o limite de área mínima e distância máxima de transporte. Ficou comprovado, também, que o sistema é energeticamente viável ao constatar que o aproveitamento de tocos como fonte de energia apresentou um balanço energético favorável.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para atender o objetivo do trabalho, que foi analisar a viabilidade econômica e energética do sistema de preparo de solo profundo no cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) em comparação ao sistema de preparo convencional, foram realizadas as seguintes etapas:

- elaboração de um modelo para a execução do dimensionamento operacional, econômico e energético dos dois sistemas de preparo de solo;
- estabelecimento de um cenário base a partir da inserção de dados teóricos no modelo;
- verificação e validação do modelo comparando os resultados de custos operacionais obtidos no cenário base com os resultados retirados de estudos realizados anteriormente (AGRIANUAL, 2016) e (SITTA; MILAN, 2014);
- realização da análise econômica e energética do cenário base dos dois sistemas de preparo de solo;
- realização de análise de sensibilidade de algumas variáveis que compõem o custo operacional e a energia de entrada, seguindo metodologia proposta por Noronha (1981), utilizada por Milan (1992) e Romanelli e Milan (2010a).

3.1. Modelo

O ponto de partida para elaboração do modelo foi o conhecimento e entendimento da sistemática dos processos para realização do preparo do solo em cada sistema em análise, figura 2.

Figura 2. Fluxograma das operações mecanizadas de cada sistema de preparo de solo.

Após definir a sequência operacional de cada sistema de preparo de solo, realizou-se o dimensionamento operacional dos mesmos inserindo ao modelo todas as equações necessárias para determinação de características operacionais como número de conjuntos mecanizados e mão de obra necessários para executar o trabalho no tempo disponível. Na sequência foram adicionadas ao modelo as equações fundamentais para o dimensionamento econômico, com a função de se mensurar os custos horários fixos, variáveis horários e custos operacionais de cada sistema. A sequência para a realização do dimensionamento operacional e econômico foi baseada no fluxograma da figura 3, e as respectivas equações necessárias serão detalhadas a partir do item 3.2.

Figura 3. Fluxograma para dimensionamento operacional e econômico de sistemas mecanizados agrícolas.
Fonte: Milan (2004).

Na figura 3 (MILAN, 2004) está a sequência de etapas necessárias para o dimensionamento operacional e econômico de um sistema mecanizado. A condição inicial é a necessidade de aquisição de máquinas (1) seja para atender uma nova área agrícola ou substituir uma frota existente, total ou parcialmente. A seguir determinam-se quais operações serão necessárias (2) e as respectivas épocas de execução (3). Na análise operacional essas informações são utilizadas na fase de planejamento para seleção. No planejamento, estima-se o tempo disponível (4) e o ritmo operacional (5). Com base no ritmo operacional e na capacidade de trabalho da máquina (7), determina-se o número de conjuntos necessários (6) para atender as condições estabelecidas na análise operacional. A determinação da capacidade de trabalho é realizada com base na quantidade de trabalho (8) que a máquina pode realizar na unidade de tempo (9), adequando-se a potência disponível, por exemplo, do motor do trator com a potência requerida (11) pelo implemento e a eficiência da operação (10). A combinação entre a capacidade operacional e os custos diretos e indiretos (12) determina o custo operacional (13). Se o resultado for satisfatório, encerra-se o processo (14), caso contrário, devem-se reavaliar as alternativas para viabilizar o sistema.

A figura 4 adaptada de ROMANELLI (2007) apresenta a sequência de etapas para determinação do fluxo de energia de cada sistema de preparo de solo avaliado.

Figura 4. Fluxograma de energia, adaptado de Romanelli (2007).

Na figura 4, a análise de fluxo de energia se inicia com as informações determinadas na etapa anterior referentes ao conjunto mecanizado, trator (1) e ao implemento/ máquina de preparo (2) e à mão-de-obra (3) necessários para as operações de preparo do solo. Nas etapas seguintes, (4) e (5) referem-se às características técnicas do maquinário utilizado no sistema de preparo do solo como massa, vida útil e velocidade de operação; (6) representa o número de trabalhadores na execução das operações. O item (7) refere-se ao valor da potência bruta do trator, a qual multiplicada pelo fator de potência teórico (8) resulta no consumo horário de combustível (9). O item (10) refere-se à capacidade de campo operacional do conjunto mecanizado obtida durante o dimensionamento operacional. Com essas informações preliminares determinou-se o fluxo de materiais relativo aos sistemas, sendo (11) o consumo

de combustível operacional expresso em volume por área, $L\ ha^{-1}$ e (12) a depreciação do maquinário em termos de massa por área, $kg\ ha^{-1}$ e (13) a quantidade de trabalhadores por área, $homem\ ha^{-1}$. Para a obtenção da demanda energética de entrada esses valores foram multiplicados por seus respectivos índices de energia (14), sendo (15) energia de entrada relativa ao consumo de combustível, em $MJ\ L^{-1}$, (16) a energia de entrada pertinente à depreciação do maquinário, em $MJ\ ha^{-1}$, e (17) é relativo à energia de entrada que a mão-de-obra representa em cada sistema de preparo de solo, $MJ\ ha^{-1}$. A soma desses valores, (18), resultaram na energia de entrada total (EET) do sistema. Para finalizar foram utilizados dados de produtividade (19) da cultura, em $t\ ha^{-1}$ e de volume solo mobilizado do solo, em $m^3\ ha^{-1}$ para obtenção de indicadores de energia incorporada (20).

3.2. Dimensionamento operacional

O dimensionamento operacional foi realizado para definição das operações a serem executas, número de conjuntos necessários, mão de obra no período de tempo disponível.

No sistema de preparo convencional do solo foram consideradas quatro operações mecanizadas: gradagem pesada, gradagem intermediária, gradagem niveladora e subsolagem em uma profundidade de 0,50 m.

No sistema de preparo profundo do solo, a máquina utilizada realiza operações combinadas com capacidade de realizar até cinco operações simultaneamente: subsolagem profunda (0,80 m), aplicação de corretivo e adubos em duas profundidades (0,40 e 0,80 m), destorroamento do solo por meio de uma enxada rotativa e canteirização. No entanto, as operações de aplicação de corretivo e adubos foram desconsideradas neste estudo.

Na região sudeste brasileira o preparo de solo para o cultivo da cana-de-açúcar pode ocorrer o ano todo, tendo em vista que há safras de outono, inverno e primavera (LANDELL e BRESSANI, 2010).

Para a determinação do tempo disponível (TD) necessário à realização das operações, do ritmo operacional (RO) e do número de conjuntos (NC) foram utilizadas as equações 1, 2 e 3 utilizadas por Milan e Rosa (2015).

$$TD = [NTp - (NDF + NDU_I)] (JT \cdot EG) \quad (1)$$

Em que:

TD = Tempo disponível para realizar cada operação, h;

NTp = Número total de dias no período previsto para realização da operação, dias;

NDF = Número de domingos e feriados no período, dias;

NDU_I = Número de dias úteis impróprios ao trabalho das máquinas, dias;

JT = Jornada de trabalho, h dia⁻¹;

EG = Eficiência gerencial, decimal.

O tempo disponível varia de acordo com a época do ano em que o solo deverá ser preparado, com as condições climáticas da região e variedade de cana que será cultivada na área (ano e meio, ano outono ou ano primavera). O planejamento da execução das operações agrícolas foi realizado utilizando-se o gráfico de Gantt para a determinação de número de conjuntos mecanizados necessários. Com relação ao sistema de preparo convencional do solo estipulou-se que as operações agrícolas ocorreriam em sequência, com intervalo de um dia do o início de cada operação.

Neste estudo o período considerado para execução das operações foi de janeiro a abril. O total de dias úteis impróprios para execução de operações agrícolas foi obtido subtraindo-se os dias úteis para operações agrícolas, tabela 2, do número de dias úteis total disponível no período para preparo de solo, cujos resultados foram apresentados no modelo.

Tabela 2. Estimativa de dias úteis para operações agrícolas para a cidade de Piracicaba, SP, para dois tipos de solo: arenoso e argiloso (adaptada de Moretti Filho, 1960)

Tipo de solo	Número de dias úteis para operações agrícolas - Piracicaba			
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
Arenoso	11	11	18	25
Argiloso	7	7	15	21

Os domingos, feriados e dias úteis impróprios para operações mecanizadas foram subtraídos do período total de dias. A jornada de trabalho considerada foi de 12 horas. A eficiência gerencial (EG), que é um fator relacionado ao tempo dispendido com atividades administrativas, foi de 80%.

O ritmo operacional (RO) foi obtido por meio da razão entre a área e o tempo disponível, conforme descrita na equação 2:

$$RO = \frac{A}{TD} \quad (2)$$

Em que:

RO = Ritmo operacional, ha h⁻¹;

A = Área a ser trabalhada, ha;

TD = Tempo disponível, h.

Para obtenção da capacidade de campo operacional foi necessário determinar previamente a capacidade de campo efetiva (CcE), a qual representa a quantidade de trabalho efetivamente executada pela máquina e foi determinada utilizando a equação 3:

$$CcE = L_e V_e 0,1 \quad (3)$$

Em que:

CcE = Capacidade de campo efetiva, ha h⁻¹;

L_e = Largura de trabalho efetiva, m;

V_e = Velocidade de deslocamento efetiva, km h⁻¹;

0,1 = Fator de conversão de unidade de 1000 m² h⁻¹ para ha h⁻¹.

Durante a operação de campo, existem atividades auxiliares necessárias à operação, como manobras, pequenos ajustes ao longo da operação que, embora essenciais, não produzem trabalho efetivo, e a capacidade de campo operacional (CcO) expressa a influência dessas atividades auxiliares, e foi determinada conforme equação 4:

$$CcO = CcE E_c \quad (4)$$

Em que:

CcO = Capacidade de campo operacional, ha h⁻¹;

CcE = Capacidade de campo efetiva, ha h⁻¹;

E_c = Eficiência de campo, em decimal.

Para a determinação do número de conjuntos mecanizados foi utilizada a equação 5, expressa pela razão entre o ritmo operacional (RO) e a capacidade de campo operacional (CcO), equação 4.

$$NC = \frac{RO}{CcO} \quad (5)$$

Em que:

NC = Número de conjuntos, adimensional;

RO = Ritmo operacional, ha h⁻¹;

CcO = Capacidade de campo operacional, ha h⁻¹.

3.3. Análise econômica

A análise econômica foi viabilizada determinando-se os custos fixos e variáveis horários e os custos operacionais dos dois sistemas de preparo de solo para o cultivo da cana-de-açúcar utilizando o método descrito por ASABE (2006) associado aos parâmetros apresentados por ASABE (2011).

3.3.1. Custos fixos horários

Os custos fixos anuais foram determinados conforme a equação 6 adaptada do método apresentado por ASABE (2006). Neles estão inclusos custos com depreciação das máquinas, os juros relativos ao capital investido e gastos com estrutura física, alojamento, seguros e taxas.

$$CFA = \left[\frac{(V_i - V_f)}{VU_A} \right] + \left(\frac{V_i + V_f}{2} \right) i + (V_i \text{ FAST}) \quad (6)$$

Em que:

CFA = Custo fixo anual, R\$ ano⁻¹;

V_i = Valor inicial, R\$

V_f = Valor final, R\$;

VU_A = Vida útil, anos;

i = Taxa de juros anual, decimal;

FAST = Fator de alojamento, seguro e taxas, decimal.

Utilizando a equação 7 os custos fixos horários foram determinados:

$$CFH = \frac{CFA}{NHA} \quad (7)$$

Em que:

CFH = Custo fixo horário, R\$ h⁻¹;

Vi = Valor inicial da máquina, R\$;

NHA = Número de horas trabalhadas por ano, h.

3.3.2. Custos variáveis horários

Custos variáveis estão relacionados ao gasto com combustível, reparos e manutenção e foram determinados utilizando a equação 8.

$$CVH = CHC + CRM \quad (8)$$

Em que:

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

CHC = Custo horário do combustível, R\$ h⁻¹;

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

O consumo do combustível horário foi estimado utilizando o fator de consumo presente na equação 9 utilizada por Molin e Milan (2002), a qual foi adotada por apresentar menor variação no consumo em relação ao modelo proposto pela ASAE (2003) como verificado por Romanelli e Milan (2010a).

$$CC = FC_e PB_M \quad (9)$$

Em que:

CC = Consumo horário de combustível, L h⁻¹;

PB_M = Potência bruta do motor, kW;

FC_e = Fator de consumo específico para motores a diesel, 0,163 L kW⁻¹ h⁻¹ (MOLIN e MILAN, 2002);

O custo horário do consumo de combustível em cada sistema de preparo de solo foi determinado utilizando a equação 9 e a equação 10.

$$CHC = CC \cdot PRL \quad (10)$$

Em que:

CHC = Custo horário do combustível, R\$ h⁻¹;

CC = Consumo horário de combustível, L h⁻¹;

PRL = Preço de combustível, R\$ L⁻¹

Os custos com reparo e manutenção foram calculados conforme equação 11:

$$CRM = \frac{(FRM \cdot Vi)}{VUH} \quad (11)$$

Em que:

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

FRM = Fator de reparo e manutenção, decimal;

Vi = Valor inicial máquina, R\$;

VUH = Vida útil em horas, h.

3.3.3. Custo horário total

O custo horário total foi obtido a partir da somatória dos custos fixos e variáveis horários do conjunto trator-implemento, conforme equação 12

$$CHT = CFH_t + CFH_i + CHC + CRM_t + CRM_i \quad (12)$$

Em que:

CHT = Custo horário total do conjunto, R\$ h⁻¹;

CFH_t = Custo fixo horário do trator, R\$ h⁻¹;

CFH_i = Custo fixo horário da implemento, R\$ h⁻¹;

CHC = Custo horário de combustível, R\$ h⁻¹;

CRM_t = Custo de reparos e manutenção do trator, R\$ h⁻¹;

CRM_i = Custo de reparos e manutenção da implemento, R\$ h⁻¹.

3.3.4. Custo operacional

O custo operacional (COP) foi calculado por meio da equação 13, segundo Milan (2004), o COP reflete a relação entre o custo horário do conjunto mecanizado e a sua capacidade de trabalho.

$$COP = \frac{CHT}{CcO} \quad (13)$$

Em que:

COP = Custo operacional do preparo de solo, R\$ ha⁻¹;

CHT = Custo horário total conjunto, R\$ h⁻¹;

CcO = Capacidade de campo operacional, ha h⁻¹

3.4. Análise de energia

A análise energética foi realizada após determinação do fluxo de materiais, insumos diretos e indiretos, exceto adubos e fertilizantes, utilizados nos dois sistemas de preparo de solo para cultivo da cana-de-açúcar, em termos de massa, volume e número de trabalhadores por área. Posteriormente determinou-se a energia de entrada em ambos sistemas.

3.4.1. Fluxo de materiais

O fluxo de materiais indica quanto cada insumo representa em termos massa, volume ou mão-de-obra por unidade de área no sistema avaliado. E esse fluxo foi obtido determinando-se a depreciação, o consumo de combustível e mão-de-obra por área.

3.4.1.1. Depreciação do maquinário

A depreciação do maquinário foi obtida de acordo com Romanelli e Milan (2010a) por meio da equação 14.

$$DM = \frac{M}{(VUH \ CcO)} \quad (14)$$

Em que:

DM= Depreciação do maquinário, kg ha⁻¹;

M = Massa, kg;

VUH= Vida útil do maquinário, h;

CcO= Capacidade de campo operacional, ha h⁻¹

3.4.1.2. Combustível

O consumo do combustível operacional foi estimado a partir da equação 15 utilizada por Molin e Milan (2002).

$$CC_A = \frac{CC}{CcO} \quad (15)$$

Em que:

CC_A = Consumo operacional de combustível, L ha⁻¹;

CC = Consumo horário de combustível, L h⁻¹;

CcO = Capacidade de campo operacional ha h⁻¹.

3.4.1.3. Mão de obra

A mão-de-obra demandada por unidade de área foi calculada pela equação 16:

$$TH = \frac{\#trabalhadores}{CcO} \quad (16)$$

Em que:

TH = Trabalho humano, h ha⁻¹;

#trabalhadores= número de trabalhadores na operação mecanizada, adimensional;

CcO = Capacidade de campo operacional, ha h⁻¹.

3.4.2. Energia de Entrada

A energia de entrada de cada sistema de preparo de solo foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Romanelli e Milan (2010b) utilizando o fluxo de materiais associado aos índices de energia de cada insumo. Os índices de energia utilizados estão dispostos na tabela 3 e foram obtidos na bibliografia.

Tabela 3. Índices de energia utilizados na conversão do fluxo de materiais em energia

Índices de energia	Sigla	Unidade	Valor	Fonte
Depreciação de maquinário	IE _M	MJ kg ⁻¹	68,9	(SERRA et al., 1979)
Trabalho	IE _T	MJ h ⁻¹	2,2	(ULBANERE e FERREIRA, 1989)
Combustível (diesel)	IE _D	MJ L ⁻¹	45,7	(BOUSTEAD e HANCOCK, 1979)

3.4.2.1. Maquinário

A energia de entrada do maquinário é a intensidade energética que a depreciação do conjunto mecanizado representa em cada sistema de preparo de solo e foi determinada utilizando a equação 17 de acordo com a metodologia utilizada por Romanelli e Milan (2010b):

$$EE_{DM} = DM \cdot IE_M \quad (17)$$

Em que:

EE_{DM} = Energia de Entrada na depreciação do maquinário, MJ ha⁻¹;

DM = Depreciação do maquinário, kg ha⁻¹;

IE_M = Índice de energia da máquina, MJ kg⁻¹

3.4.2.2. Mão-de-obra

A mão-de-obra envolvida nas operações foram convertidas em energia utilizando a equação 18:

$$EE_{MO} = TH IE_T \quad (18)$$

Em que:

EE_{MO} = Energia de entrada na mão-de-obra, MJ ha⁻¹;

TH = Trabalho humano, h ha⁻¹;

IE_T = Índice de energia da mão-de-obra, MJ h⁻¹.

3.4.2.3. Consumo de combustível

A equação 19 foi utilizada para determinar a demanda energética de entrada que o consumo de combustível representa em cada sistema de preparo de solo:

$$EE_{CC} = CCA IE_D \quad (19)$$

Em que:

EE_{CC} = Energia de Entrada no consumo de combustível, MJ ha⁻¹;

CCA = Consumo de combustível, L ha⁻¹;

IE_D = Índice de energia diesel, MJ L⁻¹.

3.4.3. Energia de entrada total

A energia de entrada total (EE) foi determinada conforme Romanelli e Milan (2010b), equação (20).

$$EE_T = EE_{DM} + EE_{MO} + EE_{CC} \quad (20)$$

Em que:

EE_T = Energia de entrada total, MJ ha⁻¹;

EE_{DM} = Energia de entrada na depreciação do maquinário, MJ ha⁻¹;

EE_{MO} = Energia de entrada na mão-de-obra, MJ ha⁻¹;

EE_{CC} = Energia de entrada no consumo de combustível (MJ ha⁻¹)

3.4.4. Desempenho energético

3.4.4.1. Energia incorporada por produtividade da safra

A energia incorporada foi determinada por meio da equação (21), segundo Romanelli e Milan (2010b). O valor da produtividade foi retirado do relatório de safras da CONAB (2017a).

$$EI = \frac{EE_T}{P} \quad (21)$$

Em que:

EI= Energia Incorporada ou Intensidade energética do preparo do solo, MJ t⁻¹;

EE_T = Energia Entrada total, MJ ha⁻¹;

P= Produtividade de cana-de-açúcar, t ha⁻¹.

3.4.4.2. Energia incorporada por volume mobilizado

A energia incorporada por volume de solo mobilizado foi determinada por meio da equação (22), adaptada de Romanelli e Milan (2010b).

No sistema de preparo convencional o volume de solo mobilizado foi determinado multiplicando-se a área total superficial pela profundidade de atuação da ferramenta do implemento utilizado em cada operação.

No sistema de preparo profundo a área transversal mobilizada pela máquina foi determinada e seu valor multiplicado pelo comprimento total dos canteiros.

$$EI = \frac{EE_T}{VSM} \quad (22)$$

Em que:

EI= Energia Incorporada ou Intensidade energética do preparo do solo, MJ m⁻³;

EE_T = Energia Entrada total, MJ ha⁻¹;

VSM = Volume de solo mobilizado, m³ ha⁻¹.

3.5. Verificação e Validação

Ao longo da elaboração do modelo foram efetuadas verificações dos resultados gerados pelo modelo, com o objetivo de localizar possíveis erros. A verificação foi efetuada

conferindo-se os valores obtidos no modelo com os resultados obtidos a partir de cálculos manuais.

A consistência do modelo foi validada a partir da criação de um cenário base, tabela 5 cujos dados de área, safra, produtividade foram retirados de relatórios elaborados pela CONAB nos anos de 2016 e 2017. Além da validação pelo cenário base, foram realizados comparativos com outras fontes de dados.

A validação de custos horários de algumas operações do sistema de preparo convencional foi realizada comparando valores obtidos no modelo com valores apresentados no AGRIANUAL (FNP, 2017). Os resultados obtidos no preparo profundo foram comparados aos valores encontrados por Sitta e Milan (2014). Com relação aos parâmetros energéticos, o indicador validado foi a energia de entrada cujo valor foi comparado ao valor obtido por Salla e Cabello (2010).

3.6. Cenário Base

Para o cenário base foi considerada uma área de renovação de 4.000 ha, correspondente à 20% de uma área média própria com cultivo de cana-de-açúcar de uma usina de açúcar e etanol no estado de São Paulo (CONAB, 2017b). O tipo de solo considerado foi de textura argilosa, a variedade considerada foi cana ano e meio, espaçamento duplo alternado (0,9 m x 1,5 m) com produtividade média na última safra de 77,5 t ha⁻¹ (CONAB, 2017a). O período de preparo de solo considerado foi do mês de janeiro à abril.

Para execução das operações dos sistemas de preparo convencional e de preparo profundo de solo foram considerados três tipos de tratores e cinco tipos de implementos apresentados na tabela 4

Tabela 4. Equipamentos considerados nos sistemas de preparo de solo analisados

Equipamento	Sigla	Modelo	Potência (kW)	Preparo de solo
Trator A	TRA	4x2 TDA	139,8	Convencional
Trator B	TRB	4x2 TDA	158,0	Convencional
Trator C	TRC	4x2 TDA	183,8	Profundo
Grade “pesada”	GP	16x32”		Convencional
Grade “intermediária”	GI	28x28”		Convencional
Grade niveladora	GN	64x22”		Convencional
Subsolador	SUB50	5 hastes		Convencional
Máquina preparo profundo	SUB80	2 hastes		Profundo

Os fatores de reparo e manutenção dos equipamentos foram obtidos na ASABE (2011). Os valores iniciais das máquinas foram obtidos em vendas de máquinas agrícolas por meio de contato telefônico. As especificações técnicas dos equipamentos como largura, profundidade, velocidade de trabalho e massa do equipamento foram obtidos no catálogo dos fabricantes (AGCO, 2017, JOHN DEERE, 2017, BALDAN, 2017, TATU MARCHESAN, 2017, CIMEVASA, 2017, MAFES, 2017).

A velocidade de trabalho considerada para as operações do sistema de preparo convencional foi de 5,0 km h⁻¹ enquanto que para o preparo profundo foi de 3,0 km h⁻¹.

Nas análises de desempenho econômico e energia as operações de correção química do solo e aplicação de adubos e fertilizantes foram desconsideradas, por serem executadas de forma similar em ambos sistemas.

3.7. Análise de sensibilidade

Foram realizadas análises de sensibilidade para verificar como alguns parâmetros influenciariam nos custos operacionais e na demanda de energia. Os parâmetros selecionados para realização da análise foram: área, alojamento, seguros, taxas, vida útil (anual e horária), juros anual, reparo e manutenção, potência do trator, preço do diesel, consumo de combustível, valor inicial do equipamento, % do valor final do equipamento, eficiência gerencial, capacidade de campo operacional e massa das máquinas. Ao valor de cada parâmetro, obtido no cenário base, foi acrescido 10% conforme metodologia utilizada por Romanelli e Milan (2010b).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo, apresentado na tabela 5, foi utilizado para realização dos cálculos e obtenção dos indicadores econômicos e de energia.

As análises econômica e energética referem-se ao cenário base, cujos dados de entrada foram estabelecidos no capítulo material e métodos e apresentados na tabela 5. Os resultados obtidos para o cenário base foram apresentados na tabela 6.

Tabela 5. Modelo - Entrada de valores.

ENTRADA DE VALORES									
Agrícola	Variável	Sigla	Unidade	GP	GI	GN	SUB50	TRA	TRB
	Cultura	#	#	CANA ANO E MEIO					
	Tipo de solo	#	#	Argiloso					
	Area	A	ha	4000					
	Jornada de trabalho	JT	horas	12					
	Eficiência gerencial	EG	%	80					
	Produtividade	Pr	t ha ⁻¹	77,5					
Operacional	Sist. Preparo Convencional						Sist. Preparo Profundo		
	Variável	Sigla	Unidade	GP	GI	GN	SUB50	TRA	TRB
	Dias de preparo	DP	dias	119	118	117	116		
	Domingos e feriados	DF	dias	22	21	21	21		
	Dias úteis impróprios	DUi	dias	47	47	46	45		
	Potência nominal trator	PNM	kW					139,7	158,1
	Velocidade de trabalho	V	km h ⁻¹					5,0	5,0
	Largura de trabalho	L	m	2,7	3,7	6,3	2,0		
	Profundidade de trabalho	Pt	m	0,3	0,3	0,3	0,5		
	Eficiência de campo	Ec	%	80	80	80	80		
	Massa do equipamento	M	kg	3680	2607	3579	2200	10650	11800
	Fator de consumo específico comb	FC _e	L kW ⁻¹ h ⁻¹					0,163	0,163
	Consumo horário de combustível	CHC	L h ⁻¹					22,8	25,8
	Número de operadores	NO	#					1,0	1,0
Econômico	Variável	Sigla	Unidade	GP	GI	GN	SUB50	TRA	TRB
	Valor inicial	Vi	R\$	42.000,00	38.000,00	46.500,00	23.000,00	247.000,00	279.500,00
	Valor final	Vf	%	20	20	20	20	20	20
	Valor final	Vf	R\$	8.400,00	7.600,00	9.300,00	4.600,00	49.400,00	55.900,00
	Vida útil anos (e)	VUAe	anos	10	10	10	10	10	10
	Vida útil horas (e)	VUHe	horas	2000	2000	2000	2000	12000	12000
	Vida útil anos (p)	VUAp	anos	4,3	4,4	5,0	4,4	25,9	30,2
	Taxa de juros	j	%	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
	Alojamento, seguros e taxas	AST	%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Reparo e manutenção	FRM	%	60	60	60	70	100	100
	Preço do combustível	PC	R\$ L ⁻¹	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Energia	Variável	Sigla	Unidade	GP	GI	GN	SUB50	TRA	TRB
	Índ. Energ. Depr Máquinas	IE _M	MJ kg ⁻¹	68,9	68,9	68,9	68,9	68,9	68,9
	Índ. Energ. Trabalho	IE _T	MJ h ⁻¹	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
	Índ. Energ. Combustível (Diesel)	IE _D	MJ L ⁻¹	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7

4.1. Cenário base

4.1.1. Dimensionamento operacional

Utilizando o modelo verificou-se que para executar o preparo de solo de 4000 hectares, que representam uma área média de renovação de canavial no sudeste brasileiro, no tempo disponível, para o sistema de preparo de solo convencional (SPC) foram necessários no total 29 conjuntos mecanizados, sendo quatorze tratores de 139,7 kW para operar com oito grades “pesadas”, 16 x 34”, e seis grades intermediárias, 28 x 28”, quinze tratores de 158 kW para operar com quatro grades niveladoras, 64 x 22”, e onze subsoladores de cinco hastes. No sistema de preparo profundo do solo (SPP) foram necessários quinze conjuntos mecanizados, compostos de trator de 183,8 kW e máquina de preparo profundo de solo com operações combinadas.

Na tabela 6 foram apresentados os resultados obtidos com o modelo. Entre eles estão os valores relativos aos custos fixos, variáveis, totais e operacionais, detalhados por operação agrícola, do sistema de preparo convencional. Ao comparar o custo horário total das operações de gradagem pesada e intermediária com os valores retratados no Anuário da Agricultura Brasileira elaborado pela FNP (2017), constatou-se que os mesmos estão em concordância com a realidade, pois de acordo com os dados dessa referência, pois as operações de gradagem pesada e gradagem intermediária com tratores de 139 kW tiveram um custo horário em torno de R\$ 220,00 e R\$ 208,00, respectivamente. A diferença entre os valores encontrados no modelo e os da referência pode ser devida ao fato dos implementos apresentados pela entidade não serem idênticos aos do cenário base, são similares, mas com valores iniciais superiores.

Tabela 6. Resultados do cenário base obtidos com o modelo

RESULTADOS												
Custos diretos												
Variável	Sigla	Unidade	GP	GI	GN	TRA	TRB	TRB	TRB	ER	E	TRC
Tempo disponível	TD	horas	480	480	480					480		
Ritmo operacional	RO	h ⁻¹	8,3	8,3	8,3					8,3		
Sist. Preparo Convencional												
Variável	Sigla	Unidade	GP	GI	GN	TRA	TRB	TRB	TRB	ER	E	TRC
Depreciação anual (maquinário (e))	DPA	RS ano ⁻¹	3360,00	3040,00	3720,00	19760,00	22600,00	22600,00	22600,00	12000,00		26000,00
Juros anual	JA	RS ano ⁻¹	21420,00	1938,00	2371,50	12597,00	14254,50	14254,50	14254,50	7650,00		16575,00
Alojamento, seguros e taxas	AST	RS ano ⁻¹	420,00	380,00	465,00	2470,00	2795,00	2795,00	2795,00	1500,00		3250,00
Custo fixo anual (e)	CFa	RS ano ⁻¹	5922,00	5358,00	6556,50	34827,00	39409,50	39409,50	39409,50	21150,00		45825,00
Custo fixo horário (e)	CFHe	RS hora ⁻¹	29,61	26,79	32,78	29,02	32,84	32,84	32,84	26,44		38,19
Custo combustível	CC	RS hora ⁻¹	68,34	68,34	77,33							89,91
Custo reparo e manutenção	CRM	RS hora ⁻¹	12,60	11,40	13,95	20,58	23,29	23,29	23,29	15,00		27,08
Custo variável horário	CVH	RS hora ⁻¹	80,94	79,74	91,28	20,58	23,29	23,29	23,29	15,00		117,00
Custo horário total/máq (e)	CHTe	RS hora ⁻¹	110,55	106,53	124,06	49,61	56,13	56,13	56,13	41,44		155,19
Custo horário total/conjunto (e)	CHTe	RS hora ⁻¹	160,15	156,13	180,19	654,20				196,62		
Custo fixo anual (p)	CFAp	RS ano ⁻¹	10339,78	9239,68	10217,45	5584,82	22690,46	24443,68	25519,20	16094,44		29855,86
Custo fixo horário (p)	CFHp	RS hora ⁻¹	22,33	20,29	25,75	49,01	49,55	61,60	56,14	34,76		64,49
Custo horário total/conj (p)	CHTp	RS hora ⁻¹	172,86	170,16	201,91	722,04				231,25		
Custos operacionais												
Variável	Sigla	Unidade	GP + TRA	GI + TRA	GN + TRB	SUB50 + TRB	TRA	TRB	TRB	ER	E	TRC
Capacidade de campo efetiva	CeE	h ⁻¹	1,35	1,83	3,15	1,00				0,72		
Capacidade de campo operacional	CcO	h ⁻¹	1,08	1,46	2,52	0,80				0,58		
Nº de conjuntos	NC	#	7,7	5,7	3,3	10,4				14,5		
Nº de conjuntos inteiro	NC	#	8,0	6,0	4,0	11,0	8,0	4,0	11,0	15,0		15,0
Total de horas trabalhadas	THt	horas	3704	2732	1587	5000				6944,4		
Horas trabalhadas por máquina	THm	horas	463	455	397	455	455	397	455	463,0		463,0
Volume de solo mobilizado	VSM	m ³	12.000.000,0	12.000.000,0	10.000.000,0	20.000.000,0				8.000.000,0		22.000.000,0
Distância percorrida na área	DPT	m	14.814.814,8	10.928.961,7	6.349.206,3	20.000.000,0				16.666.666,7		
Custo operacional (e)	COP	RS h ⁻¹	153,75	112,41	86,49	208,20				353,92		
Custo operacional (p)	COPp	RS h ⁻¹	160,06	116,23	80,12	221,37				401,48		
Custos com energia												
Variável	Sigla	Unidade	GP + TRA	GI + TRA	GN + TRB	SUB50 + TRB	TRA	TRB	TRB	ER	E	TRC
Depreciação maquinário - conjunto	DM	kg h ⁻¹	2,62	1,58	1,33	2,75						
Trabalho humano (mão de obra)	TH	h h ⁻¹	0,96	0,72	0,48	1,32					2,33	
Consumo operacional de combustível	CCA	L h ⁻¹	21,87	16,40	12,37	34,02					1,80	
Energia de entrada deprec maquinário	EE _{DM}	MI h ⁻¹	180,41	108,69	91,70	189,48					53,95	
Energia de entrada trabalho (mão-de-obra)	EE _{mo}	MI h ⁻¹	2,11	1,58	1,06	2,90					160,45	
Energia de entrada combustível	EE _{cc}	MI h ⁻¹	999,34	749,50	565,41	1554,89					3,96	
Energia de entrada total	EE _t	MI h ⁻¹	1181,86	859,78	658,17	1747,27					2465,47	
Energia incorporada por volume mobiliz	EIV	MI m ⁻³	0,39	0,29	0,26	0,35					0,48	
Energia incorporada por cada produzida	EIC	MI t ⁻¹	15,25	11,09	8,49	22,55					33,93	

4.1.2. Análise econômica

A análise econômica dos sistemas de preparo de solo convencional e profundo foi baseada nos resultados dos custos horários, fixos e variáveis, e custos operacionais obtidos no cenário base.

4.1.2.1. Custos fixos, variáveis e operacionais

Na figura 5 foram apresentados os custos fixos e variáveis horários do sistema de preparo convencional e do sistema de preparo profundo do solo. Sabendo que os custos fixos horários são compostos pela depreciação do maquinário, juros anual, custo de alojamento, seguros e taxas e os custos variáveis são compostos pelos custos com consumo de combustível e com reparo e manutenção, verificou-se que em ambos sistemas esses custos representaram parcelas similares do custo horário total.

Figura 5. Custos horários de cada sistema de preparo de solo.

Observou-se na figura 5 que o custo fixo horário no preparo profundo foi minimamente superior ao do preparo convencional nas condições do cenário base. Isso ocorreu porque um dos conjuntos foi subutilizado, se o mesmo tivesse tido sua capacidade de trabalho totalmente utilizada o resultado teria sido o oposto do observado na figura.

Com relação aos custos fixos verificou-se que o juros anual apresentou maior contribuição na constituição desse custo em ambos sistemas de preparo de solo, representando 47% e 53% no convencional e no profundo, respectivamente, conforme foi apresentado na figura 6. No entanto, o custo com juros anual no preparo convencional foi 60% superior ao do preparo profundo.

Figura 6. Percentual de participação dos componentes do custo fixo de cada sistema de preparo de solo.

Com base na figura 6 e nos resultados obtidos com o modelo verificou-se que o custo com depreciação do maquinário foi o segundo mais representativo na composição do custo fixo, sendo o valor obtido para o preparo de solo convencional 70% superior ao profundo, isso ocorreu porque no sistema de preparo convencional foram necessários 29 conjuntos mecanizados e no profundo, 15, provocando essa diferença expressiva. O custo com seguros, alojamentos e taxas foi o que menos contribuiu na composição dos custos fixos, no entanto, no sistema convencional ele foi 70% superior que no profundo.

Com relação aos custos variáveis, verificou-se que, nas condições do cenário base, eles foram os maiores contribuintes na composição do custo horário total, pois representaram cerca de 60% do montante. Na composição dos custos variáveis, o custo com consumo de combustível apresentou maior destaque pois ficou muito próximo a 70% do total (figura 7).

Figura 7. Componentes do custo variável horário de cada sistema de preparo de solo.

Comparando os sistemas convencional e profundo, o segundo apresentou um custo com consumo de combustível 70% inferior ao primeiro. Os custos com reparo e manutenção representaram nos dois sistemas de preparo de solo 18% do custo total horário, mesma proporção relatada por Banchi et al (2009). Esses custos também apresentaram, no sistema convencional, resultados 70% superiores aos do profundo.

É importante pontuar que os custos passíveis de melhoria são a depreciação, desde que essa tenha sido causada pelo mau uso, como operação incorreta do operador, o consumo de combustível e reparo e manutenção, os quais apresentaram maior impacto nos custos horários em ambos sistemas.

Tabela 7. Custos horário, operacional e capacidade de campo operacional de cada operação agrícola do preparo convencional.

Variável	Sigla	Unidade	Gradagem pesada	Gradagem intermediária	Gradagem niveladora	Subsolagem
Custo horário total	CHT	R\$ h ⁻¹	172,86	170,16	201,91	177,10
Cap. de campo oper.	CcO	ha h ⁻¹	1,08	1,46	2,52	0,80
Custo operacional	COP	R\$ ha ⁻¹	160,06	116,23	80,12	221,37

A tabela 7 revelou que, em relação aos custos operacionais, a operação mais onerosa, do sistema de preparo convencional foi a de subsolagem e a menos dispendiosa foi a gradagem niveladora. Essas operações utilizaram tratores de mesma potência, porém os implementos possuíam larguras de trabalho distintas, característica que influenciou na capacidade de campo operacional do conjunto. A capacidade de campo operacional do subsolador foi inferior à da grade niveladora, a diferença demonstra a influência desse parâmetro na variação do custo operacional, tornando-o mais elevado em conjuntos com capacidade de campo menores. A figura 8 retrata a variação do custo operacional de cada operação agrícola do sistema convencional em função da variação da área.

Figura 8. Custo operacional total e por operação de sistema de preparo convencional do solo.

Na figura 8 foi possível identificar quais são as operações e os pontos em que cada conjunto alcança sua utilização máxima, no qual o custo operacional é mínimo, visto que o custo operacional foi decrescente até certo limite de área e em seguida retomou crescimento. Esse comportamento expressa o nível de utilização de cada conjunto com o aumento da área, o momento em que a curva retoma crescimento indica a necessidade de acrescentar mais um conjunto mecanizado ao sistema, aumentando o custo fixo. Na operação de gradagem pesada isso ocorreu quando a área alcançou uma dimensão de, aproximadamente, 570 ha resultando em um custo operacional de 156,00 R\$ ha⁻¹, a gradagem intermediária com uma área de 773 ha e COP de 165,00 R\$ ha⁻¹, a gradagem de nivelamento com 1331 ha e COP 75,00 R\$ ha⁻¹ e a subsolagem em 422 ha com custo operacional de 214,00 R\$ ha⁻¹.

Uma alternativa para redução de custos operacionais seria variar velocidade de trabalho e/ou eficiência de campo. A figura 9 mostra que quanto maior o valor da velocidade, da eficiência de campo ou de ambas, menor será o custo operacional.

Figura 9. Variação do custo operacional em função da variação da velocidade e eficiência de campo.

A partir da figura 9 foi possível observar que aumento de eficiência de campo e de velocidade possibilita variação mais significativa do custo operacional no preparo profundo do que no preparo convencional. No entanto, as variações de velocidade devem ser planejadas com cautela, pois podem favorecer danos precoces às ferramentas dos implementos, necessidade de aumento de potência, consumo de combustível e podem influenciar a qualidade de operação.

A figura 10 retrata a variação dos custos operacionais totais do sistema convencional e do profundo em função da variação da área.

Figura 10. Custo operacional dos dois sistemas de preparo de solo avaliados.

Na curva do preparo profundo observa-se que o custo operacional decresce até o limite de 276 ha e em seguida retoma crescimento. Esse comportamento ocorreu porque à medida que houve maior utilização do conjunto mecanizado o custo diminuiu progressivamente até um mínimo. O ponto destacado na figura indica que o sistema de preparo profundo, por exemplo, atingiu custo operacional mínimo em 276 ha e essa situação se repetiu para valores múltiplos dessa área, significando que nesse ponto e em seus múltiplos houve utilização máxima da capacidade de campo de um conjunto, de modo que imediatamente após esse valor o custo operacional retomou crescimento indicando a necessidade de aquisição de um novo conjunto mecanizado, aumentando o custo fixo.

A curva apresenta um comportamento atípico do custo operacional no preparo convencional diferente do comportamento padronizado refletido pela curva do preparo profundo. Isso ocorreu porque o preparo convencional foi composto por conjuntos mecanizados com capacidades de campo operacionais distintas resultando em uma curva com comportamento tal heterogêneo. No preparo convencional o custo operacional mínimo será produto da soma dos custos operacionais mínimos de todas as operações obtido com o aproveitamento máximo da CcO de cada conjunto mecanizado que compôs esse sistema.

Considerando todos os custos obtidos nas condições do cenário base, o sistema de preparo convencional de solo (SPC) apresentou desempenho econômico inferior ao profundo

(SPP), pois todos os seus custos horários foram maiores resultando em custos operacionais 30% superiores. Esses resultados evidenciam que apesar do sistema de preparo profundo demandar, no cenário base, potência 14% superior à maior potência utilizada no sistema convencional, ele demonstrou ser uma alternativa atrativa do ponto de vista econômico.

Sitta e Milan (2014) apontaram em seu estudo que os custos operacionais do sistema de preparo profundo de solo foram 40% inferiores aos do sistema convencional. A diferença entre os resultados dos estudos pode ser atribuída ao fato de os autores terem considerado os custos de mão-de-obra, e neste estudo, não. Além disso, consideraram um fator de reparo e manutenção superior para os equipamentos destinados ao preparo profundo. Neste estudo o fator de reparo e manutenção considerado foi retirado da norma ASABE (2011) e corresponde ao subsolador. Ou ainda, essa diferença pode ter sido em decorrência da metodologia adotada para estimativa do consumo de combustível.

A tabela 8 apresenta o número total de horas trabalhadas no período disponível, a distância percorrida na área, área superficial mobilizada e o volume de solo revolvido por operação e o total de cada sistema de preparo de solo.

Tabela 8. Número de horas trabalhadas, distância percorrida, volume mobilizado na área do cenário base por conjunto mecanizado.

Variável	Sigla	Unid.	Conjuntos mecanizados				
			Trator A		Trator B		Trator C
			Grade Pesada	Grade Interm	Grade Nivel	Subsolador 0,50 m	Subsolador 0,80 m
Nº de hs trabalhadas	NHT	h	256	189	110	346	463
Dist. percorrida	DPT	km	14815	10929	6349	20000	16667
Área superf mobil	As	ha	4000	4000	4000	4000	2000
Vol de solo mobil	VSM	m ³ ha ⁻¹	3000	3000	2500	5000	5500

Os dados da tabela 8 apontaram que no sistema de preparo convencional foram mobilizados um volume teórico de 13500 m³ ha⁻¹ de solo, considerando quatro operações que atuaram em camadas diferentes. No sistema de preparo profundo foram mobilizados 5500 m³ ha⁻¹ de solo, volume 41% inferior ao primeiro sistema. No sistema de preparo convencional toda mobilização do solo ocorreu em uma profundidade máxima de 0,50 m. Se tivesse sido executada somente uma operação nesse sistema o volume mobilizado teria sido de 5000 m³ ha⁻¹. No entanto, houve sobreposição e mobilização repetida da mesma camada, de modo que a camada 0-0,25 m foi revolvida quatro vezes, a camada 0,25-0,30 m, três, e a camada 0,30-0,50 m, uma vez, resultando no volume teórico supracitado. Essa sobreposição de

mobilização do solo é um dos aspectos preocupantes do sistema de preparo convencional, pois diversos estudos apontaram que operações agrícolas, tráfego intenso de máquinas, mobilização intensiva e repetitiva do solo causam degradação de sua qualidade física (REICHERT et al., 2003), provocando compactação nas camadas imediatamente inferiores à de atuação dos implementos, prejudicando o desenvolvimento das plantas, devido ao aumento da resistência à penetração do solo, diminuição da porosidade, condutividade hidráulica e aeração do solo (OTTO et al., 2011, ETANA et al., 2012, BANGITA e RAO, 2012; BAQUERO et al., 2012; SOUZA et al., 2014; SOUZA et al., 2015),

No sistema de preparo profundo a mobilização do solo foi realizada de forma canteirizada à uma profundidade de 0,80 m com apenas uma passada na área. Os dois sistemas de preparo de solo também divergiram com relação à quantidade de passadas e na distância total percorrida na área. No sistema convencional foram 52 mil quilômetros percorridos em superfície total pelos vinte e nove conjuntos mecanizados, enquanto que no preparo profundo foram 16,7 mil quilômetros percorridos por quinze conjuntos, incorrendo numa redução de 68% de tráfego de máquinas na área.

Essas disparidades favoreceram a diminuição dos custos operacionais do sistema de preparo profundo como mostrado neste estudo e apontado anteriormente por Tomaz (2013), o qual relatou em seu trabalho que a redução de até 70% do tráfego de máquinas na lavoura promovido pelo SPP incorreu em menor consumo de combustível; redução no tempo das operações agrícolas; redução do parque de máquinas e em menor custo operacional.

4.1.3. Análise de energia

A análise de energia dos dois sistemas de preparo de solo foi realizada com base na energia de entrada necessária à cada sistema para execução das operações mecanizadas. A energia de entrada foi determinada após estabelecimento do fluxo de materiais.

4.1.3.1. Fluxo de materiais

A tabela 9 apresenta o fluxo de materiais de cada sistema de preparo de solo, sendo que o SPC foi detalhado por operação. O fluxo foi determinado com base na análise operacional, pois nela foram estabelecidos os insumos necessários a cada sistema de preparo

se solo: maquinário, mão-de-obra, consumo de combustível, além das capacidades de campo operacionais de cada conjunto mecanizado, apresentados na tabela 6.

Tabela 9. Fluxo de materiais por unidade de área

Variável	Sigla	Unid	Conjuntos mecanizados				
			Trator A		Trator B		Trator C
			Grade Pesada	Grade Interm	Grade Nivel	Subsol 0,50 m	Subsol 0,80 m
Depreciação maq - conjunto	DM	kg ha ⁻¹	2,6	1,6	1,3	2,8	2,3
Trab hum (mão de obra)	TH	h ha ⁻¹	1,0	0,7	0,5	1,3	1,8
Consumo comb. (diesel)	COC	L ha ⁻¹	21,9	16,4	12,4	34,0	53,9

Os conjuntos mecanizados que executaram as operações de subsolagem e gradagem pesada apresentaram, respectivamente, a primeira e a segunda maior depreciação por área. Com relação à subsolagem, esse alto valor de depreciação foi decorrente do fato de o conjunto apresentar capacidade de campo operacional menor que a grade pesada e ao fato do trator possuir uma massa (kg) próxima à do trator que compôs o conjunto de gradagem pesada. O fato do peso da grade pesada ser maior que a do subsolador resultou na segunda maior depreciação entre os conjuntos do preparo convencional. Ao comparar a depreciação total do maquinário que compõe o sistema de preparo convencional do solo com o sistema profundo verificou-se que o primeiro apresentou um fluxo 72% superior ao primeiro.

Observou-se na tabela 9 que o fluxo relativo à mão-de-obra foi modesto em ambos sistemas de preparo de solo, no entanto o sistema de preparo profundo esse fluxo foi 48% inferior ao preparo convencional.

Verificou-se na tabela que houve um alto consumo de combustível por área nos dois sistemas de preparo de solo. No sistema convencional a operação que apresentou maior consumo de combustível foi a subsolagem e isso foi em decorrência do conjunto apresentar uma CcO baixa. Ao comparar os dois sistemas verificou-se que o consumo de combustível no preparo convencional foi 36% superior ao preparo profundo.

4.1.3.2. Energia de Entrada

A tabela 10 apresenta os valores de energia de entrada de cada insumo, os quais são produtos da multiplicação dos valores obtidos no fluxo de materiais por seus respectivos índices de energia apresentados na tabela 2 do material e métodos.

Tabela 10. Valores de energia de entrada dos sistemas de preparo de solo avaliados.

Variável	Sigla	Unid.	Gradagem pesada	Gradagem Interm.	Gradagem Nível.	Subsolagem	Preparo Conv.	Preparo Prof.
Energia de entrada maquinário	EE _{DM}	MJ ha ⁻¹	180,4	108,7	91,7	189,5	570,3	160,5
Energia de entrada trabalho	EE _{MO}	MJ ha ⁻¹	2,1	1,6	1,1	2,9	7,7	4,0
Energia de entrada combustível	EE _{CC}	MJ ha ⁻¹	999,3	749,5	565,4	1554,9	3869,1	2465,5
Energia de entrada total	EE _T	MJ ha ⁻¹	1181,9	859,8	658,2	1747,3	4447,1	2629,9

Os valores de energia de entrada apresentados na tabela 10 foram expressos com mesma unidade, energia por área, e essa peculiaridade nos permite afirmar com segurança que as operações subsolagem e gradagem pesada foram as que mais demandaram energia no sistema de preparo convencional.

A partir da tabela 10 verificou-se também que no sistema de preparo convencional a energia de entrada total relativa à depreciação do maquinário, à mão de obra e ao consumo de combustível foram, 70%, 48% e 36%, respectivamente, superiores aos valores encontrados para o sistema de preparo profundo. Isso se deu em decorrência do sistema convencional ter utilizado quatro tipos de conjuntos mecanizados.

A tabela mostra que o sistema de preparo convencional apresentou uma demanda de energia de 4447,1 MJ ha⁻¹ e o sistema de preparo profundo de solo, 2629,9 MJ ha⁻¹. Salla e Cabello (2010) encontraram uma energia de entrada para operações agrícolas do sistema de preparo do solo convencional de 3611,9 MJ ha⁻¹. Vieira (2007) verificou em seu estudo que a etapa de preparo de solo teve um custo energético de 3330 MJ ha⁻¹, sendo 74,4% referente ao uso de energia direta. Desse total 74,3% é proveniente de fonte de energia fóssil, no qual a utilização do óleo diesel é predominante, com 72,9% desse montante. Os valores foram inferiores ao deste trabalho e a diferença pode ser atribuída à forma de determinação do consumo de combustível, visto que é o parâmetro de maior impacto na demanda energética e/ou por não terem considerado a operação de subsolagem em seus respectivos estudos, sendo essa a operação agrícola que apresentou maior demanda energética neste estudo.

A figura 11 apresenta a variação da energia de entrada em função da área.

Figura 11. Demanda de energia de entrada dos sistemas de preparo de solo

Os resultados da figura 11 demonstraram que a variação da energia em função da área ocorreu de forma similar à variação do custo operacional, de modo que a energia de entrada diminuiu em função da área até certo limite. Esse limite ocorreu quando a capacidade de campo operacional do conjunto atingiu utilização máxima, indicando a necessidade de aquisição de novo conjunto.

No sistema de preparo profundo o conjunto mecanizado alcançou aproveitamento máximo da capacidade de campo em uma área de 276 ha, aproximadamente, e a demanda de energia de entrada mínima foi de 2537 MJ ha⁻¹. O sistema de preparo convencional apresentou demanda de energia de entrada mínima no valor de 4154 MJ ha⁻¹ para uma área de, aproximadamente, 2815 ha, a qual corresponde à somatória das áreas máximas em que cada conjunto mecanizado utiliza totalmente sua capacidade de campo operacional.

A tabela 6 mostrou que o sistema de preparo profundo apresentou uma demanda de energia de entrada total, 40% inferior ao sistema convencional.

Constatou-se também que nos dois sistemas avaliados o combustível foi o insumo com maior impacto na demanda energética e na composição dos custos operacionais, representando em torno de 90% do total. A figura 12 ilustra a participação percentual de cada insumo de acordo com o sistema de preparo de solo.

Figura 12. Composição da energia total de entrada, (a) preparo convencional, (b) preparo profundo.

O alto consumo de combustível em ambos sistemas de preparo de solo apontaram a intensa dependência de fontes fósseis de energia, neste caso o combustível diesel. Uma alternativa para reduzir essa dependência seria substituir o diesel por combustíveis que mesclam etanol e diesel (HANSEN et al., 2001, SHADIDI et al., 2014, ESTRADA et al., 2016), pois motores agrícolas movidos somente à etanol ainda não apresentam eficiência compatível com a que é proporcionada pelo diesel.

4.1.3.3. Energia Incorporada

A tabela 11 apresenta os indicadores de energia incorporada por tonelada de cana produzida e por volume de solo mobilizado.

Tabela 11. Indicadores de intensidade de energia em cada sistema de preparo de solo

Indicadores	Sigla	Unidade	Preparo convencional	Preparo profundo
Energia de entrada total	EET	GJ ha ⁻¹	4,45	2,63
Energia incorporada cana produzida	EIC	MJ t ⁻¹	57,4	33,9
Energia incorporada por vol. mobilizado	EIV	MJ m ⁻³	1,3	0,5

O valor da energia incorporada por tonelada de cana-de-açúcar exprime quanto de energia de entrada foi empregada em cada sistema de preparo de solo e quanto ela representa em cada tonelada de cana. Verificou-se que a energia de entrada total investida no sistema de preparo convencional foi 41% superior à quantidade empregada no preparo profundo.

Com relação ao volume de solo mobilizado, a energia incorporada no sistema de preparo profundo foi 61% inferior à energia incorporada no sistema convencional. O valor de energia incorporada por volume é um indicador de sustentabilidade que reflete quanto de energia foi necessária para mobilizar cada m^3 de solo e esse valor torna-se maior ao passo que o número de operações agrícolas e profundidade de mobilização aumentam.

4.1.4. Análise de sensibilidade

4.1.4.1. Custos operacionais

A figura 13 apresenta os parâmetros que provocaram variação do custo operacional de cada sistema, cada um deles teve como ponto inicial o valor obtido no cenário base e foi acrescido em 10% e essa ação resultou em variação do custo operacional em ambos sistemas de preparo de solo.

Figura 13. Parâmetros com influência no custo operacional (COP) dos sistemas de preparo de solo avaliados.

Os parâmetros que provocaram redução do custo operacional de forma mais acentuada foram o aumento da capacidade de campo operacional (CcO), vida útil horária e da eficiência gerencial nos dois sistemas de preparo de solo avaliados. Tendo em vista que a CcO é produto da velocidade, largura de trabalho e eficiência de campo e assumindo que a largura de trabalho do sistema de preparo profundo é fixa, nesse caso o custo operacional será passível de mudança se os demais atributos forem alterados. No entanto, observou-se que o

parâmetro estratégico para redução desse custo é a eficiência de campo, pois incrementos de velocidade em operações agrícolas devem ser avaliados com critério, uma vez que podem incidir em aumento de potência, promovendo um efeito contrário ao desejado, como aumento de consumo de combustível e de reparos e manutenção, traduzindo-se em aumento do custo operacional.

O aumento da vida útil horária também apresentou grande influência na redução do COP, no entanto é importante salientar que esse parâmetro depende de fatores, quase sempre, fora de controle gerencial, como qualidade do equipamento em operação, habilidade do operador, condições físicas do solo, elementos que são determinantes para conservação da máquina, além de realização de manutenções preventivas regulares que deve fazer parte do planejamento gerencial. Portanto, se um ou todos esses fatores forem inadequados ou deficientes incidirão em aumento de custo com reparo e manutenção corretiva.

A eficiência gerencial pode ser um ponto estratégico para redução de custos operacionais também, pois ela está vinculada à melhoria de processos e procedimentos de gestão e administrativos e essa ação reduzirá os tempos perdidos decorrente da máquina ociosa, em que ela se encontra disponível para operar, mas não é utilizada em decorrência de situações administrativas-gerenciais (GONÇALVES et al., 1993).

A figura indicou que houve aumento similar, de cerca de 4%, do custo operacional nos dois sistemas de preparo de solo quando a potência do trator, o consumo ou o preço do combustível são elevados em 10%. Esses parâmetros apresentaram impacto no COP em mesma proporção porque o consumo do combustível foi estimado utilizando um fator de potência multiplicado à potência bruta do trator, e essa metodologia aproxima o consumo de combustível cada operação agrícola. No entanto, para obtenção de resultados reais se faz necessária a realização de estudos específicos, em campo, que contemplem a potência requerida em cada operação agrícola e o consumo de combustível da máquina com operações combinadas do preparo profundo canteirizado, já que até o momento dispomos apenas de trabalhos acerca das operações do preparo convencional.

Ainda em relação ao consumo de combustível dos dois sistemas de preparo de solo constatou-se que o preparo profundo registrou um consumo 30% inferior ao preparo convencional, diferença muito significativa tendo em vista que esse é o insumo de maior influência na composição do custo operacional.

4.1.4.2. Energia de Entrada

A figura 14 apresenta a influência dos parâmetros na demanda de energia de entrada quando variados. Para a realização da análise de sensibilidade considerou-se como ponto inicial a energia de entrada total obtida no cenário base.

Figura 14. Parâmetros que influenciam na demanda de energia de entrada nos sistemas de preparo de solo avaliados

O parâmetro que impactou de forma favorável na demanda de energia de entrada, reduzindo-a, foi a melhoria da capacidade de campo operacional, fato igualmente verificado na análise de sensibilidade do custo operacional. No entanto, verificou-se que aumentos de mesma proporção de capacidade campo operacional surtiram maior efeito no sistema de preparo convencional em decorrência dele ser composto por quatro conjuntos mecanizados e o profundo por apenas um.

O aumento da potência do trator e do consumo de combustível, impactaram de forma negativa na demanda de energia de entrada em ambos sistemas de preparo de solo, pois refletiram em aumento de demanda de energia. Houve influência similar ao se analisar a importância desse parâmetro no custo operacional. Com base nessa similaridade pode-se afirmar que a economia de combustível resulta em redução de custos operacionais e na demanda de energia de entrada.

Nessa figura o aumento da área apresentou impacto favorável somente no sistema de preparo profundo e isso ocorreu porque em uma área de 4400 ha o aproveitamento da capacidade de campo do conjunto é quase máxima fato que justifica o valor da demanda de energia estar próximo do mínimo possível (2537 MJ ha^{-1}). No preparo convencional, ocorreu o contrário, o aumento da demanda de energia indica que as capacidades de campo operacionais dos conjuntos estão subutilizadas em uma área dessa dimensão.

O aumento de 10% da eficiência gerencial influenciou de modo diferente na demanda de energia de cada sistema, pois verificou-se que no sistema convencional ela proporcionou redução de energia e no profundo aumento. Isso ocorreu porque ao melhorar a eficiência gerencial houve redução de conjuntos mecanizados e coincidentemente melhor aproveitamento da utilização deles. No entanto, no sistema de preparo profundo houve redução de conjuntos e a utilização de sua capacidade de campo operacional foi baixa, resultando em aumento da demanda de energia por área.

No preparo convencional a massa total dos conjuntos mecanizados foi de 56966 kg e a do preparo profundo foi de 15825 kg. A variação desses valores apresentou relevância negativa em ambos sistemas de preparo de solo, pois proporcionou aumento da demanda de energia e esse aumento foi em maior proporção no preparo convencional. No entanto, quando sua influência é comparada aos demais parâmetros, verificou-se que ela foi menos relevante. A variação da massa surtiu maior efeito no sistema convencional, por este ser constituído por um número maior de conjuntos mecanizados.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no cenário base concluiu-se que o sistema de preparo profundo de solo no cultivo da cana-de-açúcar é viável do ponto de vista econômico e energético quando comparado ao sistema de preparo convencional. Visto que o sistema de preparo convencional apresentou custos operacionais e demanda de energia superiores, 30% e 40%, respectivamente, confirmando a hipótese levantada no início do trabalho.

Concluiu-se também que para reduzir custos operacionais e demanda de energia, os pontos estratégicos são as eficiências de campo e gerencial. A melhoria da eficiência de campo proporciona aumento da capacidade de campo operacional e esta contribui indiretamente para a redução do consumo de combustível desde que o conjunto mecanizado esteja operando em velocidade adequada, a qual possibilite rapidez das operações sem aumento de potência do trator.

REFERÊNCIAS

AGCO CORPORATION / MASSEY FERGUSON. Disponível em < <http://www.massey.com.br/futuro-pulsa-agora-lancamentos/pdf/Folhetao-MF-7700-Dyna-6-inte.pdf> > acesso em 07 de julho de 2017.

ALAMOUTI, M. Y.; NAVABZADEH, M. Investigating of plowing depth effect on some soil physical properties. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, v. 10, n. 24, p. 4510-4514, 2007.

ALMEIDA, B. O. Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais. 2016. 96f Dissertação (Mestrado em ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C.; NOVOTNY, E. H. CULTIVO DO MILHO: Preparo convencional do solo. EMBRAPA. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo: 4 p. 2002.

ANDRADE, C. D. et al. Erosão hídrica em um Latossolo Vermelho cultivado com hortaliças sob diferentes sistemas de manejo. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Fortaleza 2009.

American Society of Agricultural and Biological Engineers. Agricultural Machinery Management. St. Joseph: ASAE EP496.3 FEB2006: 6 p. ASABE, 2006.

_____. Agricultural Machinery Management Data. St. Joseph: ASAE D497.7 MAR2011: 8 p. ASABE, 2011.

American Society Engineers. Agricultural Machinery Management. St. Joseph: ASAE EP496.2 FEB03: 6 p. ASAE, 2003.

ASSIREU, A. T. et al. Fontes Alternativas de Energia. In: (Ed.). Ciências Ambientais para Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2015. cap. 9, p.251-307.

AZEVEDO, M. C. B. Efeito de três sistemas de manejo físico do solo no enraizamento e na produção de cana-de-açúcar. 2008. 100p (Doutorado). Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

BALDAN IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. Disponível em:
<<http://www.baldan.com.br/conteudos/grades.html> > acesso em 07 de julho de 2017.

BANCHI, A. D.; LOPES, J. R.; BARRETO JUNIOR, E. A. Implementos II Custos de Reparo e Manutenção dos Implementos Agrícolas. Revista AGRIMOTOR, São Paulo, v. 42, p. 08 - 10, 2009.

BANGITA, B.; RAO, B. K. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. Geoderma, v. 189–190, p. 351-356, 2012.

BAQUERO, J. E. et al. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisoil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 63-70, 2012.

BARROS, F. F.; MILAN, M. Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. Bragantia, v. 69, p. 221-229, 2010.

BIAGGIONI, M. A. M.; BOVOLENTA, F. C. Balanço energético comparativo para rotas de escoamento de soja. Engenharia Agrícola, v. 30, p. 587-599, 2010.

BISHOP, J. C.; GRIMES, D. W. Precision tillage effects on potato root and tuber production. American Potato Journal, v. 55, n. 2, p. 65-71, 1978.

BOUSTEAD, I.; HANCOCK, G. F. Handbook of industrial energy analysis. Chichester: 1979. 422.

CAI, H. et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. The Crop Journal, v. 2, n. 5, p. 297-307, 2014.

CAIXETA-FILHO, J. V. Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais. Atlas, 2010. 169.

CEPEA. PIB Cadeias do Agronegócio - 4º Trimestre 2016. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - ESALQ/USP. Piracicaba, p.1-14. 2016

Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2016/17 n.4 - quarto levantamento. Brasília, p.1-77. CONAB, 2017a

_____. Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil, edição para a safra 2014/15. Brasília, p.1-64. CONAB, 2017b

CIMEVASA. Disponível em < <http://www.civemasa.com.br/> >. Acesso em 07 de julho de 2017.

CORMEN, T. H. Algorithms unlocked. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 502 p. 2013.

COSENTINO, R. M. A. Modelo empírico de depreciação para tratores agrícolas de rodas. 2004. 80p Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

Empresa de Pesquisas Energéticas. Relatório Energético Nacional 2016. Relatório final ano base 2015. Rio de Janeiro: 294 p. EPE, 2016.

_____. Balanço Energético Nacional, BEN 2017. Relatório Síntese ano base 2016. Rio de Janeiro. 61 p. EPE, 2017

ESTRADA, J. S. et al. Performance of an agricultural engine using blends of diesel and ethanol. Ciência Rural. 46: 1200-1205 p. 2016.

ETANA, A. et al. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. GEODERMA, v. 192, p. 430-436, 2012.

FARIAS, M. S. D. et al. Performance of an agricultural engine using mineral diesel and ethanol fuels. *Ciência Rural*, v. 47, 2017.

FREITAS, G. R. Preparo do solo. In: PARANHOS, S. B. (Ed.). *Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização*. 4. Campinas, SP: Fundação CARGILL, v.1, 1987. cap. III - Técnicas culturais básicas, p.271-283.

FRÖHLING, M. et al. A Material Flow-based Approach to Enhance Resource Efficiency in Production and Recycling Networks. *Journal of Industrial Ecology*, v. 17, n. 1, p. 5-19, 2013.

GONÇALVES, N. H. et al. Eficiências de uso de máquinas agrícolas. Congresso Nacional da Sociedade de Técnicos açucareiros e Alcooleiros do Brasil Águas de São Pedro: 165-168 p. 1993.

HAMZEI, J.; SEYYEDI, M. Energy use and input–output costs for sunflower production in sole and intercropping with soybean under different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, v. 157, p. 73-82, 2016.

HANSEN, A. C. et al. On-farm evaluation of diesel fuel oxygenated with ethanol. ASAE Annual Meeting, St. Joseph, Mich., 2001.

HERNANZ, J. L. et al. Long-term (1983–2012) assessment of three tillage systems on the energy use efficiency, crop production and seeding emergence in a rain fed cereal monoculture in semiarid conditions in central Spain. *Field Crops Research*, v. 166, p. 26-37, 2014.

HOQUE, M. R. et al. Energy Intensity of the Catalan Construction Sector. *Journal of Industrial Ecology*, v. 16, n. 5, p. 699-709, 2012.

HUNT, D. Farm power and machinery management. 9. Ames: Iowa State University Press, 1995. 363p

INSTITUTO FNP. AGRIANUAL 2017: Anuário da agricultura brasileira. São Paulo-SP: FNP, 2017.

JOHN DEERE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Disponível em < <https://www.deere.com.br/pt/index.html> > Acesso em: 07 de julho de 2017.

KANIANSKA, R. et al. Use of material flow accounting for assessment of energy savings: A case of biomass in Slovakia and the Czech Republic. *Energy Policy*, v. 39, n. 5, p. 2824-2832, 2011.

KARIMI, M. et al. Energy analysis of sugarcane production in plant farms a case study in Debel Khazai Agro-industry in Iran. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, v. 4, n. 2, p. 165-171, 2008.

KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. *Agricultural Systems*, v. 104, n. 7, p. 513-521, 2011.

LABUSCHAGNE, N.; JOUBERT, D. Profile Modification as a Means of Soil Improvement. In: (Ed.). *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*: CRC Press, 2006. p.547-558.

LAL, R.; BRUCE, J. P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science & Policy*, v. 2, n. 2, p. 177-185, 1999.

LANDELL, M. G. D. A.; BRESSANI, J. A. Melhoramento Genético, caracterização e manejo varietal. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELLOS, A. C. M. D., et al (Ed.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, IAC, 2010.

LIMA, C. C. Canteirização com preparo convencional e profundo do solo para cana-de-açúcar: atributos físicos e sistema radicular. 2016. 150 p. Dissertação (Mestrado). Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas.

LITHOURGIDIS, A. S.; DAMALAS, C. A.; ELEFTHEROHORINOS, I. G. Conservation Tillage: A Promising Perspective for Sustainable Agriculture in Greece. *Journal of Sustainable Agriculture*, v. 33, n. 1, p. 85-95, 2009.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MARASCA, I. Avaliação dos atributos físicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar em área com adequação de relevo, utilizando equipamento de preparo profundo e canteirizado do solo. 2014. 76p Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu.

MERCANTE, E. et al. PRAPRAG: software para planejamento racional de máquinas agrícolas. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p. 322-333, 2010.

MIALHE, L. G. Manual de mecanização agrícola. São Paulo. Ceres. 297 p. 1974.

MILAN, M. Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas. 2004. 100p Tese (Livre docência) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

MILAN, M.; ROSA, J. H. M. Corte, transbordo e transporte (CCT) – Aspectos relevantes e uso de modelagem para CCT. In: BELARDO, G. D. C.; CASSIA, M. T., et al (Ed.). *Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar*. 1ª ed. Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA, 2015. p.415-427.

MOLIN, J. P.; MILAN, M. Trator-implemento: Dimensionamento, capacidade operacional e custo. In: STAPE, J. L. e GONÇALVES, J. L. D. M. (Ed.). *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 13, p.409-436.

MORETTI FILHO, J. Caracterização da seca agrônômica na zona canavieira do Estado de São Paulo como base para os estudos de irrigação. Piracicaba, 1960. 138p.

NASSIF, D. S. P. et al. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 3, p. 311-318, 2012.

OLIVEIRA, C. D. Plantio mecanizado de cana-de-açúcar: aspectos operacionais e econômicos. 2012. 107p Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba. Piracicaba.

OLIVEIRA, M. E.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL, E. J. Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint. *BioScience*, v. 55, n. 7, p. 593-602, 2005.

OTTO, R. et al. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and Tillage Research*, v. 117, p. 201-210, 2011.

OZKAN, B.; AKCAOZ, H.; FERT, C. Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, v. 29, n. 1, p. 39-51, 2004.

PAIVA, C. T. C. Cultivo de milho em plantio direto e convencional com diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura 2011. 43p Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Acre, Rio Branco.

PARK, G. et al. Effect of zero and zonal tillage on cane growth and yield on a heavy cracking clay soil in the Herbert valley. 32nd Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 2010, 2010. p. 97-109.

PECEGE. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: Fechamento da safra 2013/2014 Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Piracicaba, p.54. 2014

PIACENTINI, L. et al. Software para estimativa do custo operacional de máquinas agrícolas - MAQCONTROL. *Engenharia Agrícola*, v. 32, p. 609-623, 2012.

PIMENTEL, D. Handbook of energy utilization in agriculture. Boca Raton: CRC Press, 1980.

PIMENTEL, D. et al. Food Production and the Energy Crisis. *Science*, v. 182, n. 4111, p. 443-449, 1973.

QI, X.; LI, H.; YIN, W. Development of the farm machinery statistical management system based on web. In: LI, D. e ZHAO, C. (Ed.). Computer and Computing Technologies in Agriculture II, Volume 2: The Second IFIP International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA2008), October 18-20, 2008, Beijing, China. Boston, MA: Springer US, 2009. p.1309-1317.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*, v. 27, p. 31-48, 2003.

ROMANELLI, T. L. Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto. 2007. 121p (Doutorado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Material flow determination through agricultural machinery management. *Scientia Agricola*, v. 67, p. 375-383, 2010a.

_____. Energy performance of a production system of eucalyptus. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 896-903, 2010b.

ROSA, J. H. E. M.; SILVA, H. J. T. D. Gestão de custos de produção de cana-de-açúcar: Estudo de caso dos fornecedores da região de Guariba/SP. GUARIBA, S.-A. D. F. D. C. D. Guariba 2015.

ROSSETTO, R. et al. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. *Informações Agronômicas*, v. 124, p. 8-13, 2008.

SALLA, D. A.; CABELLO, C. Análise energética de sistemas de produção de etanol e mandioca, cana-de-açúcar e milho. *Energia na agricultura*, v. 25, p. 32-53, 2010.

SALLA, D. A. et al. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v. 39, p. 2516-2520, 2009.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar: preparo convencional. Árvore do conhecimento, EMBRAPA, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_84_22122006154841.htm>. Acesso em: 9 de janeiro.

SANTOS, N. B. D. Identificação dos fatores críticos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). 2011. 85, Piracicaba.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 797-804, 2004.

SERRA, G. E et al. Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas. Piracicaba: Piracicaba Planalsucar, 1979.

SHADIDI, B. et al. Experimental investigation of the tractor engine performance using diesohol fuel. Applied Energy, v. 114, p. 874-879, 2014.

SILVEIRA, G. M. O preparo do solo: implementos corretos. 3. São Paulo: Editora Globo, 1989. 243p.

SILVEIRA, G. M.; YANAI, K.; KURACHI, S. A. H. Determinação da eficiência de campo de conjuntos de máquinas convencionais de preparo do solo, semeadura e cultivo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi, v. 10, n. 1, p. 220-224, 2006.

SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. A. G. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. Agronomy Journal, v. 88, n. 5, p. 698-704, 1996.

SITTA, C. M.; MILAN, M. Cana no canteiro. Cultivar Máquinas. Pelotas, RS: Grupo Cultivar, v. 145, p. 8-11, 2014.

SOJKA, R. E. et al. Zone-subsoiling effects on infiltration, runoff, erosion, and yields of furrow-irrigated potatoes. Soil and Tillage Research, v. 25, n. 4, p. 351-368, 1993.

SOUZA, G. S. D. et al. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Scientia Agricola*, v. 72, p. 270-277, 2015.

_____. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 135-146, 2014.

SPEKKEN, M.; MOLIN, J. P.; ROMANELLI, T. L. Cost of boundary manoeuvres in sugarcane production. *Biosystems Engineering*, v. 129, p. 112-126, 2015.

TATU MARCHESAN IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. Disponível em <<http://www.marchesan.com.br/>> Acesso em 07 de julho de 2017.

TOMAZ, H. V. D. Q. Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no desenvolvimento da cana-de-açúcar. 2013. 132p Tese (Doutorado em ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

TURRA, F. E. Análise de diferentes métodos de cálculo de custos de produção na agricultura brasileira. 1990. 134p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

ULBANERE, R. C.; FERREIRA, W. A. Análise do balanço energético para à produção de milho no Estado de São Paulo. *Engenharia Agrícola*, v. 4, n. 1, p. 35-42, 1989.

VASCONCELOS, A. C. M. Desenvolvimento radicular e subsolagem. In: RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C., *et al* (Ed.). Plantio de cana-de-açúcar estado da arte. Piracicaba: Piracicaba T.C.C. Ripoli, 2007. p.190-198.

VECCHIA, R. O meio ambiente e as energias renováveis instrumentos de liderança visionária para a sociedade sustentável. Barueri: Editora Manole, 2010. 334.

VEIGA, J. P. S. et al. Energy embodiment in Brazilian agriculture: an overview of 23 crops. *Scientia Agricola*, v. 72, p. 471-477, 2015.

VIEIRA, G. Avaliação energética e custo de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) do preparo do solo ao 5o. corte. 2007. 104 Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo Hydro-physical properties of an Oxisol under different management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, 2007.

WITNEY, B. Choosing and using farm machines. Harlow, Reino Unido: Longman Scientific & Technical, 1988. 432.

YOUNG, I. M. et al. Differences in potato development (*Solanum tuberosum* cv. Maris Piper) in zero and conventional traffic treatments are related to soil physical conditions and radiation interception. *Soil and Tillage Research*, v. 26, n. 4, p. 341-359, 1993.